

Systematisierung der Potenziale und Optionen

Endbericht an die Enquête-Kommission
„Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der
Globalisierung und der Liberalisierung“
des Deutschen Bundestages

Fraunhofer Institut für
Systemtechnik und
Innovationsforschung

Forschungszentrum Jülich,
Programmgruppe
Systemforschung und
Technologische Entwicklung

C. Cremer
U. Böde
H. Bradke
R. Walz
L. Behnke

M. Kleemann
U. Birnbaum
R. Heckler
G. Kolb
P. Markewitz
K. Leubner

Karlsruhe/Jülich, Dezember 2001

Teil 1: Systematisierung der Potenziale und Optionen

Fraunhofer Institut für Systemtechnik und
Innovationsforschung

Teil 2: Systematisierung der Potenziale und Optionen
für den Gebäudebereich

Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe
Systemforschung und Technologische Entwicklung

Systematisierung der Potenziale und Optionen

Endbericht
an die Enquête-Kommission
„Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der
Globalisierung und der Liberalisierung“
des Deutschen Bundestages

Dipl.-Geoökol. Clemens Cremer
Dipl.-Phys. Ulla Böde
Dr.-Ing. Harald Bradke
Dr. rer. pol. Rainer Walz
cand.-Ing. Lars Behnke

Dezember 2001
Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
1 Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse	1
2 Einleitung	4
2.1 Der konzeptionelle Rahmen der Technologieentwicklung und Bestimmung von Emissionsminderungspotenzialen.....	5
2.2 Methodisches Vorgehen.....	9
2.2.1 Emissionsfaktoren.....	9
2.3 Ergebnisse der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“	12
2.3.1 Private Haushalte.....	12
2.3.2 Industrie.....	13
2.3.3 Kleinverbrauch.....	14
2.3.4 Verkehr	14
3 Querschnittstechnologien.....	16
3.1 Elektromotoren.....	16
3.2 Information und Kommunikation.....	18
3.3 Bereitschaftsschaltungen.....	21
3.4 Beleuchtung.....	22
4 Optionen und Potenziale zur Minderung von Emissionen in privaten Haushalten.....	25
4.1 Einsparoptionen und technische Potenziale	25

II

4.1.1	Warmwasser.....	25
4.1.2	Haushaltsgeräte aus dem Bereich Waschen und Geschirreinigen.....	26
4.1.3	Kühl- und Gefriergeräte	27
4.1.4	Kochen.....	28
4.1.5	Mechanische Geräte	29
4.1.6	Unterhaltungselektronik	30
4.2	Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzmaßnahmen im Haushaltssektor.....	30
5	Optionen und Potenziale zur Emissionsminderung im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.....	32
5.1	Mechanische Anwendungen.....	32
5.1.1	Optionen und Potenziale.....	33
5.2	Thermische Anwendungen.....	34
6	Optionen und Potenziale zur Emissionsminderung im Sektor Industrie	36
6.1	Elektrotechnologien.....	36
6.1.1	Herstellung von Primäraluminium.....	36
1.1.2	Chlor-Alkali-Elektrolyse	38
1.2	Mechanische Anwendungen.....	40
1.2.1	Druckluft.....	40
1.2.2	Pumpen und Ventilatoren.....	43
1.2.3	Mahltechnologien.....	44
1.3	Thermische Anwendungen.....	44
1.3.1	Ofenprozesse - Anwendungen über 500 °C	45
1.1.2	Thermische Anwendungen im Bereich 200 °C bis 500 °C	65
1.1.3	Thermische Anwendungen unter 200 °C	68
1.4	Prozesssubstitution.....	77
1.4.1	Alternative Umsetzungsreaktionen.....	77
1.4.2	Trennverfahren.....	78

7	Optionen und Potenziale zur Minderung von Emissionen im Sektor Verkehr	80
7.1	Optionen und Potenziale im Straßenverkehr	80
7.2	Optionen und Potenziale im Schienenverkehr	83
7.3	Optionen und Potenziale in der Binnenschifffahrt	84
7.4	Optionen und Potenziale im Luftverkehr	84
8	Spezielle Optionen bei Energieumwandlungstechnologien.....	86
8.1	Potenziale zur Minderung von CO ₂ -Emissionen durch den Einsatz von Brennstoffzellen in der öffentlichen und industriellen Kraftwärmekopplung.....	86
8.2	Optionen zur Emissionsminderung durch Abtrennung und Speicherung von CO ₂	91
8.2.1	Technische Optionen zur Abtrennung von CO ₂	91
8.2.2	Verwendung und Speicherung von CO ₂	91
9	Optionen und Potenziale durch Kreislaufschließung und umweltfreundliche Produktkonzepte	93
9.1	Recycling und umweltfreundliche Produktkonzepte als Problemlösungsstrategien.....	93
9.2	Größenordnung des CO ₂ -Reduktionspotenzials für ausgewählte Fallbeispiele.....	96
9.2.1	Auswahl der Fallbeispiele	96
9.2.2	Vorgehensweise und Szenarienbildung.....	97
9.2.3	Ergebnisse.....	98
10	Literatur.....	102

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 2-1: Absolute und spezifische Emissionen bezogen auf den Stromverbrauch für Deutschland	10
Tabelle 2-2: Endenergieverbrauch nach Nutzenergiearten und Nutzenergieverbrauch in Deutschland 1998	11
Tabelle 2-3: Technische Potenziale der rationellen Energienutzung nach dem Schlussbericht der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“	13
Tabelle 3-1: Einsparpotenziale Endenergie für Elektromotoren.....	17
Tabelle 3-2: Einsparpotenziale bei IuK-Technologien.....	20
Tabelle 3-3: Potenziale bei Bereitschaftsschaltungen.....	22
Tabelle 3-4: Endenergieverbrauch und technische Einsparpotenziale bei der Beleuchtung.....	24
Tabelle 6-1: Einsparpotenzial bei der Herstellung von Primäraluminium.....	38
Tabelle 6-2: Endenergieverbrauch für die verschiedenen Verfahren der Chlorherstellung 1998.....	38
Tabelle 6-3: Optionen und Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bei der Chlor-Alkali Elektrolyse	40
Tabelle 6-4: Optionen und Potenziale zur Energieeinsparung in Druckluftanlagen.....	42
Tabelle 6-5: Optionen und Potenziale zur Energieeinsparung bei Pumpen und Ventilatoren.....	43
Tabelle 6-6: Minderungsoptionen und Potenziale beim Hochofenprozess	45
Tabelle 6-7: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Elektro Stahl.....	46
Tabelle 6-8: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Oxygen-Stahl.....	47
Tabelle 6-9: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Walzstahl.....	48
Tabelle 6-10: Minderungsoptionen und Potenziale beim Sinterprozess.....	49
Tabelle 6-11: Minderungsoptionen und Potenziale bei Eisen- und Stahlgießereien.....	50
Tabelle 6-12: Minderungsoptionen und Potenziale bei NE-Gießerein.....	51
Tabelle 6-13: Minderungsoptionen und Potenziale bei NE-Gießerein.....	52

	Seite
Tabelle 6-14: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Primärkupfer.....	53
Tabelle 6-15: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Sekundärkupfer	54
Tabelle 6-16: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Primärzink	55
Tabelle 6-17: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von NE-Halbzeugen.....	56
Tabelle 6-18: Minderungsoptionen und Potenziale beim Brennen von Ziegeln.....	56
Tabelle 6-19: Minderungsoptionen und Potenziale beim Brennen von Kalk	57
Tabelle 6-20: Minderungsoptionen und Potenziale beim Brennen von Zementklinker	58
Tabelle 6-21: Minderungsoptionen und Potenziale bei sonstigen Steinen und Erden.....	59
Tabelle 6-22: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Olefinherstellung.....	60
Tabelle 6-23: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Aluminiumoxid	61
Tabelle 6-24: Minderungsoptionen und Potenziale bei thermischen Prozessen in der Investitionsgüter Produktion.....	62
Tabelle 6-25: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Glas.....	63
Tabelle 6-26: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Feinkeramik.....	64
Tabelle 6-27: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Produktion von Primärblei.....	65
Tabelle 6-28: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Kalirohsalzen.....	65
Tabelle 6-29: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung pulvriger Wachmittel.....	66
Tabelle 6-30: Minderungsoptionen und Potenziale bei der industriellen Herstellung von Backwaren.....	67
Tabelle 6-31: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Kohle	68
Tabelle 6-32: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Ziegeln.....	69

Tabelle 6-33:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von PVC	69
Tabelle 6-34:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Kalzinierung von Soda.....	70
Tabelle 6-35:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Holz.....	70
Tabelle 6-36:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Papier und Pappen.....	71
Tabelle 6-37:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Lacken und Farbüberzügen.....	72
Tabelle 6-38:	Minderungsoptionen und Potenziale bei Trocknungsprozessen in der feinkeramischen Industrie	73
Tabelle 6-39:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Textilien.....	74
Tabelle 6-40:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Zucker und Trockenschnitzeln.....	75
Tabelle 6-41:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Milchprodukten.....	76
Tabelle 6-42:	Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Futtermitteln.....	77
Tabelle 8-1:	Kostenschätzungen für die Entsorgung von CO ₂ für die USA.....	92
Tabelle 9-1:	Entwicklung der Recycling-Quoten energieintensiver Werkstoffe in Deutschland, 1974-2000	94
Tabelle 9-2:	Definition der Nachhaltigkeitsszenarien für das Jahr 2020.....	98
Tabelle 9-3:	Größenordnung der Umweltauswirkungen der Fallbeispiele (Differenz zwischen Referenz- und Nachhaltigkeitsszenario)	99

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 2-1: Energiefluss-Diagramm für Deutschland 1998.....	7
Abbildung 2-2: Schema zur Entwicklung der technischen, wirtschaftlichen und der realisierten Energieeffizienzpotenziale im Untersuchungszeitraum.....	8
Abbildung 9-1: Produkttechnische Strategien im Kreislauf.....	95
Abbildung 9-2: Größenordnung der Umweltentlastungen durch die Fallbeispiele im Verhältnis zur Gesamtbelastung in Deutschland im Jahr 2000.....	100
Abbildung 9-3: Größenordnung der erwarteten Arbeitsplatzeffekte durch die Fallbeispiele	100

1 Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

Bereich	Technologie		Verbrauch 1998 PJ	Anteil am Endenergiever- brauch 1998 in %	technisches Einspar- potenzial PJ	Minderung CO ₂ - Emissionen Mio. t.	wirtschaftliches Einsparpotenzial PJ	Minderung CO ₂ - Emissionen Mio. t.
Querschnitts- optionen	Beleuchtung		188	2	145,1	25,4	106	18,6
	Elektrische Antriebe		817	8,6	92,6	16,3	68,1	11,9
	Information u. Kommunikation		129	1,4	64,5	11,3	bis 64,5	bis 11,3
	Bereitschafts- schaltungen		86,8	0,9	63,1	11,0		
Haushalte	Warmwasser- bereitung	Einsparung	255,6	2,7	89,5	8	44,8	4
		Subst. Strom	53,2	0,5		5,5		
	Waschen, Trocknen, Geschirrspülen		51	0,5	24	4,2	bis 24	bis 4,2
	Kühlen und Gefrieren		70,6	0,7	35	6,1	bis 35	bis 6,1
	Kochen		62,6	0,6	24	4,3		
	Mechanische Anwendungen		43,9	0,5	11	1,9		
	Unterhaltungs- elektronik		58,3	0,6	29	5,1		
Gewerbe, Handel u. Dienstleistung en	Mechanische Anwendungen		314	3,3	62,8	8,2		
	Thermische Anwendungen		369	3,9	81,1	7,9		

Bereich	Technologie		Verbrauch 1998 PJ	Anteil am Endenergiever- brauch 1998 in %	technisches Einspar- potenzial PJ	Minderung CO ₂ - Emissionen Mio. t.	wirtschaftliches Einsparpotenzial PJ	Minderung CO ₂ - Emissionen Mio. t.
Industrie	Elektro technologien	Primäraluminium	33	0,3	7,7	1,3	2,6-3,3	0,5-0,6
		Chlorherstellung	40,5	0,43	18,9	3,3	2,2-3,6	0,4-0,6
	Mechanische Anwendungen	Druckluft	63	0,67	30,2	5,3	19-22	3,3-3,9
		Pumpen u. Ventilatoren	175,7	1,86	43,9	7,7	21-26	3,7-4,5
	Thermische Anwendungen über 500°C	Roheisen	338,9	3,58	16,9	1,7	3,4-6,8	0,4-0,7
		Elektrostahl	27,8	0,29	5,8	0,8-0,9	1,4-2,8	0,2-0,5
		Oxygen-Stahl	netto -9,7 brutto 10,6	0,11	netto 7,0 brutto 1,0			
		Warmwalzen	40,4	0,43	13,4	0,7-1,3	2,0-3,2	0,1-0,2
		Sintern	41,9	0,44	5	0,5	2,9	0,3
		EST-Gießen	20,9	0,22	5	0,4	0,8-1,5	0,07-0,13
		NE-Gießen	5,5	0,06	1,1	0,07	0,3-0,4	0,02
		Sekundäralumin.	4	0,04	0,64	0,04	0,3-0,4	0,02
		Primärkupfer	4,1	0,04	0,32	0,02	0,21	0,01
		Sekundärkupfer	6,2	0,07	0,5	0,03	0,25-0,4	0,02
		Primärzink	2,1	0,02	0,08	0,005	0,05	0,003
		NE-Halbzeuge	36,5	0,39	8,4	0,5	3,7-5,5	0,23-0,34
		Ziegelbrennen	15,1	0,16	3,4	0,27	1,5-1,8	0,12-0,14
		Kalkbrennen	21,6	0,23	1,5	0,12	1,1	0,09
		Zementklinker	79,8	0,84	15,9	1,5	4,0-6,4	0,4-0,6
		sonst. Steine Erden	20,1	0,21	3,6	0,29	1,6-2,1	0,13-0,17
Olefine	87	0,92	11,3	0,68	5,2-7,0	0,31-0,42		
Aluminiumoxid	2,3	0,02	0,2	0,02	0,05	0,004		

Bereich	Technologie	Produkte/ Verfahren	Verbrauch 1998 PJ	Anteil am Endenergiever- brauch 1998 in %	technisches Einspar- potenzial PJ	Minderung CO ₂ - Emissionen Mio. t.	wirtschaftliches Einsparpotenzial PJ	Minderung CO ₂ - Emissionen Mio. t.
Industrie	Thermische Anwendungen über 500°C	Investitionsgüter	43,3	0,46	4,3	0,46	3,5	0,36
		Glas	55,3	0,58	13,7	0,81	5,5-6,6	0,33-0,39
		Brennen von Feinkeramik	31,1	0,33	6,2	0,37	2,5-3,1	0,15-0,18
	Thermische Prozesse 200°C bis 500°C	Primärblei	1,1	0,01	0,2	0,012	0,13	0,008
		Kalisalze	9,8	0,10	2,8	0,16	0,8-1,0	0,04-0,06
		Waschmittel	5,2	0,05	1,8	0,12	1,0	0,07
	Thermische Prozesse bis 200°C	Industr. Backen	10,5	0,11	2,1	0,13	1,1-1,6	0,07-0,1
		Kohletrocknung	8	0,08	2,3		0,6-0,8	
		Ziegelrocknung	14,4	0,15	1,2	0,1	0,7-0,9	0,06-0,07
		PVC-Entwässern	1,7	0,02	0,2	0,01	0,05	0,003
		Sodaherstellung	5,4	0,06	-	-	-	-
		Holztrocknung	33,8	0,36	6,1		2,7-4,1	
		Papierrocknung	97,4	1,03	11,7	1,0	4,9-7,8	0,4-0,7
		Lacke u. Farben trocknen	17,5	0,18	2,8		1,8-2,1	
		Trocknung von Feinkeramik	2,1	0,02	0,2	0,01	0,1	0,006
		Textilherstellung	14,7	0,16	2,3	0,14	1,5-1,8	0,09-0,11
		Zucker	27,6	0,29	11,0	0,96	2,2-2,8	0,19-0,24
		Milchprodukte	4,0	0,04	1,6	0,12	0,6	0,04
		Futtermittel	4,1	0,04	0,6	0,05	0,4-0,5	0,03-0,04
Verkehr	Straßenverkehr		2327	24,6	1164	84,5		
	Schienenverkehr		84,5	0,89	25,4	3,6		
	Binnenschifffahrt		15,7	0,17	2,4	0,35		
	Luftverkehr		262,1	2,77	78,6	5,8		

2 Einleitung

Die **rationelle Nutzung von Energie** (und Exergie) auf allen Energiewandlungs- und –nutzungsstufen ist für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts die zentrale Option, Treibhausgasemissionen zu vermindern. Dies ist einfach der Tatsache geschuldet, dass etwa 80 % des Weltenergieverbrauchs heute auf fossilen Energieträgern basiert (Deutschland derzeit rund 84 %). Die Klima- und Energiepolitik, aber auch die Forschungspolitik in den OECD-Staaten hat dieses Minderungspotential, das sich allein durch autonomen technischen Fortschritt um etwa 1 %/a erhöht (und realisiert wird), derzeit noch zu wenig in den Fokus genommen. Es ist daher zentraler Gegenstand der vorliegenden Synopse.

Bisher noch weniger unter Emissionsgesichtspunkten betrachtet sind die verschiedenen Möglichkeiten zur **Erhöhung der Materialeffizienz**. Denn wenn Werkstoffe, die häufig mit relativ hohem Energieaufwand hergestellt werden müssen, zu einem höheren Anteil im Nutzungskreislauf geführt werden, die Nutzung von langfristigen Gebrauchsgütern intensiviert oder verlängert wird, oder wenn spezifisch weniger Material für das gleiche Produkt durch konstruktive Maßnahmen oder verbesserte Materialeigenschaften verwendet werden kann, dann bedeutet dies in aller Regel einen geringeren Energieverbrauch bei der Herstellung dieser Güter, teilweise aber auch bei deren Nutzung (z. B. geringere bewegte Massen (Fahrzeuge, Lifte, Rolltreppen) oder geringere innere Wärme, die nicht genutzt werden kann (z. B. Produktionsbehälter im Batch-Betrieb, Kochtöpfe). Diese Möglichkeiten sind noch erweiterungsfähig durch Re-Substitution energie-intensiv hergestellter Werkstoffe durch natürlich nachwachsende Rohstoffe wie z. B. Holz, Flachs und biotechnologisch herstellbare Grundchemikalien. Allerdings wird auf diese Möglichkeit im Rahmen der vorliegenden Synopse nicht eingegangen.

Die hiermit **vorgelegte Synopse hatte zum Ziel**, die heute bekannten und die mit großer Sicherheit zu erwartenden Optionen und Potenziale zur Minderung von energiebedingten CO₂-Emissionen zusammenzustellen. Sie kann als Grundlage dienen, um die technischen Spezifikationen von Energie-Szenarien zu formulieren und um die technische Informationsbasis für Handlungsempfehlungen für die Politik zu liefern. Die Verknüpfung der spezifischen Potenziale mit ihren jeweiligen Anteilen des Energieverbrauchs für das Basisjahr 1998 erlaubt es, vielversprechende Optionen zu identifizieren, mit denen größere Beiträge zum Klimaschutz geleistet werden könnten.

Die im Folgenden beschriebenen **technischen und wirtschaftlichen Potenziale, bezogen auf das Basisjahr 1998**, umfassen nur diejenigen Technologien, die heute bereits am Markt oder in Pilotanlagen verfügbar sind oder deren Verfügbarkeit in naher Zukunft erwartet wird. Die längerfristige Technologieentwicklung wurde nur in Ausnahmefällen berücksichtigt. Damit geben die identifizierten Potenziale **nur**

einen Teil der Minderungspotenziale für das Jahr 2050 wieder, das als Zieljahr der Untersuchungen der Enquête-Kommission gesetzt wurde, da in dem Betrachtungszeitraum ein weiterer technischer Fortschritt stattfinden wird, der neue technische Optionen schaffen, Kostensenkung ermöglichen und die Potenziale somit vergrößern wird.

2.1 Der konzeptionelle Rahmen der Technologieentwicklung und Bestimmung von Emissionsminderungspotenzialen

Die benötigten Energiedienstleistungen werden heute in Deutschland mit einem Energieaufwand von 5,5 kWh/cap a (oder 17,5 GJ/cap a) erstellt. Die Energieverluste verteilen sich dabei zu knapp 30 % auf den Umwandlungssektor, insbesondere die thermischen Kraftwerke, zu rd. 35 % auf die Wandlungsstufe von der jeweiligen Endenergie zur Nutzenergie und rd. 35 % durch Nutzenergieverluste (vgl. Abbildung 2-1). Theoretisch ließen sich diese Energieverluste um etwa 90 % reduzieren (Enquête-Kommission, 1990; Jochem, 1991); aber nur etwa die Hälfte dieser theoretischen Energieeinsparpotenziale ist heute technisch realisierbar, und nur wiederum ein Teil hiervon ist unter heutigen Produktionsbedingungen, Re-Investitionszyklen und Energiepreisen wirtschaftlich (etwa 20 bis 30 %; vgl. Abbildung 2-3).

Diese für **heute spezifizierbaren technischen und wirtschaftlichen Potenziale** verbesserter Energieanwendung sind aber **nicht statisch zu verstehen**. Vielmehr sind folgende Einflüsse und Dynamiken bei einer Einschätzung zukünftiger Möglichkeiten zur Emissionsminderung durch Energienutzung zu beachten (vgl. Abbildung 2-3):

- Jährlich durch Neuinvestitionen realisierte Verbesserungen der Energienutzung scheinen für den Laien das verbleibende Energieeffizienzpotenzial zu reduzieren; dem ist aber in der Regel nicht so, weil sowohl laufend neue technische Möglichkeiten entwickelt als auch die Kosten zur Erreichung des verminderten Energieeinsatzes in aller Regel permanent gesenkt werden.
- Das **wirtschaftliche Energieeffizienzpotenzial** erhöht sich in Folge von Lerneffekten und Skaleneffekten um etwa 1 % pro Jahr. Es ist aber in dieser Dynamik durch spezielle energiepolitische Maßnahmen erheblich beeinflussbar. Beispielsweise verbesserten sich die Wärmedämmeigenschaften von Fenstersystemen in den letzten 30 Jahren um den Faktor vier bei nominell den gleichen Preisen von ca. 500,- DM/m². Aufgrund von Hemmnissen und Marktunvollkommenheiten wird nur ein Teil des wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenzials realisiert. Beispielsweise werden derzeit nur etwa 15 bis 20 % der renovierten Fassaden von Gebäuden zugleich einer wärmetechnischen Sanierung unterzogen.

- Das **technische Energieeffizienzpotenzial** nimmt laufend durch neue technische Erkenntnisse und Möglichkeiten zu. Um in Zukunft erhebliche Zuwächse des technischen Energieeffizienzpotenzials zu erreichen, sind die Prozess-Substitutionen bzw. völlig neue technische Lösungen von besonderer Bedeutung. Beispielsweise reduziert das Passivhaus den Heizenergiebedarf um 90 % gegenüber dem Heizenergieverbrauch des Gebäudebestandes in Deutschland. Neue Materialien, neue physikalisch-chemische Verfahren in der Industrieproduktion, biotechnologische Produktionsverfahren sind weitere Beispiele, bei denen der spezifische Energiebedarf in Zukunft um einen Faktor 2 bis 8 reduziert werden kann. Je mehr hier zusätzliche Forschung und Entwicklung in Industrie und Wissenschaft betrieben wird, umso schneller werden theoretische Potenziale zu technischen Potenzialen.

Das Ziel der vorgelegten Synopse beschränkte sich auf die Beschreibung der technischen und wirtschaftlichen Potenziale mit Basisjahr 1998, d. h. anhand der heute unmittelbar verfügbaren technischen Lösungen. Es sei deshalb abschließend zu dieser Einführung betont, dass die beschriebene Dynamik der Potenziale der rationalen Energienutzung bei den Szenarien der Enquête-Kommission mitbedacht werden muss und dass **die hier beschriebenen Potenziale in der Regel nur einen Realisierungszeitraum von einem Produkt- bzw. Re-Investitionszyklus abdecken**, d. h. zwischen 10 und 30 Jahren in der Regel (Ausnahmen: Gebäude wegen der sehr langen Re-Investitions- und Renovierungszyklen).

Abbildung 2-1: Energiefluss-Diagramm für Deutschland 1998

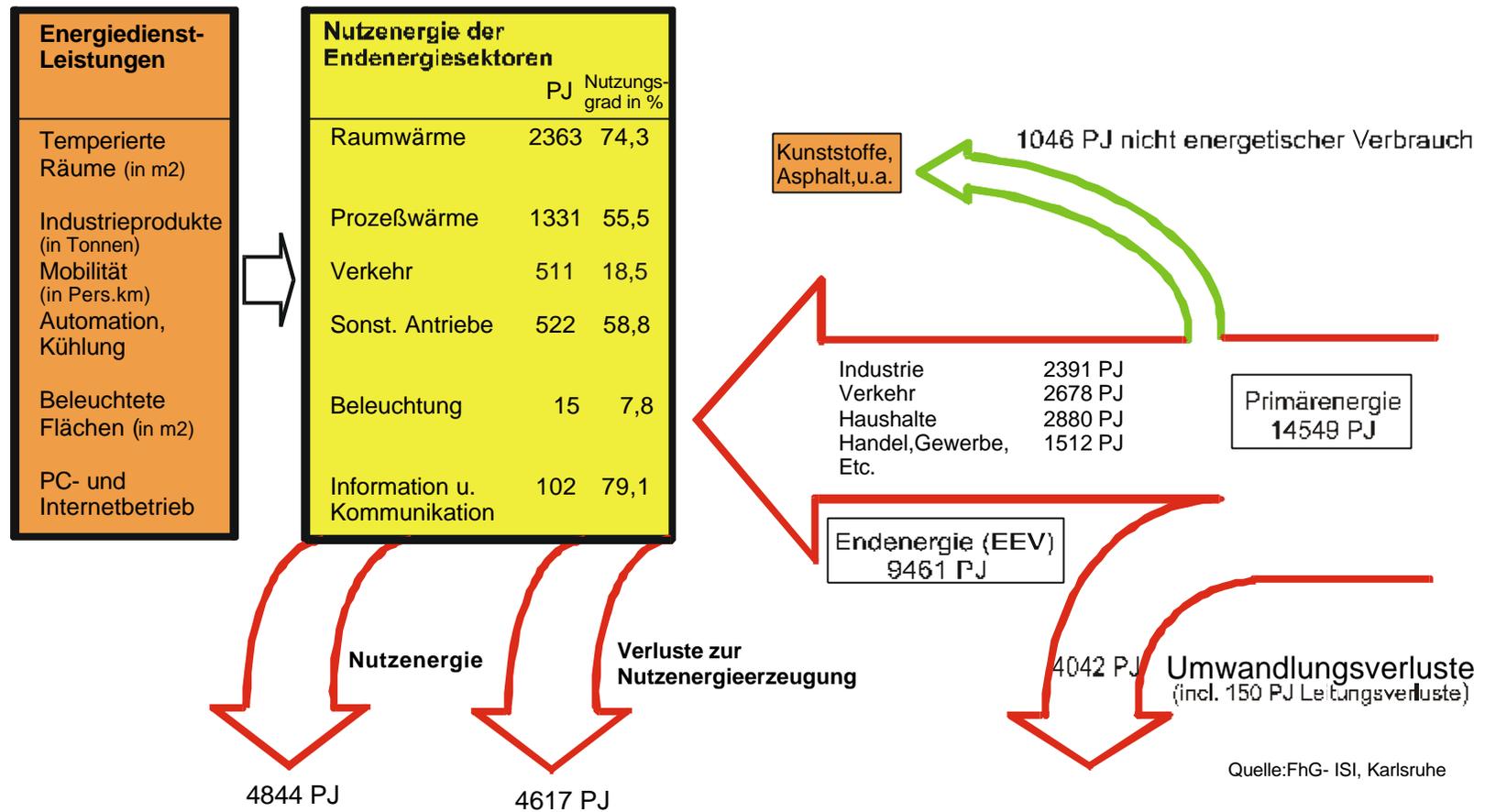
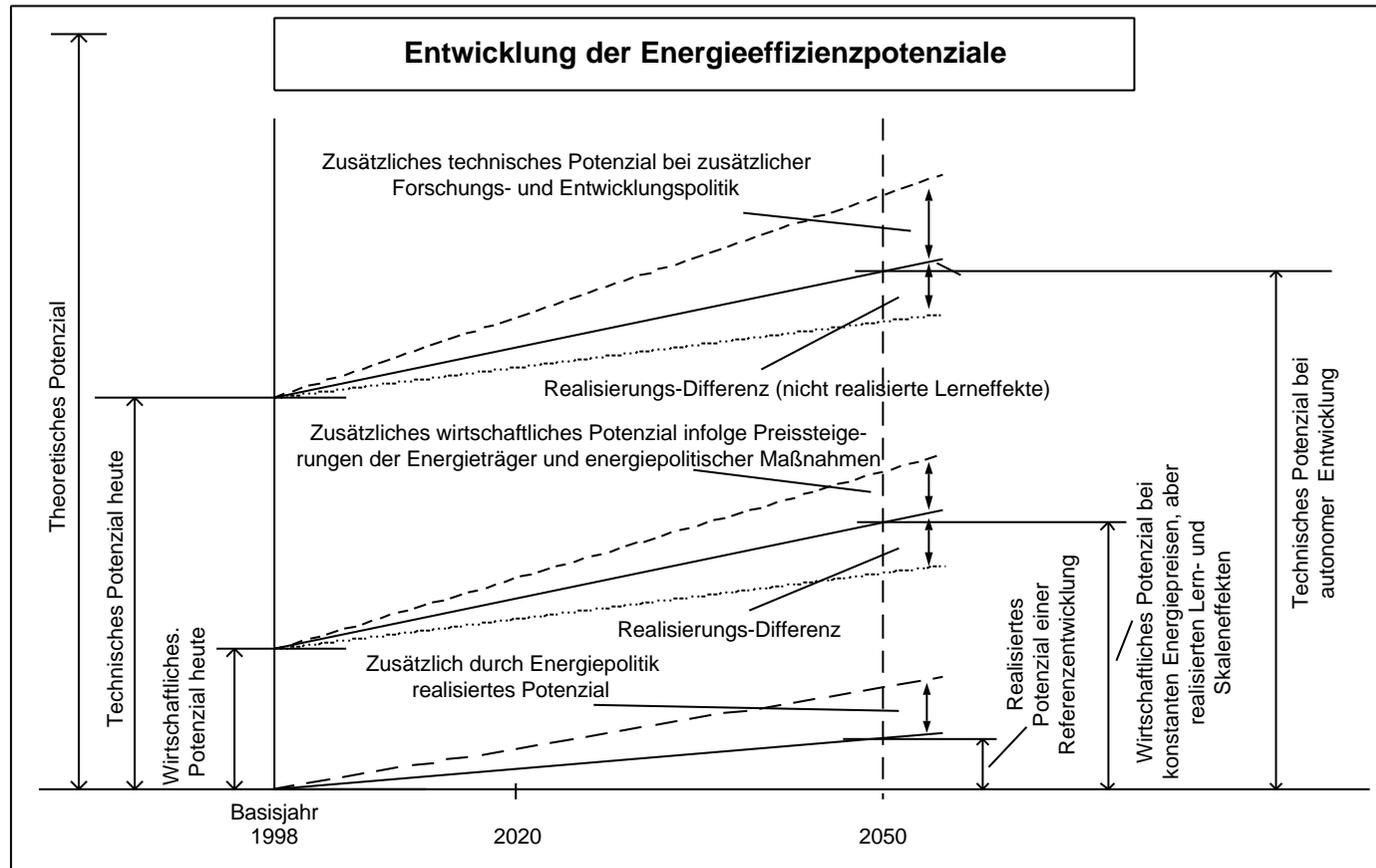


Abbildung 2-3: Schema zur Entwicklung der technischen, wirtschaftlichen und der realisierten Energieeffizienzpotenziale im Untersuchungszeitraum



Quelle: FhG-ISI

2.2 Methodisches Vorgehen

Die Optionen und Potenziale zur Minderung der energiebedingten Emissionen in Deutschland wurden aus der vorhandenen Literatur gesammelt und nach Anwendungsgebieten und Technologien systematisiert.

Die Detaillierung des Endenergieverbrauchs von 1998 wurde im Wesentlichen aus Geiger u. Lindhorst (1998) entnommen. Die von diesen Autoren vorgenommene Detaillierung unterscheidet sich nur marginal von der Detaillierung, die vom VDEW vorgenommen wurde (VDEW, 1999). Insbesondere wurde in der ersten Quelle der Endenergieverbrauch für Information und Kommunikation gesondert ausgewiesen, während in der Detaillierung durch die VDEW Arbeitsgruppe Nutzenergiebilanzen der Energieverbrauch für Information und Kommunikation noch unter der mechanischen Energie subsummiert wird. Als weitere Quellen für die Detaillierung des Energieverbrauchs wurden unter anderen die Studien von Geiger et al. (1999), die den Endenergieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen untersuchten, und von Böde et al. (2000) verwendet.

Der Nutzenergieverbrauch, der sich aus dem Endenergieangebot und dem Nutzungsgrad für die einzelnen Nutzenergiearten Wärme, Kraft, Beleuchtung und Information und Kommunikation ergibt, konnte nicht mehr auf die Endenergeträger, sondern nur noch auf Sektorebene aufgegliedert werden. Dazu wurde die Detaillierung von Geiger u. Lindhorst (2000) verwendet. Der 1998 erreichte Nutzungsgrad musste aus den Werten für 1997 und 1999 interpoliert werden. Die Detaillierung des Endenergieverbrauchs und des Nutzenergieverbrauchs nach Geiger u. Lindhorst ist in Tabelle 2-2 wiedergegeben.

2.2.1 Emissionsfaktoren

Für die Emissionsfaktoren wurden die Werte vom Umweltbundesamt verwendet. Für das Jahr 1998 ist vom Umweltbundesamt jedoch noch kein kumulierter Emissionsfaktor für elektrischen Strom veröffentlicht worden. Daher wurde dieser Emissionsfaktor in Anlehnung an das Verfahren des Umweltbundesamtes eigens berechnet.

Dazu wurde der Verbrauch an Brennstoffen der öffentlichen und der industriellen Wärmekraftwerke aus der Energiebilanz (AG-Energiebilanzen, 2000) entnommen und mit den Emissionsfaktoren für die einzelnen Brennstoffe verknüpft, die bereits vom Umweltbundesamt vorliegen. Damit wurden die kumulierten Emissionen an CO₂ für die Stromherstellung errechnet.

Der Stromverbrauch wurde aus Lochte et al. (2000) entnommen. Als in Deutschland emissionswirksam angesetzt wurde die inländische Bruttostromerzeugung. Der Kraftwerkseigenverbrauch und die Leitungsverluste wurden auf den Endenergieverbrauch umgelegt.

Tabelle 2-1: Absolute und spezifische Emissionen bezogen auf den Stromverbrauch für Deutschland

Jahr	Stromverbrauch TWh	CO ₂ - Emissionen Mio. t	spezifische CO ₂ - Emissionen		Quelle
			g/kWh	t/TJ	
1995	473,656	320	675	187,5	UBA
1996	487,574	321	660	183,3	UBA
1997	487,075	309	635	176,4	UBA
1998	493,490	312	631	175,3	eigene Berechnung

Tabelle 2-2: Endenergieverbrauch nach Nutzenergiearten und Nutzenergieverbrauch in Deutschland 1998

Anwendungszweck	Endenergieverbrauch						Nutzenergieverbrauch			
	Kohle	Fernwärme	Öl	Kraftstoff	Gas	Strom	Summe	Nutzungsgrad	Verbrauch	
	PJ	PJ	PJ	PJ	PJ	PJ	PJ	%	PJ	
Industrie	Prozesswärme	425	32	167	0	803	185	1612	60,5	975
	Raumwärme	6	35	79	0	114	3	237	70,5	167
	Mechanische Energie	0	0	3	0	12	457	472	64,5	304
	Beleuchtung	0	0	0	0	0	38	38	9,8	4
	Information u. Kommun.	0	0	0	0	0	32	32	90,0	29
	Insgesamt	431	67	249	0	929	715	2391	61,9	1479
Verkehr	Prozesswärme	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0
	Raumwärme	0	0	0	9	0	3	12	71,5	9
	Mechanische Energie	0	0	0	2602	0	44	2646	18,5	490
	Beleuchtung	0	0	0	9	0	3	12	8,3	1
	Information u. Kommun.	0	0	0	6	0	3	9	90,5	8
	Insgesamt	0	0	0	2625	0	53	2678	18,9	507
Haushalte	Prozesswärme	15	18	88	0	132	164	416	47,0	196
	Raumwärme	193	152	888	0	917	82	2233	75,0	1675
	Mechanische Energie	0	0	0	0	0	138	138	41,0	57
	Beleuchtung	0	0	0	0	0	41	41	7,0	3
	Information u. Kommun.	0	0	0	0	0	53	53	70,0	37
	Insgesamt	208	170	976	0	1049	478	2880	68,3	1967
Gewerbe, Handel u. Dienstleistung	Prozesswärme	6	15	100	0	141	108	369	43,5	161
	Raumwärme	12	103	261	0	275	47	697	73,5	512
	Mechanische Energie	0	0	0	135	0	179	314	58,0	182
	Beleuchtung	0	0	0	0	3	94	97	7,3	7
	Information u. Kommun.	0	0	0	0	0	35	35	80,0	28
	Insgesamt	18	117	360	135	419	463	1512	58,9	890
Summe der Verbrauchs- sektoren	Prozesswärme	445	64	355	0	1075	457	2397	55,5	1331
	Raumwärme	211	290	1228	9	1307	135	3179	74,3	2363
	Mechanische Energie	0	0	3	2737	12	817	3569	28,9	1033
	Beleuchtung	0	0	0	9	3	176	188	7,8	15
	Information u. Kommun.	0	0	0	6	0	123	129	79,1	102
	insgesamt	656	355	1585	2760	2397	1708	9461	51,2	4843

Quelle: Geiger u. Lindhorst, 2000 u. FhG-ISI

2.3 Ergebnisse der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“

Die Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ hatte sich in der ersten Hälfte der 90er Jahre bereits mit den Möglichkeiten einer nachhaltigen Energiepolitik befasst und dabei auch Potenziale zur Minderung der Treibhausgasemissionen untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse zu den Minderungspotenzialen aus dem Schlussbericht der Enquête-Kommission (Enquête-Kommission, 1994) sind hier nochmals zusammengefasst, auch um im Vergleich zu dieser Synopse dem Leser zu demonstrieren, dass die realisierbaren Potenziale der rationellen Energienutzung durch neue technische und wirtschaftliche Potenziale "nachwachsen".

2.3.1 Private Haushalte

Im Sektor Haushalte wurden Einsparpotenziale für die Geräte aus den Bereichen, Kühlen und Gefrieren, Kochen und Backen, Waschen und Trocknen sowie Beleuchtung und Kleingeräte ermittelt. Die langfristig erreichbaren technischen Einsparpotenziale für Kühl- und Gefriergeräte wurden mit rund 85 % angegeben. Die Einschätzung der kurzfristig erreichbaren technisch-wirtschaftlichen Einsparpotenziale lag zwischen 49 % für Kühl-Gefrierkombinationen und 72 % für Kühlschränke.

Die Einsparpotenziale bei Elektrokochherden lagen nach dem Bericht der Enquête-Kommission bei höchstens 40 %, wenn die herkömmliche Gussplatte mit Widerstandsheizung durch Induktionskochplatten ersetzt wird. Für Backöfen wurden bis 30 % durch eine Verbesserung der Isolierung und den Einsatz von Backraumteilern angegeben. Die Einsparoption, die sich aus der Substitution von Elektroherden durch Gasherde ergibt, besteht weiterhin. Allerdings hat sich der Trend in der Gegenrichtung zu mehr Elektroherden zwischenzeitlich fortgesetzt (Schlesinger et al., 1999). Insgesamt verliert der Energieverbrauch durch Kochen infolge veränderten Essgewohnheiten und Fertiggerichten schnell an Bedeutung.

Im Bereich Waschen und Trocknen wurden die größten Einsparpotenziale vor allem bei der Bereitstellung der Wärmeenergie für das Wäschewaschen durch den Anschluss an einen externen Wärmeerzeuger gesehen. Die identifizierten primär-energetischen Einsparpotenziale lagen bei bis zu 25 %. Für Geschirrspüler wurde die gleiche Option vorgeschlagen, jedoch nur Potenziale von 6 % gesehen (Primär-energie).

Für die Beleuchtung wurde ein wirtschaftliches Reduktionspotenzial von max. 74 % in Haushalten berechnet, wobei als technische Option nur der Einsatz von Kompaktleuchtstofflampen beschrieben wurde.

Die Minderungspotenziale beim Raumwärmebedarf in privaten Haushalten wurden beschränkt auf die bis 2005 erreichbaren angegeben. Hier lagen die Werte bei 17 bis 25 % der Gesamtemissionen an CO₂ des Sektors für die alten Bundesländer. Für die neuen Bundesländer wurden nur Potenziale zwischen 3 und 17 % der Emissionen identifiziert, bei denen jedoch der Neubau nicht berücksichtigt wurde. Unter Berücksichtigung des Baubestandes in den neuen Bundesländern, dürfte das Potenzial schon damals höher gelegen haben.

Ausführlich wurden die Emissionsminderungspotenziale in einer sektorübergreifenden Betrachtung analysiert, deren Zeithorizont bis 2050 reichte. Das sofort umsetzbare technische Einsparpotenzial wurde auf 70 % beziffert (Absenkung des spezifischen Verbrauchs von rd. 160 kWh/m²a auf 50 kWh/m²a). Das direkt wirtschaftliche Potenzial wurde mit 50 % angegeben. Bis 2050 wurde eine Steigerung des technischen Potenzials auf 100 % und des wirtschaftlichen Potenzials auf 86 % erwartet. Das technische Potenzial von 100% bedeutet eine Bauweise, die jeglichen Raumwärmebedarf vermeidet.

2.3.2 Industrie

Die technischen Potenziale der rationellen Energienutzung in Deutschland wurden im Schlussbericht der Enquête-Kommission wie folgt zusammengefasst:

Tabelle 2-3: Technische Potenziale der rationellen Energienutzung nach dem Schlussbericht der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“

Industriehauptgruppe	Technisches Potenzial (%)	
	Brennstoffe	Strom
Grundstoffindustrie	15-20	ca. 10
Investitionsgüter	15-20	15-20
Verbrauchsgüterindustrie	40-45	ca. 10
Nahrungsmittelindustrie	25-30	ca. 10

Quelle: Enquête-Kommission, 1994

Im Sektor Industrie wird eine Vielzahl technischer Optionen zur Energieeinsparung aufgeführt.

- Grundsätzliche Umstellungen von Produktionsprozessen,
- Bessere Dämmung von Öfen,

- Substitution von Brennstoffen durch Strom in Ofenanwendungen, wenn dadurch Effizienzsteigerungen und Verminderungen des Primärenergieeinsatzes möglich sind,
- Verbesserung thermischer Trocknungsverfahren durch Einsatz von Lösungsmitteln mit geringerer Verdampfungswärme, Ersatz von Frischlufttrocknung durch Kondensationstrocknung z. B. bei Schnittholztrocknung, konvektive Lacktrocknung in Umluftkammern anstatt Infrarottrocknung,
- Substitution thermischer Trennverfahren durch alternative Technologien wie Membranverfahren, Adsorption, Extraktion, Kristallisation,
- Elektronische Prozessführung thermischer Prozesse,
- Einsatz von katalytischen und biotechnologischen Verfahren zum Ersatz von Hochdruck- und Hochtemperaturverfahren,
- Verminderung des Energiebedarfs von Druckluftanlagen durch Reduzierung der Leckageverlust und Einsatz von bedarfsangepassten Kompressoren,
- Verbesserung mechanischer Bearbeitungsvorgänge,
- Einsatz von drehzahlgesteuerten Motoren in elektrischen Antrieben.

Keine dieser Optionen ist bis heute vollständig in die Praxis umgesetzt, so dass sie weiterhin Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bieten.

2.3.3 Kleinverbrauch

Der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung, noch als Kleinverbrauch bezeichnet, wurde im Schlussbericht der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ nur kurz behandelt. Es wurden Beispiele von umgesetzten Maßnahmen vorgestellt. CO₂-Minderungspotenziale wurden nur zusammenfassend genannt. Das Potenzial der rationelle Energienutzung zur Emissionsminderung in den alten Bundesländern wurde auf 14 bis 17 % der Gesamtemissionen des Sektors beziffert. Die identifizierten Minderungspotenziale bei der Raumwärme lagen bei 5 bis 10 % der Gesamtemissionen des Sektors und die Potenziale aus Substitution der Endenergiesubstitution bei 2 bis 3 %.

2.3.4 Verkehr

Für den Personenkraftfahrzeugverkehr wurden die Potenziale der autonomen technischen Entwicklung mit 10 % angegeben. Beim Straßengüterverkehr lagen die Minderungspotenziale nach den Daten des Schlussberichts bei 19 % für die CO₂-Emissionen. Technische Optionen wurden nicht genannt. In Fahrzeugen mit alter-

nativen Energieträgern wie Strom, Methanol oder Wasserstoff wurde keine Option gesehen, die eine signifikante Minderung der CO₂-Emissionen ermöglicht.

An Minderungsoptionen im Schienenverkehr bestehen Maßnahmen wie die Rückgewinnung von Bremsenergie und die Reduktion des Luftwiderstands sowie die Verbesserung der Nebenaggregate wie Lüftung und Klimatisierung der Wagen.

Im Luftverkehr wurde das Minderungspotenzial auf insgesamt 30 % beziffert, das sich aus der Reduzierung des Luftwiderstands und der Verringerung des Gewichts ergibt. Verbesserungen der Triebwerkstechnik ermöglichen bis 2020 Einsparungen von ebenfalls 30 %, so dass sich ein Gesamtpotenzial von 60 % ergibt.

2.3.5 Ursachen für Abweichungen dieser Studie von den Ergebnissen aus den Studien vorhergehender Klima-Enquête-Kommissionen

In vielen Punkten zeigt die vorliegende Studie andere Ergebnisse als die Studien, die für die Enquête-Kommissionen „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ und „Schutz des Menschen und der Umwelt“ erstellt wurden. Die Abweichungen liegen in mehreren Ursachen begründet. Zunächst musste bei dieser Studie ein anderer Zeithorizont gewählt werden, da die heute bekannten und zumindest in näherer Zukunft verfügbaren technisch erschließbaren Optionen und Potenziale zur Minderung der Klimagasemissionen identifiziert und systematisiert werden sollten. Damit ergibt sich ein deutlich kürzerer Zeithorizont, da die nur annäherungsweise abschätzbare technische Entwicklung im Gegensatz zu früheren Studien möglichst nicht mit einbezogen werden sollte.

Weitere Gründe liegen auch in der fortgeschrittenen Entwicklung, die einerseits zu technischen Neuerungen, aber auch zur Umsetzung von Potenzialen geführt hat. Exemplarisch lässt sich dies im Bereich der Kühlgeräte in Haushalten darlegen. In den Studienbänden der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ wurde ein kurzfristig erreichbares Minderungspotenzial für den Energieverbrauch von 72 % angegeben. Vom Zeitraum Anfang der neunziger Jahre bis 1997 hat sich eine Minderung des durchschnittlichen Energieverbrauchs von Kühlschränken um 20 % ergeben, ohne dass in dieser Zeit grundlegend neue technische Optionen zur Minderung des Energieverbrauchs entwickelt worden wären. Das in dieser Studie abgeschätzte Einsparpotenzial von 50 % liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie das Potenzial, das von der Enquête „Schutz der Erdatmosphäre“ ermittelt wurde.

3 Querschnittstechnologien

Traditionell werden die Techniken der Energienutzung und –umwandlung in Querschnittstechnologien, die in vielen Energieverbrauchssektoren anzutreffen sind, und in prozess- und branchenspezifische Technologien eingeteilt.

3.1 Elektromotoren

Elektrische Antriebe standen 1998 mit 817 PJ für rund 48% des Verbrauchs an elektrischem Strom oder 8,6 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Dabei lag der Stromverbrauch von Elektromotoren mit 457 PJ im Sektor Industrie am höchsten. Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen lag der Verbrauch bei 179 PJ.

Einsparpotenziale beim Energieverbrauch der Elektromotoren bestehen in drei Punkten:

- Effizienzerhöhung des Motors durch veränderte Bauweise,
- Elektronische Anpassung der Motorleistung an die Nachfrage,
- Verbesserung des Gesamtsystems.

Neben den herkömmlichen Elektromotoren, deren Konstruktion oft noch von der möglichst sparsamen Verwendung von Kupfer geprägt ist, gibt es auch energieeffiziente Elektromotoren auf dem Markt, bei denen die effiziente Nutzung des Stroms ein wichtiges Design-Element ist. Die Verwendung von energieeffizienten Elektromotoren und die Einsparpotenziale sind in verschiedenen Studien untersucht worden; z. B. geben Almeida et. al. (1996), Landwehr et. al. (1996), Landwehr u. Jochem (1997), Almeida et al. (2000) an, dass neben der Verwendung anderer Motoren vielfältige Einsparoptionen bei elektrisch betriebenen Systemen bestehen wie die Optimierung der Auslegung des Gesamtsystems, die Verwendung hoch-effizienter Endverbrauchsgeräte (Pumpen, Ventilatoren usw.), effiziente Kraftübertragung, qualitativ hochwertige Wartung und Reparatur und die Vermeidung von Überdimensionierung von Motoren. Bisher existieren jedoch hauptsächlich Studien zu den Potenzialen, die sich aus dem Einsatz von energieeffizienten Elektromotoren und von elektronischer Drehzahlsteuerungen ergeben, da die anderen Einsparoptionen nur sehr schwer zu quantifizieren sind, weil breitere empirische Untersuchungen nicht vorliegen.

Aus den Angaben von Almeida et al. (2000) wurden folgende Potenziale in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen für den Einsatz

energieeffizienter Elektromotoren und von drehzahlgesteuerten Motoren mit einer Aufnahmeleistung größer 0,75 kW in Deutschland errechnet.

Tabelle 3-1: Einsparpotenziale Endenergie für Elektromotoren

Technische Einsparpotenziale						
Sektor	Verbrauch 1998¹	EEM²	Drehzahl-gesteuerte Motoren²	Verhaltensmaßnahmen u. Auslegungsoptimierung	aggregiertes Einsparpotenzial	Minderung CO₂ - Emissionen (Mio. t.)
Industrie	457 PJ	12,3 PJ	44,8 PJ	15,5 PJ	65,4 PJ	11,5
GHD	179 PJ	6,6 PJ	19,7 PJ	2,1 PJ	27,2 PJ	4,8
Summe	636 PJ	18,9 PJ	64,5 PJ	17,6 PJ	92,6 PJ	16,3
Wirtschaftliche Einsparpotenziale						
Industrie	457 PJ	12,3 PJ	28,3 PJ	15,5 PJ	50,8 PJ	8,9
GHD	179 PJ	6,6 PJ	7,3 PJ	2,1 PJ	2,1 PJ	3,0
Summe	636 PJ	18,9 PJ	35,3 PJ	17,6 PJ	68,1 PJ	11,9
¹ Die Verbrauchsdaten beziehen sich auf alle Motoranwendungen, während die Einsparungen nur Motoren über 0,75 kW berücksichtigen. ² Motoren > 0,75 kW						

Die Einsparpotenziale in den Sektoren Verkehr und Haushalte werden in den Motorstudien nicht berücksichtigt. In den Haushalten werden die erreichbaren Einsparpotenziale wegen der geringen Laufzeit und der geringen elektrischen Leistung der meisten Elektromotoren in diesem Sektor als sehr gering eingeschätzt und daher ausgeklammert. Nennenswerte wirtschaftliche Einsparpotenziale wurden erst ab Motorgrößen über 750 Watt identifiziert, die in den privaten Haushalten kaum vorkommen und wenn nur sehr geringe Laufzeiten aufweisen

Bei den Pumpenmotoren im Bereich bis 1 kW wurden mit technischen Neuentwicklungen deutliche Einsparpotenziale erschlossen. Mit der Verbesserung der bei Umwälzpumpen üblichen Motoren in Nassläuferausführung kann nach Kech u. Resch (2001) eine Wirkungsgradverbesserung um bis zu 100 % erreicht werden. Die größten Energieverbräuche durch Pumpenmotoren kleinerer Leistung entstehen in Heizungsumwälzpumpen, da diese im Vergleich zu anderen Anwendungen die längsten Laufzeiten aufweisen.

3.2 Information und Kommunikation

Der Energiebedarf für Information und Kommunikation wird für 1998 noch auf 1 bis 1,5 % des Endenergieverbrauchs geschätzt. Unstrittig ist auch, dass der Bedarf an Informations- und Kommunikationsdienstleistungen zunehmen wird. Die damit verbundenen Veränderungen des Strombedarfs sind nur schwer abzuschätzen, da sich die Technologien und auch die Anwendungen in diesem Bereich noch stark wandeln dürften. Beispielsweise ist immer noch damit zu rechnen, dass Computeranwendungen und Fernsehen im privaten Bereich zusammenwachsen werden. Nicht absehbar ist dagegen, welche Geräte dann eingesetzt werden und wodurch ihr Energieverbrauch bestimmt wird.

Der schnelle technologische Wandel im Bereich Information und Kommunikation bewirkte bisher, dass der Stromverbrauch nur in Sonderfällen, wie bei mobilen Anwendungen, ein Kriterium bei der Entwicklung neuer Geräte war. Wenn ausreichend Energie zur Verfügung stand, wurden allenfalls nachgeschaltete Verfahren zur Minderung des Stromverbrauchs eingesetzt, insbesondere um den Standby-Verbrauch zu senken. Das Hauptkriterium war bisher die Steigerung der Rechenleistung der Geräte. Die kontinuierliche Erhöhung der rechnerischen Leistungsdichte auf den Computerchips ließ die energetische Leistungsdichte ebenso ansteigen, so dass die Wärmeabfuhr von den großen Rechenprozessoren zu einer größeren technischen Herausforderung wird.

Die Leistungsfähigkeit vieler Informations- und Kommunikationssysteme ist inzwischen so groß, dass eine weitere Steigerung der primären Leistungsmerkmale nur noch bedingt als Differenzierungskriterium taugt. Daher ist zu erwarten, dass in Zukunft sekundäre Geräteeigenschaften wie der Energieverbrauch zum Bewertungskriterium werden und damit in der Entwicklung von vorneherein mehr berücksichtigt werden. Technische Restriktionen wie die Wärmeabfuhr tragen ebenso dazu bei, den Strombedarf zu reduzieren.

Huber und Mills (1999) errechneten für die USA, dass der Strombedarf des Internets 1998 rund 8 % des heimischen Stromverbrauchs ausmachte (290 TWh). Dies entspricht 1,2 % des Endenergieverbrauchs. Unter Einbeziehung der PCs in Haushalten wurde von Huber und Mills sogar ein Wert von 13 % des Elektrizitätsbedarfs (2,5 % des Endenergieverbrauchs) der USA errechnet. Fromm (2000) schätzt diese Werte als deutlich zu hoch ein und weist in einer Anhörung des Senatsausschuss für Wirtschaft der Vereinigten Staaten darauf hin, dass Huber und Mills in vielen Punkten den Stromverbrauch deutlich überbewertet haben. In der Studie von Kawamoto et al. (2001) wird der Strombedarf der Netzinfrastruktur des Internets und der Bürogeräte berechnet. Für das Jahr 1999 wurde ein Verbrauch von 74 TWh ermittelt, was rund 2 % des amerikanischen Stromverbrauchs entspricht. Kawamoto et al. haben abgeschätzt, dass sich der Stromverbrauch in diesen beiden Bereichen durch konsequente Nutzung von Power-Management Systemen der

Energieverbrauch um rund 23 % senken ließe und bei zusätzlicher konsequenter Nachtabschaltung nicht benötigter Geräte die Einsparungen 25 % erreichen würden.

Für Deutschland wurden von Barthel et al. (2001) Berechnungen für den Stromverbrauch des Internets durchgeführt, die von Barthel et al. als erster Ansatz zur Abschätzung des Bereichs bezeichnet werden, in dem der Energieverbrauch liegen könnte. In der Untersuchung wurde die Methodik von Kawamoto et al. (2001) übernommen. Die Verbrauchswerte von PCs wurden aus Dreier et al. (2000) entnommen. Für das Jahr 2000 wurde von Barthel et al. ein Gesamtverbrauch von 4,2 TWh für das Internet berechnet. Die Projektionen für das Jahr 2010 reichen von 13 TWh bis 35 TWh. Die für die Projektionen zugrunde liegenden Annahmen sind zumindest diskussionswürdig, so ist z. B. einerseits nicht davon auszugehen, dass der Stromverbrauch des Zentralprozessors von PCs konstant bleibt, wenn keine Trendänderung erfolgt. Andererseits ist bei Monitoren mit der verstärkten Nutzung von Flachbildschirmen eine Minderung des spezifischen Verbrauchs zu beobachten, die wahrscheinlich den Trend zu größeren Monitoren überkompensiert. Für belastbarere Aussagen sind in diesem Bereich weitere Forschungsarbeiten notwendig und werden z. B. am Fraunhofer ISI durchgeführt.

Während außer bei mobilen Geräten der Stromverbrauch noch kein Thema bei der Gesamtauslegung von Geräten der Informationstechnologie war, werden zunehmend Strategien diskutiert, die den Strombedarf bereits im Betrieb und nicht nur während der Benutzungspausen senken sollen (Angel, 2001). Es wird diskutiert, auch Rechner der Netzwerkinfrastruktur (Server, Router, Switches) so zu konfigurieren, dass sie sich automatisch in einen Ruhezustand fahren können und bei Bedarf in eigener Regie den Betrieb wieder aufnehmen. Eine weitere Strategie besteht darin, die Strukturen auf den Prozessoren weiter zu verkleinern und damit die Energieaufnahme zu senken. Angel (2001) berichtet von Bestrebungen beim Marktführer Intel, dass mit der Verkleinerung der Strukturen und der Wahl von Kupfer anstelle von Aluminium für die Leiterbahnen die Energieaufnahme einer CPU von 33 auf unter 0,5 Watt gesenkt werden soll. Bisher nur im mobilen Bereich eingesetzt sind Prozessoren, die ihre Taktfrequenz an die geforderte Arbeitsleistung anpassen und damit einen erheblich niedrigeren Energieverbrauch aufweisen. Mit Softwarelösungen sollen weitere Einsparmöglichkeiten erreicht werden. An der Northwestern University in den USA wird derzeit in einem Forschungsprogramm (Power Aware Architectural and Compilation Techniques) an Konzepten für die Computerarchitektur und an Compilern gearbeitet, mit denen die Einsparpotenziale neuer Prozessoren durch die Software voll genutzt werden können.

Die deutliche niedrigere Leistungsaufnahme von mobilen Geräten zeigt, dass der Energieverbrauch aller Informations- und Kommunikationsgeräte auf die Werte der mobilen Geräte gesenkt werden kann. Das technische Einsparpotenzial für den Energieverbrauch für Information- und Kommunikation ergibt sich damit aus den Einsparmöglichkeiten, die sich bei heutigen mobilen Geräten ergeben und aus der

Absenkung des Energieverbrauchs auch der stationären Geräte auf Werte dieser Größenordnung.

Netzinfrastuktur

Der Stromverbrauch durch die Netzinfrastuktur wird in der deutschen Literatur bisher fast nicht behandelt.

Schaefer und Weber (2000) geben den Strombedarf für die Mobilfunknetze in Deutschland mit 384 GWh (1,38 PJ) im Jahr 1998 an (405 bis 438 GWh (1,46 bis 1,58 PJ) für den gesamten Mobilfunk, d. h. einschließlich dem Strombedarf der Endgeräte der Nutzer). Für den gesamten Mobilfunk errechneten sie einen spezifischen Stromverbrauch von 25 kWh pro Nutzer. 1991 lag der spezifische Stromverbrauch pro Nutzer noch bei 65 kWh. Siemens berichtet, dass über eine verbesserte Lüfertechnologie der Stromverbrauch von Mobilfunk-Basisstationen um 35 % gesenkt werden konnte (Siemens AG, 2000).

Die zunehmende Integration der verschiedenen Informations- und Kommunikationsdienstleistungen wie Datenverarbeitung, Datenaustausch, Telefonie, Fernsehen sowohl beim Nutzer als auch in der Infrastruktur wird dazu führen, dass die Einsparpotenziale ähnliche Werte annehmen. Mit der Annahme, dass der Verbrauch stationärer Geräte auf die Höhe des Verbrauchs von mobilen Geräten gesenkt werden kann, ergibt sich folgendes Einsparpotenzial (vgl. Tabelle 3-2). Das wirtschaftliche Einsparpotenzial dürfte sich infolge des schnellen Generationenwechsels der Geräte und des schnellen technischen Fortschritts relativ schnell dem genannten technischen Potenzial nähern.

Tabelle 3-2: Einsparpotenziale bei IuK-Technologien

Technologie	Verbrauch 1998	technisches Einsparpotenzial (PJ)	Minderung CO₂-Emissionen (Mio. t.)	wirtschaftliches Einsparpotenzial (PJ)	Minderung CO₂-Emissionen (Mio. t.)
Information u. Kommunikation	129 PJ	64,5 PJ	11,3	bis 64,5 PJ	bis 11,3

3.3 Bereitschaftsschaltungen

Bereitschaftsschaltungen machen einen deutlichen Teil des Stromverbrauchs der Haushalte aus. In den anderen Verbrauchssektoren ist der Stromverbrauch durch Bereitschaftsschaltungen dagegen deutlich geringer. Böde et al. (2000) haben für den Leerlaufstromverbrauch in den Haushalten einen Wert von 60 PJ im Jahr 1997 ermittelt. Hochgerechnet auf das Jahr 1998 lag der Leerlaufstromverbrauch in den deutschen Haushalten bei 63,3 PJ. Für den Leerlaufstromverbrauch in den Verbrauchssektoren Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und Verkehr liegen mit der Studie von Rath et al. (1997) nur Daten für 1995 vor, nicht jedoch Prognosewerte für spätere Jahre, so dass eine Hochrechnung auf das Basisjahr 1998 im Rahmen dieser Arbeit nur mit ungenügender Genauigkeit durchgeführt werden kann.

Leerlaufverluste umfassen nach der Definition von Böde et al. (2000) den Stromverbrauch im Bereitschaftsbetrieb, bei dem das Gerät weniger Strom verbraucht als im Normalbetrieb, aber immer noch mindestens eine Funktion erfüllt, sowie den Verbrauch im Scheinaus-Zustand, bei dem das Gerät keine Funktion mehr erfüllt, ausgeschaltet scheint, aber immer noch Strom verbraucht. Der Bereitschaftsbetrieb lässt sich weiterhin in

- den Ready-Mode, bei dem der Energiebedarf kaum vermindert ist,
- den Standby-Mode, bei dem der Energiebedarf merklich vermindert ist und
- den Sleep-Mode, bei dem der Energiebedarf deutlich vermindert ist,

untergliedern. Der Ready-Mode tritt z. B. bei Audio-Geräten auf, die in die Pause-Funktion versetzt werden. Der Standby-Mode tritt vor allem auf, wenn Geräte über eine Fernbedienung ausgeschaltet werden und über sie auch wieder eingeschaltet werden können. Der Sleep-Mode existiert hauptsächlich bei mobil verwendbaren Geräten wie Laptops und wird verwendet, um den Stromverbrauch deutlich zu reduzieren und das Gerät zügig wieder betriebsbereit machen zu können. Der Scheinaus-Zustand ist für den Benutzer zunächst nicht zu erkennen, da das Gerät ausgeschaltet wird und keinerlei Funktion mehr erfüllt, also z. B. auch nicht mehr durch eine Fernbedienung schaltbar ist. Diese Konstruktionsweise wird häufig deshalb verwendet, weil ein Schalter, der auf der Niederspannungsseite des Trafos schaltet, kostengünstiger ist, als ein Schalter, der auf der Hochspannungsseite schaltet.

Große Einsparpotenziale ergeben sich vor allem beim Standby-Mode und beim Scheinaus-Zustand. In diesen Betriebsarten wird rund 95 % des Leerlaufstroms verbraucht. Scheinaus-Verbräuche lassen sich technisch einfach vermeiden, indem Geräte mit einem hochspannungsseitigen Schalter ausgestattet werden. Vorhandene Geräte können mittels einer schaltbaren Steckerleiste ganz ausgeschaltet werden. Unerlässlich für Maßnahmen durch die Nutzer ist es, den Scheinaus-Verbrauch

überhaupt zu erkennen. Auch für die Reduzierung der Standby-Verbräuche gibt es technische Maßnahmen wie z. B. die Verwendung von getakteten Netzteilen (Switch Mode Power Supply), mit denen die Leistungsaufnahme von Geräten im Standby-Mode auf Werte unter 0,5 Watt gesenkt werden kann. Allein mit diesen technischen Maßnahmen lassen sich die Leerlaufverluste in Haushalten um 52,7 PJ (entsprechend 83 %) reduzieren. Bei Bürogeräten wurden die technischen Einsparpotenziale aus den Studien von Rath et al. (1997) und Böde et al. (2000) auf 10,4 PJ abgeschätzt.

Das direkt umsetzbare wirtschaftliche Einsparpotenzial bei Bereitschaftsschaltungen ist gering einzuschätzen, da die vermiedenen Stromkosten in den allermeisten Fällen nicht die Anschaffung eines Neugeräts außerhalb des Investitionszyklus kompensieren. Bei vielen Elektrogeräten gibt es für die Hersteller keine ausreichenden Anreize, energieeffiziente Bereitschaftsschaltungen einzubauen, so dass für den Endnutzer vielfach keine Wahl zwischen herkömmlichen Geräten und solchen mit energieeffizienten Bereitschaftsschaltungen besteht, obwohl die eventuell anfallenden Mehrkosten durch die verminderten Stromkosten aufgewogen würden.

Tabelle 3-3: Potenziale bei Bereitschaftsschaltungen

Technologie	Verbrauch 1998	technisches Einsparpotenzial (PJ)	Minderung CO ₂ -Emissionen (Mio. t.)	wirtschaftliches Einsparpotenzial (PJ)	Minderung CO ₂ -Emissionen (Mio. t.)
Bereitschaftsschaltungen	86,8 PJ	63,1 PJ	11,0		

3.4 Beleuchtung

Die relativen Einsparpotenziale bei der Querschnittstechnologie Beleuchtung sind sehr groß. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass der gesamte Endenergieaufwand für Beleuchtung 1998 in Deutschland 188 PJ betrug, entsprechend 2 % des gesamten Endenergieverbrauchs. 176 PJ entfielen dabei auf den Energieträger Strom. Dies entspricht rund 10 % des Endenergieverbrauchs an Strom.

Die Nutzungsgrade bei der Beleuchtung liegen niedriger als bei allen anderen Nutzenergiearten und erreichten 1998 einen durchschnittlichen Wert von 7,8 %. Die geringen Nutzungsgrade erklären auch die hohen technischen Einsparpotenziale, da

schon mit der Verwendung vorhandener Lampen und Leuchten mit höheren Wirkungsgraden deutliche Effizienzsteigerungen erreicht werden können. Die wichtigsten Optionen liegen also im Einsatz effizienterer Beleuchtungssysteme, der Verwendung von Steuerungseinrichtungen, aus der verstärkten Nutzung von Tageslicht und weniger aus der verminderten Nachfrage nach der Energiedienstleistung Licht, also einer verminderten Lichtstärke.

Bei der Untersuchung der Einsparpotenziale im Bereich Beleuchtung lässt sich im Wesentlichen nach vier Typen von Lampen unterscheiden, die hauptsächlich verwendet werden:

- Glühlampen,
- Leuchtstofflampen,
- Kompaktleuchtstofflampen,
- Metalldampf- und Halogenlampen.

Daneben werden in Zukunft Leuchtdioden verstärkt eingesetzt werden und insbesondere Halogenlampen und Glühlampen substituieren. Craford et al. (2001) geben an, dass weiße Leuchtdioden mit ungefähr 20 Lumen/W heute bereits eine etwas höhere Effizienz aufweisen als Glühlampen, jedoch noch niedriger liegen als Halogenlampen. Mit farbigen Leuchtdioden wird dagegen bereits eine Lichtausbeute von bis zu 40 Lumen/Watt erreicht. Bei den Leuchtdiodenlampen kann erwartet werden, dass die Lichtausbeute bis auf das Vierfache von Halogenlampen gesteigert werden kann. Gegenüber Niederdruck-Metalldampflampen oder elektronisch gesteuerten Leuchtstofflampen wird sich damit keine wesentliche Einsparung erreichen lassen. Deutliche Einsparpotenziale liegen dagegen in der Substitution von Glühbirnen und Halogenlampen, da Leuchtdiodenlampen auch in Bereichen wie der Effektbeleuchtung eingesetzt werden können, wo Leuchtstofflampen und Metalldampflampen verwendet werden. Crawford et al. gehen jedoch davon aus, dass die verstärkte Substitution von herkömmlichen Beleuchtungstechnologien durch Leuchtdioden erst ab 2010 bis 2020 stattfinden wird. Die identifizierten Einsparpotenziale sind in Tabelle 3-4 aufgeführt.

Tabelle 3-4: Endenergieverbrauch und technische Einsparpotenziale bei der Beleuchtung

Lampentyp	Glühlampen	Leuchtstofflampen	Kompaktleuchtstofflampen	Metall-dampf- u. Halogenlampen	Summe für alle Lampentypen
Verbrauch Endenergie 1998	39,6 PJ	76,3 PJ	11,2 PJ	61,0 PJ	188,1 PJ
Einsparpotenzial durch technische Verbesserung der einzelnen Technologien	-	15,3 PJ	0,6 PJ	6,1 PJ	22,0 PJ
durch technische Verbesserung reduzierter Verbrauch	39,6 PJ	61 PJ	10,6 PJ	54,9 PJ	166,1 PJ
Einsparpotenzial durch Substitution der Glühlampen durch Kompaktleuchtstofflampen und von 50 % der Halogenlampen durch Leuchtdiodenlampen	33,3 PJ	-	-	14,4 PJ	47,7 PJ
durch Substitution reduzierter Verbrauch					118,4 PJ
Einsparpotenzial durch Tageslichtnutzung					23,7 PJ
Einsparpotenzial durch Steuerung und Regelung					47,4 PJ
weiteres Einsparpotenzial durch manuelles Schalten					4,8 PJ
Verbrauch unter Einbeziehung aller technischen Maßnahmen und Verhaltensmaßnahmen					43,0 PJ

Quelle: FhG-ISI

4 Optionen und Potenziale zur Minderung von Emissionen in privaten Haushalten

Der Endenergieverbrauch in privaten Haushalten wird vom Energiebedarf für die Raumwärme dominiert. Über drei Viertel der Endenergie werden nach Geiger u. Lindhorst (2000) für die Raumwärmeerzeugung aufgewendet. Dementsprechend liegen dort die größten absoluten Einsparpotenziale des Haushaltssektors. An zweiter Stelle liegt die Prozesswärme, die rund 14 % des Endenergieverbrauchs bewirkt. Mechanische Energie, Beleuchtung sowie Information und Kommunikation liegen alle jeweils unter 5 %.

4.1 Einsparoptionen und technische Potenziale

4.1.1 Warmwasser

Der Endenergieverbrauch aus fossilen Energieträgern und Strom für Warmwasser lag 1998 bei 255,6 PJ (errechnet aus Schlesinger et al., 1999). Die technischen Optionen bestehen vor allem in der Verwendung verbesserter Brennertechnik bei veralteten Geräten, insbesondere dem Einsatz von Brennwertkesseln, besserer Wärmedämmung der Speicher und einer Verminderung des Standby-Stromverbrauchs sowie des Strombedarfs der Steuerelektronik der Geräte.

Weitere gewichtige Einsparoptionen bestehen vor allem in Verhaltensmaßnahmen. Eine Verminderung des spezifischen Verbrauchs von derzeit rund 40 l/Tag und Person auf 10 l/Tag und Person ist nach Ansicht von Brohmann et al. (2000) möglich. Daraus würde sich eine Minderung des Endenergieverbrauchs um 57,6 PJ ergeben, wengleich hier verminderte Energiedienstleistungen neben technischen Maßnahmen (sparende Duschköpfe; Mischbatterien, die in Grundstellung reines Kaltwasser abgeben)

Insgesamt wurde das Einsparpotenzial für den Warmwasserverbrauch der Haushalte auf 35 % oder 89,5 PJ geschätzt; hiervon dürfte mehr als die Hälfte wirtschaftlich sein. Dies entspricht, auf den Energieverbrauch und die Energieträgerstruktur von 1998 bezogen, einer Minderung der CO₂-Emissionen um 8,0 Mio. t. bzw. 4 Mio. t. für das wirtschaftliche Potenzial. Weitere Emissionsminderungen können durch einen Energieträgerwechsel von elektrischem Strom zu Gas erreicht werden. Aufbauend auf die Daten aus Schlesinger et al. (1999) kann für 1998 ein Stromverbrauch von 53,2 PJ für die Warmwasserbereitung in privaten Haushalten errechnet werden (ohne Wärmepumpen). Unter Einbeziehung des geringeren Nutzungsgrades von gasbefeuerten Warmwasserbereitungsanlagen, der den End-

energieverbrauch an Gas zur Bereitstellung der gleichen Nutzenergiemenge erhöht und des geringeren Emissionsfaktors für Gas (201 g CO₂/kWh bei Gas gegenüber 631 g CO₂/kWh bei elektrischem Strom) ergibt sich ein theoretisches Minderungspotenzial für die CO₂-Emissionen um 5,5 Mio. t CO₂. Dieses Potenzial ist jedoch nicht in allen Fällen einfach zu erschließen, da nicht alle Haushalte über einen Erdgasanschluss verfügen. Außerdem wird elektrische Energie oft in Untertischgeräten eingesetzt, die nur eine Zapfstelle mit Warmwasser versorgen. In diesen Fällen ist ein Umstieg auf Erdgas nur mit einer kompletten Umgestaltung der Wasserversorgung in den betroffenen Wohneinheiten möglich.

4.1.2 Haushaltsgeräte aus dem Bereich Waschen und Geschirreinigen

Die durchschnittliche Energieeffizienz von Waschmaschinen und Wäschetrocknern und auch von Spülmaschinen kann weiter gesteigert werden. Die Einführung der Kennzeichnungspflicht bei den Haushaltsgeräten der sogenannten weißen Ware hat bereits zu einer Verbesserung der Verbraucherinformation geführt. Nach Schlomann et al. (2001) hat sich seit der Einführung der Energieverbrauchskennzeichnung der Anteil der verkauften Geräte aus hohen Effizienzklassen (A+B) kontinuierlich erhöht. Am höchsten lag der Anteil bei Waschmaschinen, am niedrigsten bei Wäschetrocknern. Allein die Umstellung auf heute als energieeffizient eingestufte Geräte würde deutliche Einsparungen des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bewirken.

Bei Haushaltsgeräten, die Wärme mittlerer Temperatur für den Betrieb benötigen - das sind hauptsächlich Waschmaschinen, Trockner und Geschirrspülmaschinen - sind deutliche Energieeinsparungen durch den Einsatz von Wärmepumpen möglich. Wärmepumpen in Haushaltsgeräten sind inzwischen als marktreife Technik anzusehen. Erste Geräte werden inzwischen angeboten. In BWK (2001) wird über einen Wäschetrockner berichtet, der mit einer Wärmepumpe betrieben wird und nach der Europeanorm EN 61121 nur noch einen spezifischen Energieverbrauch von 1,8 kWh/Trocknungsgang aufweist. Das sind rund 50 % weniger als bei üblicherweise verwendeten Trocknern. Eine Energieeinsparung von 40 bis 50 % bei diesen Geräten ist mit heutiger Technik erreichbar.

Waschmaschinen, Trockner und Geschirrspülmaschinen verbrauchten 1998 in deutschen Haushalten 51 PJ an elektrischem Strom. Das Einsparpotenzial für diese drei Gerätetypen wurde auf 24 PJ geschätzt. Davon ist heute etwa zwei Drittel bis drei Viertel wirtschaftlich. Durch die weitere Marktdurchdringung der Geräte und damit einher gehenden Groß-Serienfertigung dürfte das gesamte Potenzial bis 2010 wirtschaftlich werden. Dies bedeutet ein Minderungspotenzial für die CO₂-Emissionen um 4,2 Mio. t.

4.1.3 Kühl- und Gefriergeräte

Kühl- und Gefriergeräte in den deutschen Haushalten verbrauchten 1998 70,6 PJ Strom (errechnet aus Böde et al., 2000). Auch für diese Geräte existieren Energieverbrauchskennzeichen. Nach Schlomann et al. (2001) stieg wie bei den anderen Geräten der weißen Ware der Anteil der energieeffizienten Geräte (Energieeffizienzklasse A) in den vergangenen Jahren deutlich an. Allein mit der Durchdringung des Bestandes mit effizienteren Geräten wird der Strombedarf und die assoziierten Emissionen vermindert werden.

Technische Maßnahmen zur Verringerung des Strombedarfs liegen weiterhin vor allem in der Verbesserung der Dämmung der Geräte. Die in ihrem technischen Potenzial am erfolgversprechendste Option ist der Einsatz der Vakuumwärmedämmung bei Kühlgeräten. Mit dieser Technik lassen sich die Wärmedurchgangswerte noch weiter verringern, ohne das nutzbare Volumen der Geräte durch übergroße Wandstärken zu sehr zu vermindern. Allerdings sind Geräte mit Vakuumwärmedämmung immer noch nicht marktüblich. Insbesondere scheinen noch Vorbehalte gegenüber der Dauerhaftigkeit des Vakuums und der Isolierwirkung zu bestehen.

Diese technische Option, die schon von der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ identifiziert wurde (Enquête-Kommission, 1994), blieb bis heute also weitestgehend ungenutzt.

Allerdings haben sich die Durchschnittsverbräuche der Geräte seit Anfang der 90er Jahre dennoch reduziert. So geben Böde et al. (2000) einen Durchschnittsverbrauch des Bestandes bei Kühlschränken mit 262 kWh/a für 1997 an. Dies entspricht ungefähr dem Wert, der von der Enquête als Marktdurchschnitt genannt wurde (257 kWh/a) und bedeute bereits eine Reduktion um 20 % gegenüber dem Bestand von Anfang der 90er Jahre.

Neben der Verbesserung der Wärmedämmung sind auch noch Verbesserungen der Wärmepumpen und der Abstimmung des Gesamtsystems zu erwarten. Optionen zur Verbrauchsminderung durch Verhaltensänderungen wurden von Brohmann et al. (2000) identifiziert. Bei Kühlgeräten lässt sich die Effizienz vor allem durch regelmäßiges Abtauen und durch regelmäßiges Reinigen der Kondensatorkühlung steigern.

Die Einsparpotenziale aus verbesserter Technik und klimagerechtem Verhalten wurden auf rund 50 % des Stromverbrauchs geschätzt. Gemessen am Verbrauch aus dem Jahr 1998 würde dies eine Einsparung von 35 PJ und 6,1 Mio. t an damit assoziierten Emissionen an CO₂ bedeuten.

4.1.4 Kochen

Mit 59 PJ wurde auch 1998 der Großteil des Energieaufwandes für das Kochen mit Gas- und Elektroherden verursacht (nach Schlesinger et al., 1999). Davon sind 67 % den Elektroherden, 31 % den Gasherden und der Rest Holz- und Kohleherden zuzuordnen. Der Verbrauch der Mikrowellengeräte lag dagegen nur bei 3,6 PJ (errechnet aus Böde et al., 2000).

Bei Elektroherden ist vor allem noch durch eine verstärkte Anwendung von Induktionskochfeldern eine Steigerung der Energieeffizienz zu erreichen. Daneben sind auch Systeme denkbar, bei denen die Wärmeverluste der Kochtöpfe vermindert werden, indem diese selbst gedämmt werden oder Herde mit gedämmten Mulden ausgestattet werden, in die die Kochgeräte beim Kochen hineingestellt werden. Der in Schlesinger et al. (1999) offensichtliche Trend in der Vergangenheit zur Substitution von Gasherden durch Elektroherde wirkt sich ungünstig auf den Primärenergieverbrauch aus. Durch eine verstärkte Nutzung von Gasherden wäre zumindest eine Minderung des Primärenergieverbrauchs möglich und damit auch eine Minderung der CO₂-Emissionen.

Auf der Seite des Verhaltens bestehen viele Möglichkeiten, den Energieverbrauch beim Kochen bei allen Herdarten zu senken. In erster Linie stehen dabei Maßnahmen wie die konsequente Nutzung von Topfdeckeln, mit denen die Wärmeverluste erheblich reduziert werden und die verstärkte Verwendung von Schnellkochtöpfen. Außerdem kann die Restwärme beim Kochen und Backen verstärkt genutzt werden und auf das Vorheizen beim Backen verzichtet werden (Brohmann, 2000).

Für Elektroherde wurde das Einsparpotenzial aus den identifizierten Optionen auf 53 % des Endenergieverbrauchs geschätzt. Bezogen auf den Verbrauch von 1998 bedeutet dies 21 PJ entsprechend einer Minderung der CO₂-Emissionen um 3,7 Mio. t. Für Gasherde konnten keine technischen Optionen identifiziert werden. In Anlehnung an Brohmann et al. (2000) wurde geschätzt, dass durch Verhaltensmaßnahmen bei Gasherden eine Energieeinsparungen in der Höhe von 1,9 PJ erreicht werden können, entsprechend 0,4 Mio. t an CO₂-Emissionen.

Das Minderungspotenzial für CO₂-Emissionen, das sich aus der Substitution von Elektroherden heutiger Effizienz durch Gasherde ergibt, liegt bei 49 %. Dieser Wert errechnet sich aus den niedrigeren spezifischen Emissionen des Erdgases (201 g CO₂/kWh für Gas und 631 g CO₂/kWh für Strom) und den spezifischen Verbräuchen von Gasherden und Elektroherden pro Jahr (613 kWh/a pro Gasherd und 381 kWh/a pro Elektroherd, aus Schlesinger et al., 1999). Durch die Verwendung von Gasherden anstatt heutiger Elektroherde sind also Emissionsminderungen in ähnlicher Höhe zu erreichen wie durch die Umsetzung der Einsparttechnologien bei Elektroherden.

In der Literatur konnten keine technischen Einsparoptionen für den Betriebsverbrauch von Mikrowellenherden gefunden werden. Es kann aber mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass noch Effizienzpotenziale bei der Generierung der Mikrowellenstrahlung und bei der Programmführung der Geräte liegen. Sichere Potenziale liegen in der Reduktion des Standby-Verbrauchs (Böde et al., 2000). Insgesamt wurde bei den Mikrowellenherden ein Minderungspotenzial von 30 % geschätzt. Dies entspricht 1,1 PJ Strom oder 0,2 Mio. t CO₂.

Insgesamt hat dieser Energiedienstleistungsbereich aufgrund von veränderten Essgewohnheiten (Imbiss, Restauration) und der Verwendung von industriell vorgefertigten Speisen (Convenience Food) eine deutlich rückläufige Tendenz.

4.1.5 Mechanische Geräte

Der Energieverbrauch für mechanische Geräte wie Dunstabzugshauben, Werkzeuge oder Staubsauger lag 1998 bei 43,9 PJ (errechnet aus Böde et al., 2000). Mechanische Geräte im Haushalt haben in der Regel eine geringe Leistungsaufnahme. Dies gilt insbesondere für die Geräte mit langen Laufzeiten wie Ventilatoren oder Dunstabzugshauben. Staubsauger und Bohrmaschinen, die eine Leistungsaufnahme von bis zu über 1 kW aufweisen können, haben in der Regel eine sehr geringere Jahresnutzungsdauer von wenigen Stunden.

Die Energieeffizienz der im Haushaltsbereich eingesetzten Motoren ist aufgrund ihrer geringen Leistung und kurzen Nutzungsphasen nur sehr mäßig. In den Studien zu Elektromotoren werden in der Regel diese Größenklassen nicht betrachtet, da der Verbrauch dieser Motoren als gering angesehen wird (vgl. Almeida et al., 2000). Dennoch sollten mit der gleichen Technologie auch bei diesen Größen merkliche Einsparungen möglich sein.

Auch die Verbesserung der Endgeräte kann sich an den größeren Geräten aus Industrie und tertiärem Sektor orientieren. Die Effizienz von Ventilatoren und Pumpen (insbesondere Heizungsumwälzpumpen) kann z. B. durch optimiertes Design der Flügel und durch eine verbesserte Geometrie noch gesteigert werden.

Das Einsparpotenzial bei diesen Geräten wurde auf 25 % des Endenergieverbrauchs geschätzt. Das entspricht auf das Jahr 1998 bezogen 11 PJ oder 1,9 Mio. t CO₂-Emissionen.

4.1.6 Unterhaltungselektronik

Der Strombedarf für die Geräte der Unterhaltungselektronik wie Audiogeräte, Video- und Fernsehgeräte lag 1998 bei 58,3 PJ (errechnet aus Böde et al., 2000). Davon entfiel nur etwas mehr als ein Fünftel auf die Audiogeräte.

Eine sehr bedeutende Option zur Minderung des Strombedarfs bei dieser Geräteklasse ist die Minderung des Standby-Verbrauchs, der sich allein um 13,7 PJ vermindern ließe, wenn die Leistungsaufnahme im Leerlauf bei diesen Geräten auf einheitlich 0,5 Watt gesenkt würde (ebenfalls nach Böde et al., 2000).

Bei Fernsehgeräten ist mittelfristig zu erwarten, dass mit Flachbildschirmen ähnliche Einsparungen erreicht werden können, wie sie schon bei Computermonitoren erzielt werden. Derzeit werden Fernseher mit Flachbildschirm nur in übermäßigem Format als hochpreisige Geräte angeboten und weisen einen noch höheren Stromverbrauch auf als herkömmliche Röhrengeräte. Zukünftig ist jedoch zu erwarten, dass Fernseher mit Flachbildschirmen auch in den üblichen Gerätegrößen gebaut werden und der Energieverbrauch dieser Geräte zurückgehen wird.

Bei allen Geräten die zum Speichern, Abspielen und Verarbeiten von Ton- und Bilddaten genutzt werden wie Videorekorder, Satellitenempfangsgeräte, CD-Spieler kann der Strombedarf prinzipiell auf das Niveau von mobilen Geräten vermindert werden. Eine Ausnahme bilden dabei nur die Endverstärker von Tonsignalen, bei denen die Leistungsabgabe die Hauptaufgabe ist, die jedoch nur einen kleinen Teil des gesamten Strombedarfs dieser Gerätegruppe verursachen.

Insgesamt wurde das Einsparpotenzial bei den Geräten der Unterhaltungselektronik auf 50 % geschätzt. Bezogen auf das Jahr 1998 sind das rund 29 PJ, entsprechend einer Minderung der CO₂-Emissionen um 5,1 Mio. t.

4.2 Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzmaßnahmen im Haushaltssektor

Bei den Geräten der weißen Ware ist der Energiebedarf eine wichtige Produkteigenschaft, die durch die vorgeschriebene Kennzeichnung der Geräte noch hervorgehoben wird. Bei Kühlgeräten, die in der Regel in gleichartiger Weise im Dauerbetrieb genutzt werden, ist es möglich, die Energiekosten, die durch das Gerät anfallen, zu berechnen. Damit können auch die Mehrkosten von energieeffizienteren Geräten gegen die vermiedenen Energiekosten verrechnet werden. In der Regel ist bei der Neuanschaffung die Wahl eines energieeffizienten Kühlgerätes wirtschaftlich vorteilhaft.

Der Strombedarf der anderen Geräte der weißen Ware hängt sehr stark von der Nutzungsweise und der Nutzungshäufigkeit ab, so dass es kaum möglich ist, die jährlich anfallenden Energiekosten und die Wirtschaftlichkeit von energieeffizienten Geräten zu berechnen.

Bei der Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von energieeffizienten Geräten stellt sich außerdem das Problem, dass die effizienten Geräte in der Regel nur als hochwertige, gut ausgestattete Geräte angeboten werden, so dass die Mehrkosten nicht genau zugeordnet werden können. Schlomann et al. (2001) vermuten außerdem, dass die energieeffizienten Geräte, für die die Einstufung in eine gute Energieeffizienzklasse als Werbeargument genutzt werden kann, mit einer höheren Marge beaufschlagt werden, weil die Zielgruppe ihre Käufe nicht nur unter ökonomischen Gesichtspunkten tätigt, sondern auch unter Gesichtspunkten des Umwelt- und Sozialprestige. In vielen Fällen ist sogar festzustellen, dass sich der Mehrpreis eines Gerätes der Klasse A gegenüber einem Gerät der Klasse B nicht mehr durch die vermiedenen Energiekosten kompensieren lässt.

Bei Geräten der Unterhaltungselektronik oder mechanischen Geräten dagegen ist der Strombedarf kein Kriterium, das bei der Produktwahl beachtet wird, und fast nie für den Käufer erkennbar. Damit ist es bei diesen Geräten für den Käufer nicht möglich, energieeffiziente von ineffizienten Geräte zu unterscheiden. Auch in Zukunft ist bei vielen Gerätekategorien nicht zu erwarten, dass ohne Aufklärungsmaßnahmen von dritter Seite der Energieverbrauch erkennbar wird und spezielle energieeffiziente Geräte hergestellt werden. Energiepolitisch sinnvoller und effizienter wären europaweite technische Standards für diese Gerätegruppen.

Verhaltensmaßnahmen dagegen sind immer als wirtschaftlich vorteilhaft zu bewerten, da sie im Haushaltsbereich keine Kosten verursachen. Allerdings zeigt sich hier einmal mehr der unzulängliche ökonomische Bewertungsansatz, der im Grunde durch einen erweiterten Ansatz von Präferenzen von Verbrauchertypen ergänzt werden müsste, um realistische energiepolitische Empfehlungen erarbeiten zu können.

5 Optionen und Potenziale zur Emissionsminderung im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung konnten viele einzelnen Optionen zur Energieeinsparung identifiziert werden. Insbesondere die Detaillierungsstudie von Geiger et al. (1999) zeigte für viele Branchen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz auf. In der Studie von Böde et al. (2000) wurden Verhaltensmaßnahmen identifiziert und deren Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bestimmt. In der Regel war es jedoch nicht möglich, ein Einsparpotenzial für die gefundenen Optionen zu bestimmen, da keine Informationen über den von einzelnen Anwendungen verursachten Gesamtverbrauch in Deutschland gefunden werden konnten. Den größten Detaillierungsgrad weist die Studie von Geiger et al. (1999) auf, in der der Energieverbrauch der einzelnen Branchen nach Quellen und nach Nutzenergiearten differenziert wird. Die Daten in dieser Studie beziehen sich jedoch auf das Jahr 1994 und sind damit nur etwas eingeschränkt verwendbar. Neuere Quellen für den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sind nicht vorhanden.

5.1 Mechanische Anwendungen

Der Endenergieverbrauch für mechanische Anwendungen lag 1998 bei 314 PJ. Davon wurden 57 % mit elektrischer Energie und 43 % mit Kraftstoffen betrieben. Der Kraftstoffverbrauch, der dem Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen zugeordnet wird, fällt zum größten Teil in der Branche Landwirtschaft und beim Militär an. Die Detaillierungsstudie von Geiger et al. (1999) weist für diese beiden Verbrauchergruppen für das Jahr 1994 einen Kraftstoffverbrauch von 131,7 PJ aus. In der Energieverbrauchsbilanz von Geiger u. Heß (1996) für das Jahr 1994 wird für den ganzen Sektor ein Kraftstoffverbrauch von 152 PJ angegeben. Damit entfielen 1994 87 % des Verbrauchs an Kraftstoffen auf diese beiden Verbrauchergruppen. Der verbleibende Anteil kann nicht zugeordnet werden. Beachtet werden muss dabei, dass in vielen Branchen aus Gewerbe, Handel und Dienstleistungen hohe Kraftstoffverbräuche auftreten (z. B. Baugewerbe), die jedoch in der Bilanzierung dem Sektor Verkehr zugeordnet werden. Der Kraftstoffverbrauch in der Landwirtschaft dagegen resultiert hauptsächlich aus der Feldbearbeitung und wird daher nicht dem Verkehr zugeordnet.

Der Stromverbrauch für mechanische Anwendungen kann noch schlechter nachgewiesen werden. Geiger et al. (1999) ermittelten einen Stromverbrauch von 312 PJ im Jahr 1994, während Geiger u. Heß (1996) einen Wert von 370 PJ berechnet haben. Beim Stromverbrauch für mechanische Energie wird die Differenz noch deut-

lich größer. In der Detaillierungsstudie von 1999 ergibt die Summe der Branchen einen Wert von 84 PJ, während in der Endenergieverbrauchsübersicht von 1996 165 PJ genannt werden. Damit konnte aus dem bottom-up Ansatz über die Branchen nur 51 % des Stromverbrauchs für mechanische Energie zugeordnet werden, der aus dem top-down Ansatz der Endenergieverbrauchsübersicht ermittelt wurde.

5.1.1 Optionen und Potenziale

Bei allen Anlagen und Geräten sind in der Regel Effizienzsteigerungen durch regelmäßige Wartung und Pflege zu erreichen.

Anlagen zum Stofftransport: In erster Linie können hier Verbrauchsminderungen durch den Einsatz energieeffizienter und drehzahlgesteuerter Elektromotoren erreicht werden, die als Querschnittstechnologien behandelt werden. Wie im Sektor Industrie können bei Pumpen und Ventilatoren durch verbessertes Design Einsparungen in der Höhe von 3 bis 5 % des Endenergieverbrauchs erreicht werden. In der Studie von Geiger et al. (1999) werden Einsparpotenziale in der Größenordnung von 5 bis 15 % für Absauganlagen z. B. in Schreinereien genannt, wenn zentrale Absauganlagen mit Leistungsanpassung und Trennklappen ausgestattet werden, so dass nur bei Geräten im Betriebszustand Unterdruck anliegt. Nur für Einzelfälle nachweisbar sind Verbesserungen, die sich aus der Optimierung eines Gesamtsystems ergeben. Größere Potenziale liegen lediglich im Bereich von Heizungsumwälzpumpen.

Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen werden Anwendungen zur Stoffumformung und Stofftrennung nur sehr begrenzt vorgenommen. Eine Ausnahme bildet die Landwirtschaft, wo bedeutende Anteile des Kraftstoffverbrauchs für die Feldbearbeitung die als Stoffumformung (insbesondere das Pflügen) eingestuft werden kann. Bei der Feldbearbeitung kann durch die Integration mehrerer Arbeitsschritte der Energieaufwand deutlich gesenkt werden; durch den Einsatz von Feldbearbeitungsmaschinen sind Einsparungen bis zu 60 % möglich. Insgesamt wurde das Minderungspotenzial für den Energieverbrauch durch Stoffumformungen auf 18 % geschätzt.

Bei den Anwendungen Verdichten, Kühlen, Gefrieren konnten Einsparoptionen für Kühl- und Gefriergeräte gefunden werden (z. B. in Böde et al., 2000, oder Geiger et al., 1999). Für Kompressoren im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen konnten keine speziellen Optionen gefunden werden. Bei ihnen sind jedoch, genau wie bei den Anlagen im Sektor Industrie, Maßnahmen wie die Verbesserung der Wartung, Auswechseln von Filtern und regelmäßige Leckagekontrolle möglich. Nach Geiger et al. (1999) entfielen 1994 11 % des Stromverbrauchs auf Prozesskälte. Die größten Anteile wurden bei Fleischereien (48 %) und im Einzelhandel (24 %) beobachtet.

Optionen zur Minderung des Energieverbrauchs bestehen vor allem in der Abdeckung der Kühlmöbel im Einzelhandel. Selbst nachts werden Kühlmöbel häufig nicht abgedeckt. Tagsüber werden Abdeckungen wie z. B. Streifenvorhänge als verkaufshemmend abgelehnt. Auch ohne Abdeckungen lassen sich durch Geräte mit verbesserten mehrfachen Luftschleiern Einsparungen erzielen. Im Einzelhandel werden von Geiger et al. (1999) Einsparpotenziale bei der Kühlung auf 30-50 % geschätzt. In landwirtschaftlichen Betrieben kann durch die Nutzung der Kompressorwärme der Milchkühler zur Warmwassererzeugung eine Energieeinsparung von bis zu 20 % des Energieverbrauchs der Kühlung erreicht werden. Auch in Fleischereien sind solche Maßnahmen möglich. Das Einsparpotenzial bei Kühlgeräten wird von Böde et al. (2000) mit 20 bis 50 % angegeben.

Das aggregierte Einsparpotenzial für die mechanischen Anwendungen wurde auf 20 % geschätzt. Dies entspricht, bezogen auf das Jahr 1998, einer Verbrauchsminderung um 62,8 PJ, die eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 8,2 Mio. t bewirken würde.

5.2 Thermische Anwendungen

Auf thermische Anwendungen entfielen 1998 mit 369 PJ rund ein Viertel des Endenergieverbrauchs von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. Unter den einzelnen Branchen wies die Prozesswärme bei Wäschereien, Bäckereien, Fleischereien, Gartenbau und Gaststätten hohe Anteile am Endenergieverbrauch auf (Geiger et al., 1999).

Thermische Anwendungen hoher Temperatur (>200 °C) werden vor allem in Bäckereien angewendet. Hier existieren zahlreiche Optionen, den Energieverbrauch zu vermindern, die jedoch z. T. schon weitgehend umgesetzt sind. Durch den Einbau von Abgasklappen können die Abgasverluste vermieden werden. Mittels Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung sind Reduktionen des Energieverbrauchs von bis zu 30 % möglich. Auch bei Backöfen in Supermärkten und Backshops können noch Verbesserungen erzielt werden, z. B. durch eine bessere Dämmung der Ofentüren. Insgesamt wurde das Einsparpotenzial bei den thermischen Anwendungen mit hoher Temperatur auf 25 % geschätzt.

Bei den thermischen Anwendungen zwischen 50 °C und 200 °C wurden die Einsparpotenziale auf rund 15 % geschätzt. In diesen Temperaturbereich fallen Prozesse wie Waschen, Kochen, Trocknen oder Erwärmen. Auch hier sind vielfach noch Wärmerückgewinnungsmaßnahmen möglich. Bei Trocknern kann hierdurch eine Verbrauchsminderung von bis zu 30 % erreicht werden. Mit dem Einsatz von elektronischen Steuerungen und Luftfeuchtesensoren können Einsparungen von 10 % erreicht werden. In Fleischereien kann durch eine bessere Dämmung der

Brühkessel 5-10 % des Energieverbrauchs vermieden werden. Weitere Minderungen sind mit dem Einsatz von Gebläsebrennern anstatt von atmosphärischen Brennern möglich. Die Wärmerückgewinnung aus Waschwasser bei Wäschereien bietet zwar auch Einsparpotenziale, ist nach Aussagen von Geiger et al. (1999) häufig jedoch nicht wirtschaftlich. In chemischen Reinigungen sind kaum noch Einsparpotenziale vorhanden, da die Anlagen aufgrund der gestiegenen Anforderungen des Immissionsschutzes einen hohen Stand der Technik erreicht haben.

Zu Niedertemperaturanwendungen konnten keine gesonderten Optionen gefunden werden. Einzig die Dämmung von Baucontainern wurde von Geiger et al. (1999) in diesem Bereich aufgeführt, die streng genommen in den Raumwärmebereich fällt. Hier sind noch Einsparpotenziale von 50 % vorhanden (Geiger et al., 1999). Insgesamt wurde für Niedertemperaturanwendungen ein Einsparpotenzial von 20 % geschätzt.

Das Einsparpotenzial für alle thermischen Anwendungen wurde auf 22 % des Endenergieverbrauchs geschätzt, entsprechend 81,1 PJ. Dabei konnte keine Unterscheidung nach dem eingesetzten Energieträger gemacht werden. Zur Berechnung des Minderungspotenzials für die CO₂-Emissionen wurde daher auf die Detaillierung des Energieverbrauchs von Geiger u. Lindhorst (2000) zurückgegriffen. Unter dieser Annahme bewirkt die Verringerung des Energieverbrauchs um 81,1 PJ eine Minderung der CO₂-Emissionen um 7,9 Mio. t.

6 Optionen und Potenziale zur Emissionsminderung im Sektor Industrie

In der Industrie sind vielfältige Optionen zur Minderung des Energieverbrauchs und zur Minderung von Treibhausgasen dokumentiert. Die homogene Struktur vieler Branchen und die erheblich bessere Dokumentation technischer Optionen ermöglichen es hier eher als im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Optionen für bestimmte Technologien auszuweisen und Minderungspotenziale zu quantifizieren.

6.1 Elektrotechnologien

Im Bereich der Elektrotechnologien konnten neben Elektrostahl, der bei den thermischen Anwendungen behandelt wird, Optionen im Bereich der Aluminiumherstellung und bei der Chlorherstellung quantifiziert werden.

6.1.1 Herstellung von Primäraluminium

Für die Herstellung von Primäraluminium wurden 1998 in Deutschland 33 PJ an elektrischem Strom aufgewendet (errechnet aus IPTS, 2000a und World Bureau of Metal Statistics, 2000). Der größte Teil des Energieaufwandes bei der Herstellung von Primäraluminium entsteht bei der elektrolytischen Reduktion von Aluminiumoxid in einer Lösung aus geschmolzenem Kryolith. Der spezifische Aufwand an elektrischer Energie bei der Elektrolyse ist stark abhängig vom eingesetzten Verfahren. Die besten derzeit eingesetzten Verfahren benötigen rund 45 GJ/t, während im Durchschnitt ungefähr 54 GJ/t aufgewendet werden. Das theoretische Minimum liegt bei 23 GJ/t (de Beer et al., 1994). Für den gesamten Prozess wird in IPTS (2000a) eine Bandbreite von 50,4 GJ/t bis 59,4 GJ/t an Strom für die Aluminiumherstellung und 8 GJ/t bis 13,5 GJ/t für die Aufbereitung des Aluminiumoxids angegeben.

Die Optionen zur Verbesserung der Elektrolyseverfahren liegen bei existierenden Anlagen in einer weiter verbesserten Prozesssteuerung, Zugabe der Tonerde über moderne Zugabesysteme (point feeder), Umstellung von nassen auf trockene Anoden beim Soderberg-Verfahren, Verbesserung der Anodengeometrie, der Sammelschiene und der Badzusammensetzung. Die Einsparpotenziale bei der Optimierung bestehender Anlagen sind jedoch begrenzt. De Beer und Phylipsen (2000) gehen davon aus, dass sich in der EU bei nur rund ein Drittel der bestehenden Anlagen noch signifikante Verbesserungsmöglichkeiten in der Größenordnung von

3 GJ/t, d. h. etwa 1,5 %, bestehen. Das liegt nicht zuletzt daran, dass völlig neue Anlagen mit deutlich vermindertem Strombedarf lediglich in Norwegen und Island, d. h. europäischen Ländern mit relativ niedrigen Strompreisen, zu erwarten sind, während in Westeuropa langfristig mit einer Stilllegung von Primäraluminium-Produktionsanlagen gerechnet werden muss.

Bei der Errichtung neuer Anlagen können durch verbessertes Design der Zellen, verbesserte Anodenqualität, Prozessmodellierung und Prozessüberwachung mit Hilfe von Sensoren deutliche Minderungen des spezifischen Stromverbrauchs von bis zu 9 GJ/t erreicht werden.

Langfristig vielversprechende Optionen zur Einsparung an elektrischem Strom liegen im Einsatz von stabilen Anoden und benetzbaren Kathoden. Bisher werden Kohlenstoffanoden verwendet, die im Lauf des Elektrolyseprozesses oxidiert werden und kontinuierlich erneuert werden müssen. Laut de Beer u. Phylipsen (2000) sind stabile Anoden noch nicht kommerziell verfügbar, werden jedoch bereits in Pilotanlagen getestet. Benetzbare Kathoden werden ebenfalls aus inerten Materialien hergestellt und ermöglichen eine räumlich engere Anordnung von Anode und Kathode. Durch den Einsatz von benetzbaren Kathoden ist eine Verminderung des spezifischen Stromverbrauchs um 1,5 GJ/t zu erwarten. Insgesamt liegt das aggregierte spezifische Einsparpotenzial bei 12,6 GJ/t.

Die Kosten für die Umrüstung einer Anlage mit benetzbaren Kathoden werden von de Beer u. Phylipsen (2000) auf 550 €/GJ eingespartem Strom geschätzt. Bei Stromkosten in der Aluminium-Industrie um 0,02 €/kWh ist eine Umrüstung der Anlagen außerhalb des Investitionszyklus nicht wirtschaftlich. Das bei bestehenden Anlagen wirtschaftliche Einsparpotenzial wurde auf rund 5 % geschätzt.

Tabelle 6-1: Einsparpotenzial bei der Herstellung von Primäraluminium

Prozess	Herstellung von Primäraluminium durch Elektrolyse	
Endenergieverbrauch 1998	33 PJ elektrischer Strom	
spezifischer Energieaufwand	54 GJ/t	
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessmodellierung und sensorische Prozessüberwachung • Verbesserte Anodenqualität • Verbesserung des Zellendesigns • Einsatz von inerten Anoden und benetzbaren Kathoden 	
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	41,4 GJ/t	
technisches Einsparpotenzial bez. auf 1998	24 %	7,7 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial (geschätzt)	8-10 %	2,6-3,3 PJ
Minderung der CO ₂ -Emissionen	technisch:	1,3 Mio. t
	wirtschaftlich:	0,5-0,6 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

6.1.2 Chlor-Alkali-Elektrolyse

Tabelle 6-2: Endenergieverbrauch für die verschiedenen Verfahren der Chlorherstellung 1998

Verfahren	Energieverbrauch				Anteil an der Produktion
	Strom		Dampf		
	absolut in PJ	spezifisch in GJ/t	absolut in PJ	spezifisch in GJ/t	
Amalgamverfahren	17,3	12,2	-	-	41 %
Diaphragmaverfahren	11,9	10,1	3,4	2,9	34 %
Membranverfahren	6,1	8,9	0,4	0,7	20 %

Quelle: FhG-ISI

Für die Chlorherstellung wurden 1998 in Deutschland 36,6 PJ an elektrischer Energie und 3,9 PJ an Dampf aufgewendet. Die größte Verwendung finden immer noch das Amalgamverfahren und das Diaphragmaverfahren, während bisher nur ein Fünftel der Produktion im Membranverfahren durchgeführt wird.

Beim Amalgamverfahren und beim Diaphragmaverfahren sind nur noch geringe Verbesserungen der Prozesse zu erwarten. Die Optionen zur Minderung der Treibhausgasemissionen liegen vor allem in der Verbesserung der Prozesskontrolle, Verbesserung der Gleichrichter, Verbesserung der Zellengeometrie und der Elektroden beim Diaphragmaverfahren (Vorkathode, IPTS, 2000b). Insgesamt werden bei diesen Verfahren Einsparungen von 4 % der elektrischen Energie für möglich gehalten.

Die größten Potenziale zur Emissionsminderung ergeben sich aus der Substitution der Anlagen nach dem Amalgam- und dem Diaphragmaverfahren durch Anlagen nach dem Membranverfahren. Die Umstellung vom Amalgamverfahren auf das Membranverfahren bewirkt nach IPTS (2000b) eine Minderung des Energieverbrauchs um 15 % und kann beim Austausch einer alten Amalgamanlage durch eine Anlage mit dem Membranprozess nach neuester Technologie bis zu 30 % weniger Stromverbrauch bedeuten.

Beim Membranverfahren selbst bestehen auch noch deutliche Verbesserungspotenziale. Durch eine weitere Optimierung der Membrane wird eine Verminderung des spezifischen Stromverbrauchs um 15 % möglich sein. Die Entwicklung und Anwendung von Sauerstoffverzehr-Kathoden, bei denen nicht mehr Wasserstoff entsteht, sondern Sauerstoff reduziert wird, wird langfristig nochmals Verminderungen des spezifischen Stromverbrauchs von 25 % ermöglichen. Die Verwendung von Sauerstoffverzehrkathoden ist nur in eigens dafür gebauten Anlagen möglich. Die technischen Einsparpotenziale sind in Tabelle 6-3 aufgeführt.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Investitionen geben de Beer u. Philipsen (2000) an, dass die Kosten für die Umstellung auf das Membranverfahren rund € 650/GJ eingesparter Energie und Jahr betragen, wenn die gesamten Investitionskosten miteinberechnet werden. Gemessen an den Stromkosten, die in der Größenordnung von €0,03/kWh (bzw. €8,3/GJ) liegen, besteht kein wirtschaftliches Potenzial zur Umstellung der Verfahren. Die Umstellung auf das Membranverfahren wird also nur im Rahmen der Investitionszyklen stattfinden, wenn Anlagen mit dem Amalgamverfahren oder dem Diaphragmaverfahren das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben.

Tabelle 6-3: Optionen und Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bei der Chlor-Alkali Elektrolyse

Prozess	Chlor-Alkali Elektrolyse
Endenergieverbrauch 1998	36 PJ elektrischer Strom
Minderungsoptionen	
Amalgamverfahren	Prozessoptimierung 4 %
Diaphragmaverfahren	Prozesssubstitution durch optimiertes Membranverfahren 56%
Membranverfahren	Prozessoptimierung, Elektrodendesign 4 %
	Prozess-Substitution durch optimiertes Membranverfahren 47 %
	verbesserte Membran 15 %
	Sauerstoffverzehrkathode 25 %
Aggregiertes technisches Einsparpotenzial	52 % bezogen auf 1998: 18,9 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	6-10 % bezogen auf 1998: 2,2-3,6 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 3,3 Mio. t wirtschaftlich: 0,4-0,6 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

6.2 Mechanische Anwendungen

In der Industrie werden die allermeisten mechanischen Anwendungen über Elektromotoren angetrieben. So wurde nach Geiger u. Lindhorst (2000) 457 PJ an Strom für mechanische Energie aufgewendet. Das entspricht 97 % des Endenergieverbrauchs für mechanische Energie. Aus diesem Grund sind die als Querschnittstechnologie behandelten elektrischen Antriebe einer der wichtigsten Ansatzpunkte zur Erhöhung der Energieeffizienz bei mechanischen Anwendungen in der Industrie. Darüber hinaus existieren bei den Endgeräten wie Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren und bei den Systemen, in die sie integriert sind, von den Motoren unabhängige Optionen mit signifikanten Einsparpotenzialen.

6.2.1 Druckluft

Für Kompressoren wurden in Deutschland 1998 rund 63 PJ an elektrischer Energie aufgewendet. Über die Verbesserung der Antriebe hinaus gibt es vielfältige Optio-

nen, die Energieeffizienz von Druckluftsystemen zu erhöhen. Radgen u. Blaustein (2001) nennen einen ganzen Katalog möglicher Maßnahmen:

- Optimierung der Endgeräte: In vielen Fällen bestehen beträchtliche Einsparpotenziale durch den Einsatz effizienter druckluftbetriebener Endgeräte. Bei Trocknungs- und Blaseanwendungen können in vielen Fällen Ventilatoren die vorhandenen Druckluftsysteme ersetzen. Weitere Optionen bestehen im Ersatz von Druckluftanwendungen durch hydraulische oder elektrisch betriebene Geräte.
- Verbesserung der Kompressoren: Die Energieeffizienz vieler Anlagen kann durch die Auswahl eines auf die Anforderungen der Nutzer optimal abgestimmten Kompressors deutlich gesteigert werden.
- Verwendung fortgeschrittener Steuerungssysteme: Mit dem Einsatz von moderner Steuerungstechnologie lassen sich Druckluftbereitstellung und -abnahme besser aufeinander einstellen. Die Übergänge zwischen den Betriebszuständen des Kompressors können optimiert werden. Die Abstimmung bei Systemen mit mehreren Kompressoren und mehreren Endgeräten lässt sich deutlich verbessern.
- Einstellung der Druckluftqualität: Die Druckluft muss je nach Anwendung getrocknet und gefiltert werden, insbesondere um Öle und Staub zu entfernen. Durch eine bedarfsgerechte und optimierte Behandlung der Druckluft kann der Energieaufwand gesenkt werden.
- Abwärmenutzung: Bei der Erzeugung von Druckluft erzeugen Kompressoren zwangsläufig Wärme, die nicht selten einer weiteren Nutzung zugeführt werden kann. Für eine effiziente Nutzung ist ein Wärmeabnehmer erforderlich, dessen Lastcharakteristik der Verfügbarkeit der vom Kompressor bereitgestellten Wärme entspricht. Häufig kann die Abwärme der Kompressoren zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt werden, wenn ein Abnehmer in vertretbarer räumlicher Nähe vorhanden ist.
- Verbesserung der Wartung: Insbesondere belegte Filter bewirken einen deutlichen Mehrverbrauch an Energie. Eine Überprüfung der Filter bei den Wartungen der Kompressoren und der bedarfsgerechte Wechsel von Filtern erhöht die Effizienz des Systems.
- Auslegung des Gesamtsystems: Das Hauptziel beim Systementwurf liegt darin, mit der bereitgestellten Menge, dem Druck und der Qualität der Druckluft die Anforderungen der unterschiedlichen Endgeräte zu erfüllen. Bei mehreren Abnehmern kann dies eine sehr komplexe Aufgabe sein, die häufig dadurch gelöst wird, dass das Gesamtsystem auf die Anforderungen des Endgeräts ausgelegt wird, das die höchsten Ansprüche an Druck und Qualität aufweist. Wenn nur ein geringer Mengenanteil der Druckluft diesen Anforderungen gerecht werden muss, bedeutet dies eine substantielle Energieverschwendung. Eine verbesserte Auslegung des Gesamtsystems, eventuell die Aufteilung auf mehrere Teilsysteme, bewirkt in solchen Fällen eine signifikante Energieeinsparung.

- Verminderung der Reibungsverluste im Druckluftnetz: Der Druckabfall in einem Druckluftnetz kann durch Anpassung der Netzstruktur, Geometrie und Auswahl der Rohre in vielen Fällen noch gesenkt werden.
- Erhöhung der Dichtigkeit: Die Beseitigung von Leckagen ist eine der wichtigsten Optionen zur Minderung des Energieverbrauchs bei Druckluftanlagen. Die Verluste durch Leckagen sind immer noch beträchtlich. Durch regelmäßige Prüfung der Anlagen und Netze lassen sich bedeutende Energieeinsparungen erreichen.

Die Mehrzahl der identifizierten Optionen zur Energieeinsparung beruhen nicht auf einzelnen technischen Maßnahmen, sondern auf einer verbesserten Planung, Nutzung und Instandhaltung der Druckluftanlagen.

Tabelle 6-4: Optionen und Potenziale zur Energieeinsparung in Druckluftanlagen

Prozess	Druckluftbereitstellung	
Endenergieverbrauch 1998	63 PJ elektrischer Strom	
Minderungsoptionen	Optimierung der Engeräte	40 %
	Verbesserung der Kompressoren	7 %
	Verwendung fortgeschrittener Steuerungssysteme	12 %
	Einstellung der Druckluftqualität	5 %
	Abwärmenutzung	20 %
	Verbesserung der Wartung	2 %
	Auslegung des Gesamtsystems	9 %
	Verminderung der Reibungsverluste	3 %
	Erhöhung der Dichtigkeit	20 %
	Aggregiertes technisches Einsparpotenzial	bezogen auf 1998:
wirtschaftliches Einsparpotenzial	bezogen auf 1998:	30-35 % 19-22 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch:	5,3 Mio. t
	wirtschaftlich:	3,3-3,9 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

6.2.2 Pumpen und Ventilatoren

Pumpen und Ventilatoren standen 1998 mit 175,7 PJ für rund ein Viertel des industriellen Stromverbrauchs. Große Einsparmöglichkeiten werden im Einsatz von drehzahlgesteuerten Motoren gesehen, die als Querschnittstechnologie bearbeitet werden. Darüber hinaus bestehen in vielen Fällen weitere Optionen zur Minderung des Energieverbrauchs bei Pumpen und Ventilatoren:

- Angemessene Dimensionierung: In vielen Fällen entstehen hohe Verluste durch den Einsatz von überdimensionierten Motoren, die im Teillastbetrieb mit schlechten Wirkungsgraden gefahren werden. Muller et al. (1995) geben an, dass häufig überdimensionierte Pumpen und Ventilatoren eingesetzt werden, um spätere Kapazitätserhöhungen beherrschen zu können.
- Verbesserte Wartung von Pumpen und Ventilatoren.
- Verbessertes Design von Pumpen und die Auswahl eines für die Anwendung angepassten Pumpentyps. Reduzierung der Oberflächenrauigkeit und der internen Lecks bei Pumpen.
- Verbessertes Design von Ventilatoren und Auswahl eines für die Anwendung angepassten Ventilortyps. Insbesondere bestehen vielfach noch Verbesserungsmöglichkeiten in der Flügelgeometrie.

Tabelle 6-5: Optionen und Potenziale zur Energieeinsparung bei Pumpen und Ventilatoren

Prozess	Pumpen, Luftbewegen	
Endenergieverbrauch 1998	175,7 PJ	
Minderungsoptionen	Verbesserung der Systemleistung	20 %
	Verbesserung des Design	10 %
Aggregiertes technisches Einsparpotenzial	25 %	
	bezogen auf 1998:	43,9 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	12-15 %	
	bezogen auf 1998:	21-26 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch:	7,7 Mio. t
	wirtschaftlich:	3,7-4,5 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

6.2.3 Mahltechnologien

In der Zementindustrie bestehen neben den Emissionsminderungsoptionen und Energieeinsparpotenzialen in der Klinkerherstellung noch z. T. deutliche Potenziale zur Energieeinsparung im Einsatz fortgeschrittener Mahltechnologie. In der klassischen Mahltechnik werden unter 5 % der eingesetzten Energie tatsächlich zur Spaltung des Materials und Erzeugung neuer Oberfläche umgesetzt (Worrell et al., 1997).

Durch den Einsatz von modernen Gutbettmühlen lässt sich der Endenergieverbrauchs gegenüber herkömmlichen Mahlverfahren um 25 bis 40 % reduzieren.

6.3 Thermische Anwendungen

Prozesswärme ist die wichtigste Form der Nutzenergie in der Industrie. Mit 1612 PJ gingen 1998 rund zwei Drittel des industriellen Endenergieverbrauchs auf thermischen Anwendungen zurück. Viele energieintensive Prozesse fallen in diesen Bereich und wurden nach Verbesserungsmöglichkeiten untersucht.

Bei den thermischen Anwendungen wird der Hauptteil des Energieaufwands durch die Ofen- und Trocknerprozesse verursacht.

6.3.1 Ofenprozesse - Anwendungen über 500 °C

Roheisenerzeugung im Hochofen

Tabelle 6-6: Minderungsoptionen und Potenziale beim Hochofenprozess

Prozess	Roheisenerzeugung im Hochofenprozess
Endenergieverbrauch 1998	338,9 PJ
spezifischer Energieaufwand	11,3 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verminderung des Reduktionsmittelbedarfs durch fortgeschrittene Ofentechnologie • Direkteinblasen von Kohlestaub • Reduzierung von Kühl- und Abstrahlungsverlusten • Wärmerückgewinnung aus der Hochofenschlacke • Einsatz von Gichtgasentspannungsturbinen zur Stromerzeugung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	10,7 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	5 % bezogen auf 1998: 16,9 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	1-2 % bezogen auf 1998: 3,4-6,8 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen ¹	technisch: 1,7 Mio. t wirtschaftlich: 0,4-0,7 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Das direkte Einblasen von Kohlestaub in den Hochofen ermöglicht es, teilweise auf den Einsatz von Koks zu verzichten, der mit einem Energieaufwand von rund 3,5 GJ/t Koks hergestellt werden muss. Pro Tonne Roheisen lassen sich durch dies Maßnahme 0,5 GJ/t an Energie einsparen. Allerdings ist das Verfahren nicht bei allen Hochofentypen und allen Erzsorten anwendbar. Es wird geschätzt, dass die maximale Durchdringung der Technik bei 75 % liegt (de Beer u. Phylipsen, 2000). Die durchschnittlichen Kosten für die notwendigen Investitionen in Kohlemühlen werden auf 10 bis 11 €/GJ jährlicher Energieeinsparung geschätzt. Zusätzliche Betriebskosten ergeben sich aus der Einblasung von Sauerstoff und dem Betrieb der

¹ Zur Berechnung der Emissionsminderung wurde angenommen, dass mit den Maßnahmen der Verbrauch an Steinkohlenkoks vermindert wird. Die tatsächlich möglichen Einsparungen hängen vom eingesetzten Brennstoffgemisch ab.

Kohlemühle. Dem stehen jedoch verminderte Kosten im Betrieb der Kokerei gegenüber. Außerdem können zur Direkteinblasung billigere Kohlesorten als zur Koksherstellung verwendet werden. Die finanziellen Einsparungen liegen bei 1 €/GJ eingesparter Energie. Unter den angenommenen Durchschnittskosten ist diese Maßnahme erst nach zwölf Jahren abgeschrieben und erfüllt damit nicht die Wirtschaftlichkeitskriterien der Industrie.

Herstellung von Elektrostahl

Tabelle 6-7: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Elektrostahl

Prozess	Schmelzen
Endenergieverbrauch 1998	27,8 PJ
spezifischer Energieaufwand	0,6 GJ/t Brennstoffe 1,8 GJ/t Strom
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Prozesssteuerung • Verstärkte Nutzung der Gleichstromtechnik • Schrottvorwärmung nach dem NIKKO-Verfahren • Wärmerückgewinnung aus der Schlacke
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	0,5 GJ/t Brennstoffe 1,4 GJ/t Strom t
technisches Einsparpotenzial	20 % bezogen auf 1998: 5,8 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	5-10 % bezogen auf 1998: 1,4-2,8 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,8-0,9 Mio. t wirtschaftlich: 0,2-0,5 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Worrell et al. (1999) geben zusätzliche Investitionskosten in der Höhe von 50 €/GJ jährlich eingesparter Energie für die Schrottvorwärmung bei der Elektrostahlherstellung an, die jedoch durch eine Steigerung der Produktivität zum Teil kompensiert werden. Verminderte Kosten für Elektroden und eine höhere Ausbeute können mit 19 €/GJ jährlich eingesparter Energie gutgeschrieben werden. Bei gutzuschreibenden Stromkosten in der Höhe von 3 €/Cents/kWh wäre die Umrüstung innerhalb von vier bis fünf Jahren abgeschrieben. Worrell et al. (1999) berichten allerdings auch, dass häufig Platzprobleme bestehen, die eine einfache Umrüstung verhindern und zu deutlich höheren Investitionskosten führen können.

Herstellung von Oxygen-Stahl

Bei der Herstellung von Oxygen-Stahl werden ungewünscht Verunreinigungen aus dem Roheisen durch Oxidation entfernt. Dies sind insbesondere Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel. Das entstehende Konvertergas enthält Kohlenmonoxid, das energetisch weiter genutzt werden kann. Mit dem Brutto-Energieverbrauch wird die Energiemenge bezeichnet, die dem Prozess zugeführt werden muss ohne den Energieinhalt des freiwerdenden Konvertergases zu berücksichtigen. Als Netto-Energieverbrauch wird das Saldo aus zugeführter Energie und mit dem Konvertergas freigesetzter Energie angegeben. Ein negativer Netto-Energieverbrauch zeigt an, dass der Gesamtprozess exotherm verläuft also Energie freisetzt.

Tabelle 6-8: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Oxygen-Stahl

Prozess	Früheren
Endenergieverbrauch 1998	netto: -9,7 PJ brutto: 10,6 PJ
spezifischer Energieaufwand	netto: -0,30 GJ/t brutto: 0,33 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterer Ausbau der Nutzung des Konvertergases • Wärmerückgewinnung aus der Stahlwerksschlacke
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	netto: -0,52 GJ/t brutto: 0,30 GJ/t
Einsparpotenzial bez. auf 1998	netto: 7,0 PJ (Mehrgewinn an Energie aus dem Konvertergas) brutto: 1,0 PJ

Quelle: FhG-ISI

Walzstahlerzeugung im Warmwalzverfahren

Tabelle 6-9: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Walzstahl

Prozesse	Erwärmen, Glühen
Endenergieverbrauch 1998	40,4 PJ
spezifischer Energieaufwand	1,39 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Warm- und Direktansatz der Brammen nach dem Gießen • Weitere Optimierung der Prozesssteuerung • Endabmessungsnahes Dünnbandgießen • Wärmerückgewinnung mittels Brammenkühlkesseln, wo der Warmansatz der Brammen nicht möglich ist.
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	0,93 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">33 %</div> bezogen auf 1998: <div style="text-align: right;">13,4 PJ</div>
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">5-8 %</div> bezogen auf 1998: <div style="text-align: right;">2,0-3,2 PJ</div>
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: <div style="text-align: right;">0,7-1,3 Mio. t</div> wirtschaftlich: <div style="text-align: right;">0,1-0,2 Mio. t</div>

Quelle: FhG-ISI

Sintern von Erzen

Zur Herstellung optimaler Stückgrößen der im Verhüttungsprozess eingesetzten Erze werden die Fraktionen mit zu kleiner Stückgröße unter Wärmeeinsatz durch Sintern zusammengebacken.

Die durchschnittlichen Investitionskosten für die Wärmerückgewinnung in Sinteranlagen werden von de Beer und Phylipsen (2000) mit 5,5 €/GJ jährlicher Energieeinsparung angegeben. Bei einem Betrieb mit Koksgruß kann die Maßnahme durch die eingesparten Brennstoffkosten innerhalb von 4 bis 5 Jahren abgeschrieben werden.

Tabelle 6-10: Minderungsoptionen und Potenziale beim Sinterprozess

Prozess	Sinterprozess, Vorbereitung von Erzen
Endenergieverbrauch 1998	41,9 PJ
spezifischer Energieaufwand	1,5 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Vorerwärmung der Brennluft • Wärmebehandlung der Einsatzstoffe mittels Abwärme aus den Sinterkühlern • Verbesserte Beschickung und Zündung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	1,3 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">12 %</div> bezogen auf 1998: <div style="text-align: right;">5 PJ</div>
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">7 %</div> bezogen auf 1998: <div style="text-align: right;">2,9 PJ</div>
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen ²	technisch: <div style="text-align: right;">0,5 Mio. t</div> wirtschaftlich: <div style="text-align: right;">0,3 Mio. t</div>

Quelle: FhG-ISI

² Die CO₂-Emissionen wurden unter der Annahme berechnet, dass durch die Effizienzsteigerungen Steinkohlenkoks eingespart wird.

Eisen- und Stahlgießereien

Tabelle 6-11: Minderungsoptionen und Potenziale bei Eisen- und Stahlgießereien

Prozesse	Erwärmen, Schmelzen, Überhitzen, Wärmebehandeln
Endenergieverbrauch 1998	20,9 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	4,6 GJ/t Brennstoffe 0,98 GJ/t Strom
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Vorerwärmung der Verbrennungsluft • Einsatz fortgeschrittener Brennersysteme: Hochgeschwindigkeitsbrenner, Regeneratorbrenner • Abwärmenutzung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	3,5 GJ/t Brennstoffe 0,98 GJ/t Strom
technisches Einsparpotenzial	24 % bezogen auf 1998: 5 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	4-7 % bezogen auf 1998: 0,8-1,5 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,4 Mio. t wirtschaftlich: 0,07-0,13 Mio. t

Nichteisen-Gießereien

Tabelle 6-12: Minderungsoptionen und Potenziale bei NE-Gießereien

Prozesse	Erwärmen, Schmelzen, Überhitzen, Wärmebehandeln
Endenergieverbrauch 1998	5,5 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	6,0 GJ/t Brennstoffe 1,88 GJ/t Strom
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Vorerwärmung der Verbrennungsluft • Einsatz fortgeschrittener Brennersysteme: Hochgeschwindigkeitsbrenner, Regeneratorbrenner • Abwärmenutzung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	4,58 GJ/t Brennstoffe 1,88 GJ/t Strom
technisches Einsparpotenzial	20 % bezogen auf 1998: 1,1PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	6-8 % bezogen auf 1998: 0,3-0,4 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,07 Mio. t wirtschaftlich: 0,2-0,25 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Bei den EST-Gießereien und NE-Gießereien werden zunehmend elektrothermische Verfahren anstatt der brennstoffbeheizten Schmelzaggregate verwendet. Dies bedeutet generell eine Verminderung des Endenergiebedarfs. Häufig kann durch die Umstellung des Verfahrens auch eine Reduzierung des Primärenergieaufwands erreicht werden, wenn der mittlere Wirkungsgrad der Verfahren und die bei brennstoffbeheizten Schmelzen höheren Abbrandverluste miteinbezogen werden.

Herstellung von Sekundäraluminium

Tabelle 6-13: Minderungsoptionen und Potenziale bei NE-Gießerein

Prozess	Einschmelzen von Aluminiumschrott
Endenergieverbrauch 1998	4,0 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	7,1 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Weiter Verbreitung der Schrottvorwärmung • Verstärkter Einsatz von Regeneratorbrennern • Alternative Verfahren: salzärmer VAW-Prozess
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	6,00 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">16 %</div> bezogen auf 1998: 0,64 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">8-10 %</div> bezogen auf 1998: 0,3-0,4 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,04 Mio. t wirtschaftlich: 0,02-0,025 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Herstellung von Primärkupfer

Tabelle 6-14: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Primärkupfer

Prozesse	Rösten, Sintern, Schmelzen, Raffination
Endenergieverbrauch 1998	4,1 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	11,6 GJ/t
Minderungsoptionen:	Das moderne Schwebeschmelzverfahren ist in Deutschland weit verbreitet. Nur noch wenige Optionen, dabei vor allem eine weiter verbesserte Abwärmenutzung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	10,7 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	8 % bezogen auf 1998: 0,32 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	5 % bezogen auf 1998: 0,21 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,02 Mio. t wirtschaftlich: 0,01 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Alternative Herstellungsverfahren wie die Verarbeitung im Flammzyklonreaktor oder des QSL-Verfahren werden noch im Laborstadium erforscht bzw. haben sich bisher nicht als durchführbar erwiesen.

Herstellung von Sekundärkupfer

Tabelle 6-15: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Sekundärkupfer

Prozess	Einschmelzen von Kupferschrott
Endenergieverbrauch 1998	6,2 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	10,9 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Das Schwebeschmelzverfahren ist in Deutschland weit verbreitet. Dieses bietet nur noch wenig Optionen, dabei vor allem eine weiter verbesserte Abwärmenutzung • Einsatz von Top Blown Rotary Convertern
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	10,05 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">8 %</div> bezogen auf 1998: 0,5 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">4-6 %</div> bezogen auf 1998: 0,25-0,37 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,03 Mio. t wirtschaftlich: 0,016-0,023 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Herstellung von Primärzink

Tabelle 6-16: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Primärzink

Prozess	Schmelzen
Endenergieverbrauch 1998	2,1 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	30,6 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Temperatur der Luftvorwärmung • Einsatz von temperaturgesteuerten Brennern • Automatische Drosselklappen in den Abgasleitungen
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	29,4 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">4 %</div> bezogen auf 1998: 0,08 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">2-3 %</div> bezogen auf 1998: 0,04-0,06 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,005 Mio. t wirtschaftlich: 0,003-0,004 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Thermische Prozesse bei der Herstellung von NE-Halbzeugen

Tabelle 6-17: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von NE-Halbzeugen

Prozesse	Wärmebehandlung
Endenergieverbrauch 1998	36,5 PJ
spezifischer Energieaufwand	7,9 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkter Einsatz von regenerativ Brennern • Einsatz von Oxy-Fuel-Brennern
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	6,1 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">23 %</div> bezogen auf 1998: 8,4 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">10-15 %</div> bezogen auf 1998: 3,7-5,5 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,5 Mio. t wirtschaftlich: 0,23-0,34 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Ziegelherstellung

Tabelle 6-18: Minderungsoptionen und Potenziale beim Brennen von Ziegeln

Prozess	Ziegelbrennen
Endenergieverbrauch 1998	15,1 PJ
spezifischer Energieaufwand	2,2 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Beseitigung von Ofenundichtigkeiten • Einsatz von Drehöfen (Roller Kiln)
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	1,7 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">23 %</div> bezogen auf 1998: 3,4 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">10-12 %</div> bezogen auf 1998: 1,5-1,8 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,27 Mio. t wirtschaftlich: 0,12-0,14 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Kalkbrennen

Tabelle 6-19: Minderungsoptionen und Potenziale beim Brennen von Kalk

Prozess	Brennen von Kalk
Endenergieverbrauch 1998	21,6 PJ
spezifischer Energieaufwand	3,43 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Ablösung oder Umbau von veralteten Ofenkonstruktionen durch moderne GGR-Öfen • Reduzierung der Abstrahlungsverluste in Drehrohröfen durch Zweischichtsteine
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	3,2 GJ/t
Einsparpotenzial bez. auf 1998	1,5 PJ
technisches Einsparpotenzial	<p style="text-align: right;">7 %</p> bezogen auf 1998: 1,5 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<p style="text-align: right;">5 %</p> bezogen auf 1998: 1,1 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,12 Mio. t wirtschaftlich: 0,09 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Zementherstellung

Zur Herstellung von Zement werden die Ausgangsstoffe Kalke, Mergel und Ton im gewünschten Mischungsverhältnis gemahlen und in einem Ofen zu **Zementklinker** gebrannt. Der Zementklinker wird nach Abkühlung und Zwischenlagerung mit Zuschlagsstoffen zu Zement gemahlen. Die Art und Menge der Zuschlagsstoffe bestimmt die erhaltene Zementart. Der Anteil an Zementklinker kann dabei zwischen 5 % und ungefähr 100 % variieren. Daher wird der spezifische Energieverbrauch bei der Zementherstellung auf das Zwischenprodukt Zementklinker bezogen, um die Vergleichbarkeit der Werte zu gewährleisten.

Tabelle 6-20: Minderungsoptionen und Potenziale beim Brennen von Zementklinker

Prozess	Brennen von Zementklinker
Endenergieverbrauch 1998	79,8 PJ
spezifischer Energieaufwand	2,9 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Vorkalzineranlagen • Prozessverbesserung durch Prozessleitsysteme • Verbesserte Wärmedämmung durch Verwendung von Zweischichtsteinen • Optimierung der Vorwärmer • Verbesserte Klinkerkühler
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	2,3 GJ/t Klinker
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right; margin-right: 20px;">20 % (pro Tonne Klinker)</div> bezogen auf 1998 15,9 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right; margin-right: 20px;">5-8 %</div> bezogen auf 1998 4,0-6,4 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 1,5 Mio. t wirtschaftlich: 0,4-0,6 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Langfristig wird erwartet, das Wirbelschichtverfahren in den Öfen zur Zementherstellung verwenden zu können und damit den spezifischen Energieaufwand auf 1,8 GJ/t Klinker absenken zu können.

Sonstige Güter der Steine und Erden Industrie

Unter dieser Kategorie werden Produkte wie Baukeramik, Steinzeugformstücke, Zuschlagstoffe, Gips oder Mineralfasererzeugnisse zusammengefasst.

Tabelle 6-21: Minderungsoptionen und Potenziale bei sonstigen Steinen und Erden

Prozess	Brennen
Endenergieverbrauch 1998	20,1 PJ
spezifischer Energieaufwand	-
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Übergang zur Einmalschnellbrandtechnik • Verstärkter Einsatz der Elektroschmelztechnologie bei der Herstellung von Mineralfasererzeugnissen • Verbesserung der Brennertechnik • Verstärkter Einsatz von fortgeschrittener Prozessleittechnik • Verstärkte Nutzung der Abwärmeströme
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">18 %</div> <div>bezogen auf 1998</div> <div style="text-align: right;">3,6 PJ</div>
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">8-10 %</div> <div>bezogen auf 1998</div> <div style="text-align: right;">1,6-2,1 PJ</div>
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	<div>technisch: 0,29 Mio. t</div> <div>wirtschaftlich: 0,13-0,17 Mio. t</div>

Quelle: FhG-ISI

Olefinherstellung

Tabelle 6-22: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Olefinherstellung

Prozess	Dampfspaltung von Erdöl
Endenergieverbrauch 1998	87 PJ
spezifischer Energieaufwand	10,4 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Regelung • Bessere Dämmung der Öfen • Einsatz verbesserter Katalysatoren • Integration von Gasturbinen (KWK) • Optionen zur Wärmerückgewinnung sind bereits weitgehend ausgeschöpft
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	9,1 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> bezogen auf 1998 13 % 11,3 PJ </div>
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> bezogen auf 1998 6-8 % 5,2-7,0 PJ </div>
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> technisch: 0,68 Mio. t </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> wirtschaftlich: 0,31-0,42 Mio. t </div>

Quelle: FhG-ISI

Aluminiumoxid-Produktion

Tabelle 6-23: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Aluminiumoxid

Prozess	Kalzinieren
Endenergieverbrauch 1998	2,3 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	3,1 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Weitere Substitution der Drehrohröfen durch Wirbelschichtöfen • Verbesserte Wärmenutzung der ausgetragenen Gase am Wirbelschichtofen
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	2,9 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">8 %</div> bezogen auf 1998 0,2 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">2 %</div> bezogen auf 1998 0,05 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,016 Mio. t wirtschaftlich: 0,004 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Investitionsgüter-Produktion

Tabelle 6-24: Minderungsoptionen und Potenziale bei thermischen Prozessen in der Investitionsgüter Produktion

Prozesse	Erwärmen, Schmelzen, Wärmebehandeln, Beschichten
Endenergieverbrauch 1998	43,3 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	Strom: 67,1 MJ/€1000 NPW Brennstoffe: 99,7 MJ/€1000 NPW
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Weitere Substitution von brennstoffbetriebenen Öfen durch Elektroöfen • Vermehrter Einsatz von elektronischen Prozessleitsystemen • verbesserte Wärmedämmung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	Strom: 75,5 MJ/€1000 NPW Brennstoffe: 74,4 MJ/€1000 NPW
Einsparpotenzial bez. auf 1998	10 PJ
technisches Einsparpotenzial	10 % bezogen auf 1998: 4,3 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	8 % bezogen auf 1998: 3,5 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,46 Mio. t wirtschaftlich: 0,36 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Bei den thermischen Verfahren in der Investitionsgüter-Produktion ist von einem weiter fortschreitenden Trend zur Substitution von brennstoffbetriebenen zu elektrothermischen Verfahren auszugehen. Obwohl die Verwendung von Strom primärenergetisch weniger vorteilhaft ist, können durch die Effizienzgewinne der elektrothermischen Verfahren Emissionsminderungen erreicht werden.

Glasherstellung

Tabelle 6-25: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Glas

Prozesse	Erwärmen, Schmelzen, Überhitzen
Endenergieverbrauch 1998	55,3 PJ
spezifischer Energieaufwand	7,5 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessoptimierung (größere Schmelzwannen, fortgeschrittene Regelsysteme) • Sauerstoff-Schmelzen • Verbessertes Feuerfestmaterial • Erhöhung des Scherbenanteils • Verstärkte Abwärmenutzung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	5,6 GJ/t
Einsparpotenzial bez. auf 1998	13,7 PJ
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">25 %</div> bezogen auf 1998: 13,7 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">10-12 %</div> bezogen auf 1998: 5,5-6,6 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,81 Mio. t wirtschaftlich: 0,33-0,39 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Herstellung von Feinkeramik

Tabelle 6-26: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Herstellung von Feinkeramik

Prozesse	Glühen, Brennen
Endenergieverbrauch 1998	31,1 PJ
spezifischer Energieaufwand	7,8 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Übergang zur Einmalschnellbrand-Technologie • Verstärkter Einsatz des Rollen-Tunnelofens • Verbesserte Nutzung der Ofenabwärme
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	6,25 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">20 %</div> bezogen auf 1998: 6,2 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">8-10 %</div> bezogen auf 1998: 2,5-3,1 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,37 Mio. t wirtschaftlich: 0,15-0,18 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

6.3.2 Thermische Anwendungen im Bereich 200 °C bis 500 °C

Produktion von Primärblei

Tabelle 6-27: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Produktion von Primärblei

Prozesse	Rösten, Sintern, Schmelzen
Endenergieverbrauch 1998	1,1 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	6,3 GJ/t
Minderungsoptionen	Weitere Umstellung der Produktion auf das QSL-Verfahren
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	5,3 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	bezogen auf 1998 17 % 0,2PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	bezogen auf 1998 12 % 0,13 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,012 Mio. t wirtschaftlich: 0,008 Mio. t

Produktion von Kalisalzen

Tabelle 6-28: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Kalirohsalzen

Prozesse	Entwässerung
Endenergieverbrauch 1998	9,8 PJ
spezifischer Energieaufwand	0,3 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Abwärmenutzung • Verbesserte Prozesskontrolle
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	0,21 PJ
technisches Einsparpotenzial	bezogen auf 1998: 29 % 2,8 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	bezogen auf 1998: 8-10 % 0,8-1,0 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,16 Mio. t wirtschaftlich: 0,04-0,06 Mio. t

Herstellung pulveriger Waschmittel

Tabelle 6-29: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung pulveriger Waschmittel

Prozess	Entwässerung
Endenergieverbrauch 1998	5,2 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	9,8 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Produktsubstitution von pulverigen Waschmitteln zugunsten flüssiger Waschmittel • Verstärkte Nutzung der Abwärme • Wärmenutzung aus KWK anstelle von Gasbrennern
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	7,7 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">34 %</div> bezogen auf 1998 <div style="text-align: right;">1,8 PJ</div>
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">20 %</div> bezogen auf 1998 <div style="text-align: right;">1,0 PJ</div>
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,12 Mio. t wirtschaftlich: 0,065 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Industrielles Backen

Tabelle 6-30: Minderungsoptionen und Potenziale bei der industriellen Herstellung von Backwaren

Prozesse	Backen, Beschwaden
Endenergieverbrauch 1998	10,5 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	2,5 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau von Abgasklappen zur Minderung der Abgasverluste während Brennerstillstandszeiten • Nachrüstung älterer Öfen: Dämmung der Herdtüren Umrüstung auf Stufenbrenner, um die Leistung der Belegung des Ofens anzupassen • Abwärmenutzung durch Abgasrückführung oder zur Warmwasserbereitung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	2,0 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">20 %</div> bezogen auf 1998: 2,1 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">10-15 %</div> bezogen auf 1998: 1,1-1,6 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,13 Mio. t wirtschaftlich: 0,07-0,1 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

6.3.3 Thermische Anwendungen unter 200 °C

Kohletrocknung

Tabelle 6-31: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Kohle

Prozess	Entwässerung
Endenergieverbrauch 1998	8,0 PJ
spezifischer Energieaufwand	2,5 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Dampfwirbelschicht-Trocknungsverfahren • Abwärmenutzung aus dem Dampfwirbelschichtverfahren
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	1,81 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">29 %</div> bezogen auf 1998: 2,3 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">7-10 %</div> bezogen auf 1998: 0,6-0,8 PJ

Quelle: FhG-ISI

Ziegelproduktion

Tabelle 6-32: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Ziegeln

Prozess	Entwässerung
Endenergieverbrauch 1998	14,4 PJ
spezifischer Energieaufwand	0,86 GJ/t (Mauerziegel) 0,91 GJ/t (Dachziegel) 0,44 GJ/t (Feuerfestmaterial)
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Kompartimentierung der Trockner • Verbesserung der Prozesssteuerung • Einsatz von BHKW
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	0,8 GJ/t (Dachziegel, Mauerziegel) 0,4 GJ/t (Feuerfestmaterial)
technisches Einsparpotenzial	8 % bezogen auf 1998: 1,2 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	5-6 % bezogen auf 1998: 0,7-0,9 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,1 Mio. t wirtschaftlich: 0,06-0,07 Mio. t

PVC-Herstellung

Tabelle 6-33: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von PVC

Prozess	Entwässerung
Endenergieverbrauch 1998	1,7 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	1,51 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Entwässerung dispergierter PVC Lösungen durch Ultrafiltration oder Elektrodekantation • Einsatz von MST-Zyklontrocknern
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	1,34 GJ
technisches Einsparpotenzial	10 % bezogen auf 1998: 0,2 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	3 % bezogen auf 1998: 0,05 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,01 Mio. t wirtschaftlich: 0,003 Mio. t

Sodaherstellung

Tabelle 6-34: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Kalzinierung von Soda

Prozesse	Kalzinierung von Soda
Endenergieverbrauch 1998	5,47 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	3,5 GJ/t
Minderungsoptionen	Bekannte verfahrenstechnische Neuerungen bewirken keine Minderung des spezifischen Energiebedarfs
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	3,5 GJ/t
Einsparpotenzial bez. auf 1998	-

Holz

Tabelle 6-35: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Holz

Prozesse	Trocknung
Endenergieverbrauch 1998	33,8 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	1,16 bis 1,57 GJ/t (Schnittholz) 3,26 GJ/t (Furniere) 2,19 GJ/t (Späne)
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Nutzung der Kondensationstrocknung • Einführung dualer Trocknungssysteme • Verbesserung der Regelungstechnik • thermische Kopplung von Vortrocknern und Haupttrocknern • Ersatz von Düsentrocknern durch Trommeltrockner und Röhrenbündeltrockner
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	0,82 bis 1,12 GJ/t (Schnittholz) 3,0 GJ/t (Furniere) 2,0 GJ/t (Späne)
technisches Einsparpotenzial	18 % bezogen auf 1998: 6,1 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	8-12 % bezogen auf 1998: 2,7-4,1 PJ

Quelle: FhG-ISI

Papierherstellung

Tabelle 6-36: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Papier und Pappen

Prozesse	Entwässerung, Trocknung
Endenergieverbrauch 1998	97,4 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	5,22 GJ/t (Papier) 5,52 GJ/t (Pappe) 4,38 GJ/t (Zellstoff) 4,7 GJ/t (Ablauge)
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgängige Nutzung des an Trocknungszyklindern entstehenden Wasserdampfes • Durchgängige Verwendung von Hochleistungs- hauben (Prallstrahlhauben) • Verbesserte Prozesssteuerung, um maximale Sättigung der Abluft mit Wasser zu erreichen
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	4,7 GJ/t (Papier) 5,0 GJ/t (Pappe) 3,5 GJ/t (Zellstoff) 4,2 GJ/t (Ablauge)
technisches Einsparpotenzial	12 % bezogen auf 1998: 11,7 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	5-8 % bezogen auf 1998: 4,9-7,8 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 1,0 Mio. t wirtschaftlich: 0,4-0,7 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Lackieren und Färben

Tabelle 6-37: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Lacken und Farbüberzügen

Prozesse	Trocknung
Endenergieverbrauch 1998	17,5 PJ (1992)
spezifischer Energieaufwand 1998	-
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung neuer Lacke, die bei niedrigeren Temperaturen aushärten • Weiterentwicklung von Nass-in-Nass Verfahren • Erhöhung des Festkörperanteils in Lacken • Verstärkter Einsatz von Infrarot-Trocknern
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	-
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">16 %</div> bezogen auf 1992 2,8 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">10-12 %</div> bezogen auf 1992 1,8-2,1 PJ

Quelle: FhG-ISI

Herstellung von feinkeramischen Gütern

Tabelle 6-38: Minderungsoptionen und Potenziale bei Trocknungsprozessen in der feinkeramischen Industrie

Prozesse	Entwässerung
Endenergieverbrauch 1998	2,1 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	3,3 GJ/t (Haushaltsporzellan) 1,25 GJ/t (Sanitärkeramik) 1,0 GJ/t (Elektroporzellan) 2,0 GJ/t (Wand- und Bodenfliesen)
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung des Anteils isostatisch gepresster Ware • Verstärkte Abwärmenutzung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	2,8 GJ/t (Haushaltsporzellan) 1,15 GJ/t (Sanitärkeramik) 1,0 GJ/t (Elektroporzellan) 1,9 GJ/t (Wand u. Bodenfliesen)
technisches Einsparpotenzial	12 % bezogen auf 1998 0,2 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	5-7 % bezogen auf 1998 0,1 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,01 Mio. t wirtschaftlich: 0,006 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Textilherstellung

Tabelle 6-39: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Textilien

Prozesse	Trocknung
Endenergieverbrauch 1998	14,7 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	8,5 GJ/t (Fasern) 10,4 GJ/1000m ² (flächige Textilien)
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgehender Einsatz von Hochleistungsquetschen • Erweiterter Einsatz von Kapillarkvakuumpumpen • Verstärkter Einsatz des Schaumaufragsverfahrens führt zu geringerer Befeuchtung • Einsatz fortgeschrittener Trockner- und Trommelkonstruktionen • Verbesserte Prozesssteuerung zur Vermeidung von Übertrocknung • Optimierung der Belüftungssysteme • Weitergehende Umrüstung auf Nass-in-Nass Produktion
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	7,7 GJ/t (Garne) 8,6 GJ/1000m ² (flächige Textilien)
technisches Einsparpotenzial	16 % bezogen auf 1998 2,3 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	10-12 % bezogen auf 1998 1,5-1,8 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,14 Mio. t wirtschaftlich: 0,09-0,11 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Zuckerproduktion

Tabelle 6-40: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Zucker und Trockenschnitzeln

Prozesse	Trocknung
Endenergieverbrauch 1998	27,6 PJ
spezifischer Energieaufwand 1998	2,3 GJ/t (Weißzucker) 11,4 GJ/t (Trockenschnitzel)
Minderungsoptionen	Weißzucker: <ul style="list-style-type: none"> • Nutzung der Karbonatsabgase • Weitergehende Nutzung der Brüdenkompression, Umkehrosmose, Membranverfahren • Verbesserte Regelung Trockenschnitzel: <ul style="list-style-type: none"> • Verlängerung der Presszeiten • Anwendung von Hilfsstoffen • Anwendung von Trocknerkombinationen • Osmotische Entwässerung
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • 1,3 GJ/t (Weißzucker) • 6,1 GJ/t (Trockenschnitzel)
technisches Einsparpotenzial	40 % bezogen auf 1998: 11,0 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	8-10 % bezogen auf 1998: 2,2-2,8 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,96 Mio. t wirtschaftlich: 0,19-0,24 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Herstellung von Milchprodukten

Tabelle 6-41: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Milchprodukten

Prozesse	Entwässern, Trocknung
Endenergieverbrauch 1998	4,0 PJ (1992)
spezifischer Energieaufwand 1998	<ul style="list-style-type: none"> • 4,3 GJ/t (Milchpulver) • 0,48 GJ/t (Kondensmilch)
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ersatz thermischer Brüdenkompression durch mechanische Brüdenkompression • Erhöhung der Verdampferanzahl • Einsatz von Umkehrosmoseverfahren, Membranverfahren • Verstärkte Umrüstung auf Zwischenstufentrocknung • Erhöhung des Trockensubstanzgehalts bei der Aufkonzentrierung • Einsatz von Kondensationszyklonen
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • 2,3 GJ/t (Milchpulver) • 0,40 GJ/t (Kondensmilch)
Einsparpotenzial bez. auf 1998	1,6 PJ (bezogen auf 1992)
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">44 %</div> bezogen auf 1992: 1,6 PJ
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">15 %</div> bezogen auf 1992: 0,6 PJ
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: 0,12 Mio. t wirtschaftlich: 0,04 Mio. t

Quelle: FhG-ISI

Herstellung von Futtermitteln

Tabelle 6-42: Minderungsoptionen und Potenziale bei der Trocknung von Futtermitteln

Prozess	Trocknen von Grünfutter
Endenergieverbrauch 1998	4,1 PJ (1992)
spezifischer Energieaufwand 1998	9,7 GJ/t
Minderungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von zweistufigen Trocknern • Einsatz von chemischen Trocknungsmitteln • Absenkung der Trocknungstemperatur
erreichbarer spezifischer Energieaufwand	8,4 GJ/t
technisches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">14 %</div> bezogen auf 1992: <div style="text-align: right;">0,6 PJ</div>
wirtschaftliches Einsparpotenzial	<div style="text-align: right;">10-12 %</div> bezogen auf 1992: <div style="text-align: right;">0,4-0,5 PJ</div>
Minderungspotenzial CO ₂ -Emissionen	technisch: <div style="text-align: right;">0,05 Mio. t</div> wirtschaftlich: <div style="text-align: right;">0,03-0,04 Mio. t</div>

6.4 Prozesssubstitution

Die Optionen und Potenziale, die sich aus der Prozesssubstitution ergeben, konnten bei weitem nicht erschöpfend im Rahmen der Studie untersucht werden. Allgemeine Angaben sind in diesem Bereich nicht möglich.

6.4.1 Alternative Umsetzungsreaktionen

Bodke et al. (1999) berichten von deutlichen Steigerungen der Umsatzrate des Ausgangsstoffes Ethan bei der Herstellung von Ethylen bei der Durchführung einer Platin-Zinn-katalysierten partielle Oxidation anstelle der heute üblichen Dampfspaltung. Das Verfahren befindet sich noch nicht in der großtechnischen Anwendung. Das spezifische Einsparpotenzial kann auf 5 bis 10 % geschätzt werden. Ein weiterer Vorteil der Reaktion ist ihre große Geschwindigkeit. Sie benötigt rund ein Tausendstel der Zeit, die für die Dampfspaltungsreaktion notwendig ist. Damit können bedeutend kleinere Reaktoren eingesetzt werden, um die gewünschte Produktionsmenge zu erhalten und die Investitionskosten niedrig gehalten werden.

6.4.2 Trennverfahren

Nach Schätzungen (Bradke et al., 1995) werden in der chemischen Industrie 40 % der Energie für thermische Trennoperationen aufgewendet. Je nach Trennverfahren, Stoffzusammensetzung und gefordertem Reinheitsgrad der Trennprodukte bieten sich für die angewendeten thermischen Verfahren auch weniger energieintensive Alternativen an.

Ein in der großtechnischen Anwendung relativ neues Verfahren, das in der chemischen Industrie eingesetzt werden kann, ist der Einsatz von Trennwandkolonnen zur energieeffizienten Stofftrennung. Die mögliche Integration mehrerer Verfahrensschritte in eine Anlage eröffnet ein theoretisches Reduktionspotenzial von bis zu 50 %. Becker et al. (2000) nennen Einsparungen in der Höhe von 30 % als in realen Anlagen erreichbaren Wert.

Membrantechnologien

Bei der Stofftrennung von Gasen, Flüssigkeiten, gelösten Substanzen, Metallen oder auch von Mikroorganismen bieten Membrantechnologien vielfältige Optionen zur Prozessverbesserung und zur Steigerung der Energieeffizienz. Worrell et al. (1997) geben als allgemeine grobe Vergleichswerte für den spezifischen Energieverbrauch der Mikrofiltration 7-70 MJ/t an, während für die Verdampfung mindestens 2260 MJ/t verbraucht werden.

Bei der Verwendung von Steamcrackern mit Membrantrennung lässt sich der spezifische Brennstoffverbrauch um 8 % auf 56 GJ/t gegenüber einer Anlage mit Destillationseinheit zur Trennung der Produkte senken (Worrell, 1997). Dies bedeutet eine Einsparung von rund 5 GJ/t. Es konnten keine Informationen darüber gefunden werden, wie weit das Verfahren inzwischen verbreitet ist. 1996 wurde es nach Worrell (1997) in der petrochemischen Industrie noch nicht als anerkannte Technik eingestuft. Bei einer Produktion von 7,35 Mio. t Ethylen und Propylen im Jahr 1998 (VCI, 1999) und einer angenommenen Durchdringung von max. 20 % bis zu diesem Zeitpunkt würde die vollständige Umstellung auf das Verfahren mit Membrantrennung eine Einsparung von 29 PJ an Energie aus Brennstoffen bedeuten. Die Amortisationszeiten für die Umstellung auf das Membranverfahren liegen unter 2 Jahre (Worrell, 1997). Damit ist das Verfahren auch nach den Kriterien der Industrie als wirtschaftlich zu betrachten.

Auch bei der Rückgewinnung von Wasserstoff aus einem Strom gasförmiger Produkte können Membrane energetisch vorteilhaft eingesetzt werden. Bei der Ammoniak-Produktion fallen große Mengen an nicht umgesetztem Wasserstoff im Abgasstrom des Reaktors an. Im herkömmlichen Verfahren wurde dieses Gas als Brennstoff für den Reformier verwendet, der den Wasserstoff für den Reaktor bereitstellt. Durch die Abtrennung und Wiederaufführung des Wasserstoffs in den Reaktor kön-

nen Energieeinsparungen in der Höhe von 10 % erreicht werden. Inzwischen ist dieses Verfahren Stand der Technik, und die Anlagen werden auf diese Technik umgestellt. Die absoluten Einsparpotenziale sind dementsprechend nur noch gering.

Problematisch bei vielen Membranen ist heute immer noch die Reproduzierbarkeit ihrer Eigenschaften, so dass es bei einer Erneuerung zu Veränderungen der in dem Verfahren erhaltenen Produkteigenschaften kommen kann.

Trennung und Reinigung durch Schmelzflusskristallisation

In vielen Anwendungen der chemischen und petrochemischen Industrie muss für Trennungs- und Reinigungsverfahren viel Energie aufgewendet werden. In der Regel werden Verdampfungsverfahren oder Destillationen angewandt. Dabei muss der Siedepunkt der Substanz oder des Substanzgemisches überschritten werden und die Verdampfungsenergie aufgebracht werden. Bei Kristallisationsverfahren muss dagegen die Schmelzenergie aufgebracht werden, die in der Größenordnung von einem Drittel der Verdampfungsenergie liegt. Im Labormaßstab wird die Schmelzflusskristallisation schon seit langem als Standardverfahren zur Reinigung organischer Substanzen verwendet. Im großtechnischen Maßstab konnte sich dieses Verfahren jedoch nur durchsetzen, wo kein adäquates Destillations- oder Extraktionsverfahren entwickelt werden konnte.

Am nächsten zur großtechnischen Anwendung ist nach Worrell (1997) die Schmelzflusskristallisation, mit der sich Effizienzsteigerungen bei der Trennung von Benzol um 0,8 GJ/t erreichen lassen und bei Styrol um 1.6 GJ/t. Allerdings sind die erreichbaren Energieeffizienzgewinne nicht ganz unumstritten, da z. B. noch nicht feststeht, ob sich die gewünschten Verfahren in einem Schritt durchführen lassen, oder mehrere Schmelz- und Kristallisationsschritte notwendig sind. In der chemischen Industrie wird die Schmelzflusskristallisation bisher nicht als Alternative zur Destillation betrachtet.

Bezogen auf die Benzolproduktion 1998 von 2,35 Mio. t würde eine spezifische Verminderung des Energieeinsatzes um 0,8 GJ/t eine Einsparung von 1,9 PJ bedeuten, wenn es zu einer Anwendung der Schmelzflusskristallisation kommen sollte.

7 Optionen und Potenziale zur Minderung von Emissionen im Sektor Verkehr

Im Verkehrssektor bestehen einige vielversprechende Optionen zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Das Beispiel der Luftreinhaltung hat zudem gezeigt, dass mit der Verbesserung von Fahrzeugtechnik und Luftfahrttechnik die Emissionen von Luftschadstoffen erheblich vermindert werden können und die erreichbaren Minderungspotenziale eher unterschätzt wurden. Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Luftschadstoffe wie NO_x mit nachgeschalteten Systemen reduziert werden können, während die CO_2 -Emissionen als Hauptprodukt der Verbrennungsmotoren nur durch Effizienzsteigerungen oder alternative System vermieden werden können. Ebenfalls von großer Bedeutung bei der Bewertung von Minderungspotenzialen ist das erwartete Wachstum der Verkehrsleistungen.

7.1 Optionen und Potenziale im Straßenverkehr

Zur Steigerung der Energieeffizienz bei Straßenverkehrsfahrzeugen stehen eine Reihe von technischen Maßnahmen zur Verfügung. Auf Seiten der Karosserie und der Anbauteile bestehen immer noch erhebliche Potenziale zur Gewichtsreduktion. Erreicht werden kann die Verminderung des Fahrzeuggewichts durch den Einsatz leichter Werkstoffe wie Aluminium oder z. T. auch Magnesium. Die Audi AG (2000) gibt an, dass durch die Verwendung von Aluminium eine Gewichtsreduktion von 43 % gegenüber Stahl bei dem Modell A2 erreicht werden konnte. Diese Option ist jedoch mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Eine weitere technische Option zur Gewichtsreduktion liegt in der Space-Frame-Bauweise, die nicht nur bei Aluminium, sondern auch bei Stahl als Werkstoff eingesetzt werden kann und deutliche Gewichtsreduktionen ermöglicht (vgl. Wallentowitz u. Schwarz, 2000). Auch bei den Anbauteilen wie Türen, Motorhauben und Kofferraumdeckeln sind Gewichtsverminderungen durch die Konstruktionsweise um 30 % gegenüber dem derzeitigen Durchschnitt möglich, ohne Mehrkosten zu verursachen (Porsche Engineering Services, 2000). Zukünftig ist auch denkbar, weitere Gewichtsreduktionen durch Integralbauweise einzelner Baueile oder durch den Einsatz von Metallschäumen zu verwirklichen.

Neben der Gewichtsreduktion kann eine Optimierung des aerodynamischen Verhaltens der Karosserie zur Verminderung des Energieverbrauchs beitragen. Der Senkung des Widerstandbeiwertes sind jedoch durch die ästhetischen Anforderungen an das Design Grenzen gesetzt (IEA, 2000). Die Reibungsverluste im Antriebsstrang können durch fortgeschrittene Schmierstoffe und synthetische Öle vermin-

dert werden. Ebenso bestehen Minderungspotenziale in der Reduzierung des Abrollwiderstands der Reifen.

Neben der Gewichtsreduktion der Fahrzeuge bietet die Optimierung der Antriebsmotoren immer noch Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. Deutliche Effizienzsteigerungen wurden zunächst bei Dieselmotoren mit der Direkteinspritzung mit erhöhten Ladedrücken aufgrund der Common-Rail oder der Pumpe-Düse-Technik erzielt. Die zuerst bei Dieselmotoren eingeführte Direkteinspritzungstechnik wird inzwischen auch bei mit Ottokraftstoffen betriebenen Motoren angewendet. Durch eine weitere Optimierung der Motorsteuerung können während dem Betrieb auftretende Verluste minimiert werden, und die automatische Abschaltung des Motors während Perioden, in denen keine Leistung benötigt wird, trägt bereits heute bei wenigen PKW-Modellen zur Kraftstoffeinsparung bei. In der Studie von Shell (2001) werden für Ottomotoren Einsparpotenziale von bis zu 20 % bei weiterer Verbesserung der Direkteinspritzung im Magermixbetrieb³ erwartet. Für Dieselmotoren werden durch Feinarbeiten am Einspritzsystem, der Verbrennung und dem Motormanagement weitere Einsparpotenziale von 15 bis 20 Prozent gesehen.

Alternative Antriebskonzepte wie Elektromotoren oder Hybridantriebe haben bisher noch nicht wesentlich zu einer höheren Energieeffizienz beigetragen. Bady u. Biermann (2000) z. B. sind der Ansicht, dass serielle Hybridantriebe, bei denen ein Verbrennungsmotor immer nur einen Generator antreibt, keine Vorteile hinsichtlich der Energieeffizienz bieten. Auch ist noch nicht sicher, ob mit parallelen Hybridantrieben, bei denen sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor zum Vortrieb genutzt werden, tatsächlich signifikante Effizienzsteigerungen möglich sind. Die derzeit auf dem Markt befindlichen PKW mit Hybridantrieb bieten noch keine Vorteile gegenüber Fahrzeugen mit modernen direkteinspritzenden Dieselmotoren, erreichen aber ähnliche Verbrauchswerte wie diese. Unbestritten vorteilhaft sind die geringen Luftschadstoffemissionen, die mit Hybridantrieben erreicht werden können. Insbesondere in immer noch belasteten städtischen Regionen können durch den Betrieb allein mit dem Elektromotor lokal sämtliche Emissionen vermieden werden.

Brennstoffzellenfahrzeuge befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Bislang existieren lediglich Demonstrationsfahrzeuge. Inwieweit die Erwartungen an eine höhere Energieeffizienz tatsächlich in näherer Zukunft erfüllt werden können, ist damit noch nicht klar absehbar. Die Option, Brennstoffzellen mit nicht-fossilen Energieträgern zu betreiben, ermöglicht jedoch prinzipiell eine vollständige Vermeidung von Klimagasemissionen. Allerdings müssen dann Wege gefunden werden, wie Wasserstoff oder Methanol aus regenerativen Quellen in ausreichender

³ Magermix bedeutet, dass das Treibstoff-Luft-Gemisch im Zylinder einen Luftüberschuss enthält.

Menge bereitgestellt werden können. Hierzu existieren noch keine wirtschaftlich durchführbaren Optionen.

Nach Oertel u. Fleischer (2000) erreichen Brennstoffzellenfahrzeuge geringere Verbrauchswerte als herkömmliche Fahrzeuge. In ihrer Studie wird für ein modernes Dieselfahrzeug ein Verbrauch von 115 MJ/100 km angegeben (entsprechend 3,22 l/100 km). Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoffbetrieb erreichen danach Werte von 76 bis 80 MJ/100 km; für Fahrzeuge mit methanolbetriebenem Brennstoffzellenantrieb werden 106 bis 111 MJ/100 km genannt. Bei der Bewertung der Brennstoffzellenfahrzeuge spielt der Wechsel des Energieträgers eine wichtige Rolle. Kolke (1999) kommt in einem Vergleich von Brennstoffzellenfahrzeugen und von Fahrzeugen mit herkömmlichem Antriebsstrang, die den kalifornischen Standard ULEV⁴ erreichen, zu dem Schluss, dass Brennstoffzellenfahrzeuge keine Vorteile hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs bieten. Der höhere Energieaufwand in der Herstellung von Methanol im Vergleich zur Bereitstellung von Dieseldieselfahrzeugen ist größer als die Energieeinsparungen beim Fahrzeug selbst. Auf Seiten der CO₂-Emissionen weisen die Brennstoffzellenfahrzeuge jedoch Vorteile auf. Nach Kolke (1999) sind die direkten CO₂-Emissionen eines Brennstoffzellenfahrzeugs um 13 % geringer. Unter Berücksichtigung des Energieaufwands zur Bereitstellung der Treibstoffe bleibt ein Vorteil von rund 6 % für die Brennstoffzelle im Vergleich zum Ultra Low Emission Vehicle. Die Bewertung von Brennstoffzellenfahrzeugen würde sich in dem Moment verbessern, wenn Wasserstoff bereitgestellt werden könnte, der durch den Einsatz regenerativer Energien erzeugt wird. Dies ist zwar technisch durchführbar, solange jedoch keine massive Kostenreduktion bei der Erzeugung von Strom aus regenerativen Quellen und keine deutliche Effizienzsteigerung bei Erzeugung, Lagerung und Transport von Wasserstoff erreicht wird nicht als realistische Option zu betrachten.

Im Güterverkehr bestehen prinzipiell die gleichen technischen Optionen zur Minderung des Energieverbrauchs wie bei Personenfahrzeugen. Durch Verbesserung der Motoren sind 15 % Energieeinsparungen erreichbar. Durch Maßnahmen zur Verringerung des Roll- und des Luftwiderstands sind weitere Einsparungen bis 25 % möglich.

Nach IEA (2000) lag der Flottenverbrauch der PKW in Deutschland 1994 bei knapp über 9 l/100 km. Schlesinger et al. geben ungefähr den gleichen Wert für 1994 und 8,7 l/100 km für das Jahr 1997 an. Dies deckt sich weitgehend mit der Studie von Shell (2001). Bei konsequenter Umsetzung aller heute bekannter Technologien wurde eine Reduktion der spezifischen Verbräuche um 50 % als erreichbar einge-

⁴ ULEV: Ultra Low Emission Vehicle. Dieser Standard wird bisher noch von keinem Serienfahrzeug erfüllt. Die auf dem europäischen Markt befindlichen Fahrzeuge mit einem Normverbrauch von 3 l/100 km werden den Standard wahrscheinlich erreichen, wenn schwefelarme Treibstoffe und ein Katalysator eingesetzt werden.

schätzt. In der Shell-Studie wird im Szenario „Kaleidoskop“ von einer Senkung des Verbrauchs von Neufahrzeugen auf 3,7 l/100 km im Jahr 2020 ausgegangen, was einer Minderung von 57 % gegenüber dem in der Studie angegebenen Verbrauch von 1998 entspricht. Darüber hinaus werden noch weitergehende Konzepte wie das des Hypercar vorgeschlagen (Lovins et al., 1991, und Lovins, 1996), mit dem ein spezifischer Verbrauch von 1,7 l/100 km realisiert werden soll. Die Umsetzung eines solchen Konzepts würde eine Minderung des Energieverbrauchs um 75 % ermöglichen. Zur Erreichung dieses Ziels werden Verbesserungen an allen Komponenten der Fahrzeuge vorgeschlagen, wie sie oben bereits erwähnt wurden: Reduktion des Fahrzeuggewichts, Reduktion des aerodynamischen Widerstands, Reduktion des Abrollwiderstands und Erhöhung der Effizienz des Antriebsstrangs. Die Entwicklungsanstrengungen der Automobilindustrie zur Minderung des Treibstoffverbrauchs nehmen diese Konzepte bereits mit auf. Allerdings werden in der aktuellen Diskussion Ansätze wie der im Hypercar Konzept vorgeschlagene Hybridantrieb durchaus auch kritisch gesehen.

Die Reduktion des Energieverbrauchs im Straßenverkehrsbereich um 50 % würde auch mit einer Substitution von Ottomotoren durch Dieselmotoren einhergehen. Daher wurde angenommen, dass deutlich weniger Ottokraftstoffe verbraucht werden, während die Einsparungen bei Diesel weniger hoch eingeschätzt wurden. Mit diesen Annahmen wurde ein Minderungspotenzial für die CO₂-Emissionen von 84,5 Mio. t berechnet.

Bereits bei den heutigen Kraftstoffpreisen sind viele der technischen Optionen wirtschaftlich. In der Studie der IEA (2000) wird angegeben, dass eine Minderung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bei neuen PKW um 25 % gegenüber dem Durchschnitt des Bestands von 1998 wirtschaftlich zu erreichen ist.

7.2 Optionen und Potenziale im Schienenverkehr

Technische Optionen zur Energieeinsparung bestehen sowohl bei der Elektrotraktion als auch bei dieselbetriebenen Schienenfahrzeugen. Im Schienenverkehr wird eine große Anzahl alter Triebfahrzeuge eingesetzt. Die übliche Nutzungsdauer beträgt 30 Jahre (DB AG, 1998). Allein durch die Substitution älterer Fahrzeuge mit Triebfahrzeugen nach dem heutigen Stand der Technik können Effizienzsteigerungen erreicht werden. Optionen liegen zunächst wie im Straßenverkehr in der Verringerung des Gewichts und in der Verbesserung der Antriebstechnik. Eine sinnvolle Verbindung dieser beiden Maßnahmen liegt in der Verwendung von Einzelachsenantrieben, die den Triebkopf ersetzen und damit Gewicht einsparen. Bei vielen älteren Dieselloks insbesondere im Güterverkehr können durch Austausch der Motoren durch moderne energieeffizientere Aggregate Einsparungen erreicht werden, ohne das Fahrzeug komplett ersetzen zu müssen.

Ver mehrt wird bei den elektrisch betriebenen Zügen Energie bei Bremsvorgängen zurück ins Netz gespeist. Die Energieeinsparungen liegen dabei in der Höhe von 8 bis 14 % (DB AG, 1998). Zukünftig werden die erreichbaren Verminderungen des Energieverbrauchs durch Stromrückspeisungen und verbessertes Fahrverhalten auf 10 bis 40 % geschätzt (Daimler-Chrysler, 2000). Bei Dieseltriebwagen können Schwungräder genutzt werden, um die Bremsenergie aufzunehmen und während eines Halts den Betrieb von Klimaanlage und Innenbeleuchtung des Zuges gewährleisten. Diese Technik ist besonders bei Regionalzügen wegen der höheren Anzahl der Haltepunkte vielversprechend. Der Einsatz von Neigetechnikzügen vermindert den Energieverbrauch, da das Abbremsen und Wiederbeschleunigen an Kurven entfällt oder vermindert werden kann.

Das technische Einsparpotenzial insgesamt für den Schienenverkehr wird auf 30 % geschätzt (vgl. Daimler-Chrysler, 2000). Dies entspricht, bezogen auf das Jahr 1998, einer Minderung der CO₂-Emissionen um 3,6 Mio. t.

7.3 Optionen und Potenziale in der Binnenschifffahrt

Der Energieaufwand für die Binnenschifffahrt lag 1998 bei 15,7 PJ. Einsparpotenziale ergeben sich bei Binnenschiffen einerseits bei den Motoren. Hier können durch langsam laufende Schiffsdiesel bis zu 25 % des Verbrauchs vermieden werden. Die Hydrodynamik der Schiffe kann vor allem im Bereich des Propellers verbessert werden. Mittels Ringdüsen (z. B. Schneekluth-Düse oder Grimmsches Leitrad) können Einsparungen in der Größenordnung von 10 % erreicht werden.

Das technische Einsparpotenzial für den Bereich Binnenschifffahrt wurde auf 15 % geschätzt, entsprechend einer Emissionsminderung von 0,35 Mio. t CO₂.

7.4 Optionen und Potenziale im Luftverkehr

Der Luftverkehr trug 1998 mit 262,1 PJ zum Endenergieverbrauch in Deutschland bei, wovon nur 1 PJ auf Flugbenzin entfielen und 261,1 PJ auf Flugturbinenkraftstoffe (Kerosin).

Einsparungen können durch eine weitere konsequente Anwendung des Leichtbaus erreicht werden. Die Substitution von Metallen durch faserverstärkte Kunststoffe kann vorangetrieben werden. Neue Aluminium-Lithium oder Aluminium-Scandium-Legierungen sind ebenso geeignet, zu Gewichtsverminderungen beizutragen. Daneben können anstatt massiver Metallbauteile Metallschäume eingesetzt

werden. Masuhr et al. (1991) gehen von einem Minderungspotenzial für den Energieverbrauch von 8 bis 15 % durch die Reduzierung des Gewichts aus.

Die Turbinenmotoren von Flugzeugen wurden in den vergangenen Jahren kontinuierlich verbessert. Grund dafür war nicht nur die Absicht, die Energieeffizienz zu steigern, sondern vor allem auch, steigende Anforderungen an den Lärmschutz und an die Luftreinhaltung zu erfüllen. Dennoch sind auch bei Flugzeugturbinen noch Einsparpotenziale in der Größenordnung von 10 % vorhanden.

Die Aerodynamik von Flugzeugen kann auch heute noch weiterentwickelt werden. Der Flugzeughersteller Airbus hat es sich zum Ziel gesetzt, den Energieverbrauch bei neu entwickelten Flugzeugen durch verbesserte Aerodynamik um 15 % zu senken (Daimler-Chrysler AG, 1999). Auch beim Flugzeugbestand können noch Verbesserungen der Aerodynamik erreicht werden, indem die Flügellenden mit Winglets ausgestattet werden (vgl. z. B. Preussag, 2001). Mit diesen veränderten Flügelspitzen sind Energieeinsparungen von 3 bis 4 % möglich.

Insgesamt wurde das Einsparpotenzial für den Luftverkehr auf 30 % eingeschätzt. Bei einem Verbrauch von 262,1 PJ an Treibstoffen entspricht dies einer Verminderung der CO₂-Emissionen um 5,8 Mio. t.

Im „Report of the Group of Personalities“ (2001) hat sich die europäische Luftfahrtindustrie zusammen mit der EU das Ziel gesetzt, durch intensiverte Forschung bis zum Jahr 2020 die CO₂-Emissionen pro Passagierkilometer um 50 % zu senken. Die EU hat dieses Ziel in ihre Forschungsprogramme aufgenommen. Auch wenn diesem politischen Konzept noch keine voll entsprechenden technischen Optionen gegenüberstehen, gibt es die Größenordnung der Emissionsminderungen vor, die längerfristig erreichbar sein sollten.

8 Spezielle Optionen bei Energieumwandlungstechnologien

8.1 Potenziale zur Minderung von CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Brennstoffzellen in der öffentlichen und industriellen Kraftwärmekopplung

Die Brennstoffzelle stellt nach heutigen Erwartungen eine sehr gute Option zur effizienten Strom- und Wärmeerzeugung dar und bieten sich damit als KWK-Technologie an. Konventionelle KWK-Anlagen werden heute mit Dampfkraftwerken, Gasturbinen oder mit Gasmotoren betrieben. Die damit erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade liegen zwischen 25 und 45 % bei Gasmotoren, 30 und 40 % bei Gasturbinen und bei über 50 % bei Gas- und Dampfkraftwerken. Bei Brennstoffzellen werden dagegen elektrische Wirkungsgrade im Bereich von 50 bis 65 % erwartet. Der hohe Stromwirkungsgrad ist langfristig generell, also auch bei KWK-Anlagen als Vorteil zu werten, da davon ausgegangen wird, dass der Stromverbrauch weiterhin steigen wird, während ein rückläufiger Wärmebedarf prognostiziert wird. Insbesondere die großen Potenziale zur Reduzierung des Energieverbrauchs für die Raumwärme stützen diese Erwartung.

In einer Brennstoffzelle findet eine direkte Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie in elektrischen Strom ohne den Umweg über die Zwischengrößen Wärme und mechanische Energie und der damit verbundenen Verluste statt. Energieausnutzungsgrade von mehr als 90% werden so möglich. Brennstoffzellen gehören wie Batterien und Akkumulatoren zu den galvanischen Elementen. Brennstoffzellen können jedoch, anders als Batterien und Akkumulatoren, theoretisch über eine beliebige Zeit betrieben werden, da Brennstoff und Oxidationsmittel kontinuierlich von außen zugeführt und die anfallenden Reaktionsprodukte ebenso kontinuierlich abgeführt werden. Als Brennstoff dienen Gase wie Wasserstoff oder Erdgas, als Oxidationsmittel kann Luft oder reiner Sauerstoff verwendet werden.

Der Aufbau einer elektrochemischen Zelle folgt stets dem selben Grundprinzip: Eine Anordnung von Anode und Kathode und einem die Elektroden trennenden, ionenleitenden Elektrolyten. Bei der „kalten“ elektrochemischen Verbrennung laufen an Anode und Kathode die jeweiligen Reaktionen ab, der Brennstoff wird in zwei räumlich getrennten Teilreaktionen elektrochemisch oxidiert. Die chemische Energie reaktiver Stoffpaare wird also direkt in elektrische Energie und Wärme umgewandelt, ohne dass eine sichtbare Verbrennung stattfindet. Eine solche chemische Reaktion ermöglicht einen höheren elektrischen Wirkungsgrad als die direkte „heiße“ Verbrennung. Der elektrochemische Prozess der Brennstoffzelle ist

kein Carnot-Prozess wie bei Wärmekraftmaschinen (Dampfkraftwerk, Kolbenmotor) und kann damit theoretisch höhere Wirkungsgrade erzielen.

Für die stationäre Kraft-Wärme-Kopplung eignen sich Brennstoffzellensysteme mit einer hohen Betriebstemperatur, um zusätzlich zur Stromerzeugung auch eine Wärmeauskopplung durchführen zu können. Als relevante Brennstoffzellentypen sind unter dieser Bedingung in erster Linie die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) und die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) zu erwähnen. Die Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) und die Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) werden ebenfalls in der stationären Kraft-Wärme-Kopplung verwendet, weisen aber geringere elektrische Wirkungsgrade als konventionelle Konkurrenztechnologien oder aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus ein niedrigeres Potenzial zur Wärmeauskopplung auf

8.1.1.1 Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) gehört mit einer Betriebstemperatur von 600-650°C zu den Hochtemperaturzellen. Der Elektrolyt setzt sich aus Lithium-, Kalium- und/oder Natriumkarbonat zusammen und ist in eine keramische und poröse Matrix aus LiAl_2O_3 eingelagert. Bei Betriebstemperatur ist dieser Karbonatmix vollständig verflüssigt und die in der Schmelze enthaltenen Karbonat-Ionen können sich in ihrer Funktion als Ionenleiter (Ladungsträger) von der Kathode zur Anode bewegen. An der Anode geben die Ionen zwei Elektronen ab und reagieren mit dem an der Anode vorbeigeführten Wasserstoff zu Wasser und Kohlendioxid. Das Kohlendioxid wird zusammen mit dem Luftsauerstoff im Verhältnis Sauerstoff zu CO_2 von 1:2 zur Kathode geführt. An der Kathode nimmt das Kohlendioxid zwei Elektronen und ein Sauerstoffatom auf, wodurch ein neues Karbonat-Ion gebildet wird.

Da CO_2 ein Teil der Zellreaktion ist, sind Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen sehr gut zur Erzeugung von Strom und Wärme aus kohlenstoffhaltigen Gasen geeignet. Die relativ hohe Betriebstemperatur ermöglicht eine interne Brenngasaufbereitung von kohlenwasserstoffhaltigen Brenngasen. Eine Verstromung von regenerativen Gasen (Biogas und sonstige synthetische Gase) ohne Wirkungsgradeinbußen ist ebenfalls möglich. Die technologischen Eigenschaften der Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen Technologie führen zu einer, verglichen mit anderen Energiewandlern, effizienten Verstromung von „Schwachgasen“ (Nutzung des Heizwertes von CO und CO_2 zur Bildung der Karbonationen usw.). Die Möglichkeit zur internen Reformierung reduziert in erheblichem Maße den apparativen Aufwand, der ansonsten für eine externe Brenngasaufbereitung aufgewandt werden muss. Andererseits sind Anlagen mit externer Reformierung regelungstechnisch leichter steuerbar.

Der Aufheizvorgang von Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen dauert mehrere Stunden und ihre Zyklusfestigkeit ist als eher gering einzuschätzen. Daher sollte die Brennstoffzelle permanent auf Betriebstemperatur gehalten werden. Bis zu einer Last von 40 % der Nennlast weist die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle sehr gute Wirkungsgrade auf. Unterhalb nehmen die Wirkungsgrade deutlich ab, da der Eigenbedarf von Peripheriegeräten und zum Warmhalten Die Lastwechselgeschwindigkeit für Minutenreserve (Nachfahren von Lastgängen) ist als potentiell sehr hoch einzuschätzen, die Regelreserve im Sekundenbereich (Frequenzregelung) ist potentiell möglich durch eine schnelle Lastanpassung. Diese Möglichkeit wird jedoch mit zunehmender Anlagengröße schwieriger, da die Reformer und Reaktoren zur Brenngasaufbereitung Reaktionszeiten aufweisen.

Bei größeren Anlagen kann prinzipiell eine Gas- oder eine Gas- und Dampfturbinen (Hybridbetrieb) zur Nutzung von nicht umgesetztem Brenngas, Wärme und Restenthalpie nachgeschaltet werden, um den elektrischen Wirkungsgrad der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle weiter zu erhöhen. In dieser Konfiguration sinken jedoch die Gesamtwirkungsgrade im Teillastbetrieb deutlich schneller ab, da die nachgeschalteten Turbinen ein schlechteres Teillastverhalten aufweisen.

Als Brennstoff können gasförmige Kohlenwasserstoffe wie Erdgas, Biogas, Klärgas, Deponiegas, Kohlegas oder Gase aus Reststoff-Vergasern verwendet werden, ebenso Methanol und andere flüssige Kohlenwasserstoffe.

Der elektrische Wirkungsgrad von heute in der Entwicklung befindlichen Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (z. B. Hot Module von MTU) liegt zwischen 50-52%, Nutzwärme kann bei einer Temperatur von 450°C ausgekoppelt werden. Mit der Hochtemperatur-Abwärme kann heißer Wasserdampf erzeugt werden, der als Prozessdampf in vielen Anwendungen benötigt wird. Zusammen mit Absorptionskälteanlagen kann damit ebenfalls effizient Kälte erzeugt werden.

8.1.1.2 Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)

Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) oder Hochtemperatur-Festelektrolyt-Brennstoffzellen arbeiten bei Betriebstemperaturen zwischen 800°C und 1000°C und weisen damit von allen Brennstoffzellen die höchste Betriebstemperaturen auf. Eine Festoxid-Brennstoffzelle besteht aus einer dreischichtigen keramischen Verbundstruktur (Anode, Elektrolyt, Kathode). Bei den Elektrolyten handelt es sich um keramische Materialien, in den meisten Fällen wird yttriumstabilisiertes Zirkonoxid (YSZ) verwendet. Durch die Dotierung mit Yttriumoxid (Y₂O₃) werden zwei wesentliche Voraussetzungen für ein Funktionieren des Elektrolyten gewährleistet: der Elektrolyt bleibt im Temperaturbereich von seinem Schmelzpunkt bis zur Raumtemperatur mechanisch stabil, und der Elektrolyt wird leitend für Sauerstoffionen. Die Kathodenseite wird von O₂ oder Luft als

Oxidationsgas angeströmt, aus dem molekularen Sauerstoff entstehen unter Aufnahme von Elektronen Sauerstoffionen. Diese können sich durch den Elektrolyten bewegen und bilden mit dem auf der Anodenseite zugeführten Wasserstoff oder einem H₂/H₂O/CO-Gemisch als Brenngas unter Abgabe von Elektronen Wasser bzw. ein Gemisch aus Wasser und Kohlendioxid.

Als Brenngase können in Festoxid-Brennstoffzellen Erdgas und H₂ verwendet werden. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur kann eine interne Reformierung von Erdgas oder höheren Kohlenwasserstoffen erfolgen. Eine interne Reformierung wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad des Systems aus, da eine geringere Verdichterleistung benötigt wird und ein Luftvorwärmer mit einer geringeren thermischen Leistung installiert werden kann. Auch in Festoxid-Brennstoffzellen-Systemen muss eine Reinigung des Brenngases von Schwefel und Chlor erfolgen. Nach der Reinigung des Brenngases wird dieses durch eine Strahlpumpe in den Vorreformer eingespritzt, in dem die höheren Kohlenwasserstoffe und einige Prozent des Methans reformiert werden. Nach der Vorreformierung gelangt die Mischung aus Gas und Dampf in die interne Reformierungszone, in der das Methan vollständig zu Wasserstoff und CO₂ umgesetzt wird. Das reformierte Brenngas wird schließlich in die Zelle eingeleitet.

Der Aufheizvorgang von Festoxid-Brennstoffzellen dauert mehrere Stunden. Daher sollte auch bei diesen Systemen der Stack permanent auf Betriebstemperatur gehalten werden. Genauso ist die Lastwechselgeschwindigkeit für Minutenreserve (Nachfahren von Lastgängen) als potentiell sehr hoch einzuschätzen, die Regelreserve im Sekundenbereich (Frequenzregelung) ist potentiell möglich durch eine schnelle Lastanpassung durch eine Brenngasaufwertung (Beimischung von reinem Wasserstoff) oder eine Erhöhung des Druckes (Erhöhung der Massenströme) bei Druckbetrieb der Anlage. Diese Möglichkeit wird jedoch mit zunehmender Anlagengröße schwieriger, da die Reformer und Reaktoren zur Brenngasaufbereitung Reaktionszeiten aufweisen.

In Deutschland werden tubulare und planare Festoxid-Brennstoffzellen entwickelt. Die Siemens AG z. B. konzentriert sich auf die Entwicklung tubularer Festoxid-Brennstoffzellen. Dieses Konzept ist am weitesten fortgeschritten, eine Demonstrationsanlage soll im Herbst 2003 in Betrieb gehen.

Bei größeren Festoxid-Brennstoffzellen kann ebenso wie bei der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle eine Gas- oder eine Gas- und Dampfturbinen (Hybridbetrieb) zur Nutzung von nicht umgesetztem Brenngas, Wärme und Restenthalpie nachgeschaltet werden, um den elektrischen Wirkungsgrad weiter zu erhöhen. Die Einschränkungen bezüglich des Teillastverhaltens gelten auch hier.

8.1.1.3 CO₂-Minderungspotenzial

Nach Oertel u. Fleischer (2000), weisen Brennstoffzellen auch unter Einbeziehung der vorgelagerten Energieketten sowohl als KWK-Anlagen als auch bei zentraler Stromerzeugung in Bezug auf die Umwelteinwirkungen Vorteile gegenüber den konkurrierenden konventionellen Systemen auf. Der Einsatz von Brennstoffzellen ist dazu geeignet zur Minderung von Treibhausgasemissionen beizutragen. Im Vergleich mit ungekoppelter Erzeugung lassen sich mit Brennstoffzellen im industriellen KWK-Betrieb Minderungen der Treibhausgasemissionen in der Größenordnung von 20-40 % erreichen.

Brennstoffzellen werden im Betrieb mit einem festen elektrischen Wirkungsgrad gefahren. Dieser liegt deutlich höher als bei anderen Technologien, die in Blockheizkraftwerken zum Einsatz kommen wie z. B. Gasmotoren. Die elektrischen Wirkungsgrade liegen hier nach Oertel u. Fleischer (2000) bei 26 bis 34 %. Für Gasmotoren der neuesten Generation werden Wirkungsgrade im Bereich von 45 bis 47 % erwartet. Brennstoffzellen erreichen bereits elektrische Wirkungsgrade zwischen 50 und 52 % (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle). Bei größeren Anlagen werden in der Bauweise als Hybrid-Zellen mit Gasturbinen Wirkungsgrade von 65 bis 68 % angestrebt. Auch wenn noch keine durchschnittlichen Wirkungsgrade bekannt sind, kann davon ausgegangen werden, dass mit Brennstoffzellen elektrische Wirkungsgrade erreicht werden, die um 15 bis 20 Prozentpunkte höher sind, als bei herkömmlichen KWK-Technologien. Die Gesamtwirkungsgrade liegen in einem ähnlichen Bereich (vgl. auch hierzu Oertel u. Fleischer, 2000). Die Minderungen der CO₂-Emissionen, die sich aus der Verwendung von Brennstoffzellen erzielen lassen, liegen im Bereich von 12 t/TJ, wenn man von heute verfügbaren Prototypen ausgeht und können bis 24 t/TJ erreichen, wenn man die Zielwerte der Brennstoffzellenentwicklung und modernste Gasmotoren miteinander vergleicht.

Bezogen auf den Anteil der öffentlichen und industriellen KWK von rund 12 % an der Stromerzeugung hätte der Einsatz von Brennstoffzellen 1998 Minderungen der CO₂-Emissionen von 2,8-5,6 Mio. t. bewirkt. Wenn man die Potenziale der industriellen KWK, die von der AGFW errechnet worden sind (AGFW, 2000), zugrunde legt, bewirkt eine brennstoffzellengetriebene Kraft- und Wärmeenergieerzeugung Emissionsminderungen zwischen 10 und 20 Mio. t. CO₂ gegenüber klassischen KWK-Technologien.

8.2 Optionen zur Emissionsminderung durch Abtrennung und Speicherung von CO₂

Vor allem im angelsächsischen Raum wird heute die Abtrennung und Speicherung von CO₂ als Option zur Minderung der Treibhausgasemissionen intensiv untersucht (vgl. z. B. Holtz et al., 1999 oder Brewer et al., 1999). Im deutschsprachigen Raum wird dagegen diese Option nur wenig beachtet. Mit ein Grund dafür ist die kritische Bewertung dieser Option, die nicht dazu geeignet ist den Verbrauch an fossilen Energieträgern zu mindern und damit nicht als nachhaltig angesehen wird.

8.2.1 Technische Optionen zur Abtrennung von CO₂

Die Abtrennung von CO₂ kann sowohl aus einem Prozess heraus erfolgen, bei dem CO₂ anfällt, wie z. B. bei Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger. Dabei kann die Abtrennung in Form eines nachgeschalteten Verfahrens aus dem Abgasstrom erfolgen, vergleichbar der Verfahren zur Entschwefelung von Rauchgasen. Alternativ könnte die Abtrennung auch direkt aus der Atmosphäre betrieben werden. Da der Energieaufwand für die Abtrennung und Aufkonzentrierung von CO₂ mit steigender Ausgangskonzentration deutlich absinkt, bieten Prozesse mit CO₂-reichen Rauchgasen, wie Herstellung von Kalk oder Zement große Vorteile gegenüber der Abtrennung aus der Atmosphäre. Auch die Rauchgase aus Kraftwerken bieten noch deutlich bessere Voraussetzungen als die freie Atmosphäre für die Abtrennung von CO₂.

Zur technischen Durchführung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung wie z. B. Absorptions-Prozesse, die in der chemischen Industrie weit verbreitet sind, Adsorptionsprozesse, Membranprozesse oder kryogene Prozesse, die seit langem in der Luftzerlegung eingesetzt werden. Ebenfalls zur Gewinnung eines weitgehend reinen CO₂-Stroms ist die Verbrennung mit reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel. Dieses Verfahren bietet weitere Vorteile wie höhere thermische Wirkungsgrade und geringere NO_x-Emissionen.

Alle Verfahren sind mit einem erhöhten Energieaufwand verbunden und führen auf ein Kraftwerk angewendet zu einem Wirkungsgradverlust. Nach Radgen (1999) müssen je nach Verfahren Wirkungsgradverluste zwischen 6 und 19 % angesetzt werden. Um die gleiche Nettoleistung zu erzielen ist damit ein größerer Einsatz von fossilen Energieträgern notwendig.

8.2.2 Verwendung und Speicherung von CO₂

Die industrielle Verwendung von CO₂ ermöglicht es, die Aufwendungen für die Abtrennung durch die Einführung in einen Wertschöpfungsprozess zumindest

teilweise zu kompensieren. Dabei bieten sich vor alle Syntheseprozesse an wie die Herstellung von Polycarbonaten, Polyurethanen, anorganischen Karbonaten, von Methanol oder von Harnstoff. Daneben existieren weitere Anwendungen für die direkte Nutzung des CO₂: als Kohlensäure in der Nahrungs- und Genussmittelindustrie, als Lösungsmittel für Extraktionen, als Inertgas oder zur Wasseraufbereitung. Bei der industriellen Verwendung ist jedoch zu beachten, dass sich die Lebensdauer der verschiedenen Produkte stark unterscheidet und damit auch die Periode, für die das CO₂ aus der Atmosphäre entfernt ist. Die Spanne reicht von wenigen Jahren z. B. bei Agro-Chemikalien bis zu Jahrhunderten z. B. bei anorganischen Karbonaten.

CO₂ kann nach der Abtrennung auch in unterirdische Lagerstätten verbracht und damit längerfristig aus dem atmosphärischen Geschehen entfernt werden. Hierzu kommen tiefe Grundwasserleiter (Aquifere), Erdöl- und Erdgaslagerstätten, Kohleflöze, Kavernen oder Salzstöcke in Frage. Die Verpressung von CO₂ in genutzte Erdölquellen dient gleichzeitig der Erhöhung der Förderleistung (enhanced oil recovery) und bietet damit weitere ökonomische Vorteile. Neben den gerade ausgebeuteten Lagerstätten können aber auch erschöpfte Öl- und Gasreservoir zur Entsorgung von CO₂ genutzt werden. Nach einer Abschätzung von Holloway et al. (1996) bestehen in der Europäischen Union unterirdische Entsorgungskapazitäten in der Höhe von rd. 800 Gigatonnen CO₂. Davon entfallen jedoch nur rund 4.4 Gt auf Deutschland. In der Abschätzung von Holloway sind Kohlevorkommen als CO₂-Lagerstätte nicht berücksichtigt worden und die Aufnahmefähigkeiten von unterseeischen Aquiferen ist in vielen Fällen noch nicht einmal näherungsweise bekannt.

Das größte Aufnahmepotenzial für CO₂ bieten die Ozeane, die bereits heute durch die Austauschprozesse mit der Atmosphäre erhebliche Mengen aufnehmen. Die Einleitung in Ozeane könnte in Form von Trockeneis oder über Pipelines durchgeführt werden. Da die Ozeane permanent durchmischt werden und im Gleichgewicht mit der Atmosphäre stehen, bewirken die meisten Einleitungsverfahren nur eine relativ kurze Speicherung des CO₂. Je nach Tiefe der Einleitung beträgt die Rückhaltungsdauer nur wenige Jahrzehnte. Außerdem sind die Auswirkungen der Einleitung von großen Mengen CO₂ auf die marine Flora und Fauna noch nicht ausreichend geklärt. Die Kostenschätzungen für die Entsorgung, die für die USA erarbeitet wurden, werden von Radgen (1999) folgendermaßen zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Kostenschätzungen für die Entsorgung von CO₂ für die USA

Technik zur CO ₂ -Entsorgung	Nettokosten (\$/t. CO ₂)	
	hoch	niedrig
Abscheidung und Nutzung	5	0
Abscheidung für verbesserte Erdölförderung	45	10
Abscheidung und geologische Entsorgung	76	24
Abscheidung und Entsorgung im Ozean	91	31

9 Optionen und Potenziale durch Kreislaufschließung und umweltfreundliche Produktkonzepte

Diese technologische Option zur indirekten Verminderung von energiebedingten Treibhausgasemissionen ist derzeit noch wenig untersucht. Prinzipiell unterscheidet die Literatur eine Reihe technologischer Möglichkeiten. Derzeit gibt es für Deutschland kaum quantifizierte Analysen der einzelnen Möglichkeiten, so dass in Abschnitt 9.2 nur eine Reihe von Fallbeispielen gegeben werden können.

9.1 Recycling und umweltfreundliche Produktkonzepte als Problemlösungsstrategien

Zur Erreichung der CO₂-Reduktionsziele werden hauptsächlich technologische Lösungen wie eine rationelle Energieumwandlung und -nutzung oder der Einsatz kohlenstoffarmer Energieträger diskutiert, die vorrangig der Umweltschutzstrategie umweltfreundliche Produktionsverfahren zugeordnet werden können. Punktuell werden auch End-of-pipe-Technologien thematisiert, z. B. bei der Abscheidung und Deponierung von CO₂ oder der Reduktion der N₂O-Emissionen aus der Adipinsäureherstellung. Losgelöst von diesen technischen Möglichkeiten werden – insbesondere in abfallpolitischen Zusammenhängen – zudem auch Recyclingstrategien sowie vor dem Hintergrund des Schlagwortes einer Steigerung der Materialeffizienz umweltfreundliche Produktkonzeptionen thematisiert:

- Ziel von Recyclingstrategien ist es, Produktionsrückstände, Altmaterialien und Abfälle wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen. Erfolgt eine werkstoffliche Verwertung - bei der deutlich höhere Qualitätsanforderungen an die recycelten Stoffe zu stellen sind als bei einer rohstofflichen oder thermischen - wird eine teilweise massive Umlenkung von Stoffströmen in Gang gesetzt, die zur Reduktion der energieintensiven Produktion von Primärwerkstoffen führt (vgl. Tabelle 9-1)
- In den letzten Jahren werden verstärkt umweltfreundliche Produktkonzepte diskutiert (vgl. Deutsch, 1994; Hiessl et al., 1995; Scholl/Zundel, 1999; Fleig, 2000; Hirschl et al., 2001). Sie haben zum Ziel, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern bzw. eine Nutzungsintensivierung herbeizuführen oder durch neuartige Produkte und Konstruktionen, verbesserte Materialeigenschaften (z. B. Geräte-Leasing, Car-Sharing) oder Produktsubstitutionen eine Dematerialisierung herbeizuführen. Damit sollen nicht nur Werkstoffe eingespart, sondern zusätzlich auch die Fertigung von Produkten durch dienstleistungsähnliche Aktivitäten substituiert werden. Hierbei können je nach Fallbeispiel stärker nutzer- oder produktionsorientierte Dienstleistungen im Vordergrund stehen.

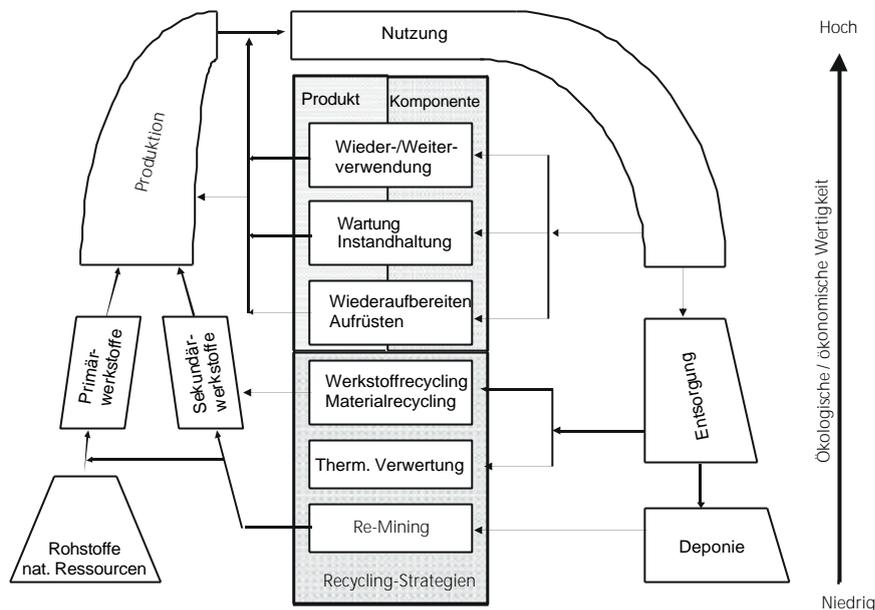
Tabelle 9-1: Entwicklung der Recycling-Quoten energieintensiver Werkstoffe in Deutschland, 1974-2000

	1974	1980	1990	1995	1997	1999/ 2000
Energieintensive Konstruktionswerk- stoffe:						
Rohstahl	28	k.A.	32 ⁵⁾	38	40	42
Aluminium ¹⁾	32	36	43 ⁵⁾	42	43	43 ³⁾
Kunststoffe	0			13	16	ca. 16
Energieintensive Massenbauwerkstoffe: Zement, Beton ⁹⁾ Mauer- und Dachziegel Bitumen, Ausbauasphalt	noch keine Daten vorhanden					
sonstige energieintensive Werkstoffe für Verbrauchs- und Investitionsgüter:						
Glas ²⁾	6	20	45	75	79	81 ³⁾
Papier und Pappe ⁴⁾	44	42	49 ⁶⁾	58	59	60
Kupfer ⁷⁾	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50
Blei ⁸⁾	44	45	54 ⁵⁾	52	50	55 ³⁾

1) Anteil Sekundäraluminium an gesamter Produktion (Output); 2) Verwertungsquote Behälterglas; 3) 1999; 4) Einsatzquote (Altpapierverbrauch in Prozent an der Papier- und Pappeerzeugung; abzüglich AP-Verbrauch für DIP-Stoff-Export); 5) alte Bundesländer; 6) gesamte Bundesrepublik; 7) Verhältnis der Menge pro Jahr an Sekundärkupfer zur gesamten Produktion; 8) Anteil Sekundärblei an Erzeugung von raff. Blei, 9) Kiessubstitution

Der verstärkte Einsatz von Recyclingstrategien und umweltfreundlichen Konzepten zur Lebensdauerverlängerung und Produktnutzungsintensivierung führt dazu, dass Material intensiver und länger im Wirtschaftskreislauf verbleibt und dadurch insgesamt weniger Primärressourcen eingesetzt werden müssen, deren Gewinnung und Verarbeitung einen besonders hohen spezifischen Energiebedarf aufweist. Dem stehen zusätzlicher Energiebedarf und die Emissionen in die Umwelt entgegen, die bei der Kreislaufführung oder dienstleistungsähnlichen Aktivitäten entstehen. Hierbei ist es das Kennzeichen der umweltfreundlichen Produktkonzepte, dass sie die Kreislaufführung auf einer vergleichsweise hohen Wertschöpfungsstufe durchführen (vgl. Abbildung 9-1).

Abbildung 9-1: Produkttechnische Strategien im Kreislauf



Quelle: Hiessl et a.. 1995, S. 92

Gegenüber Strategien wie der rationellen Energienutzung oder dem Einsatz erneuerbarer Energien sind Recyclingstrategien und insbesondere umweltfreundliche Produktkonzepte dadurch gekennzeichnet, dass

- ihr Einsatz Veränderungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette impliziert (was eine Zurechnung der Minderungserfolge zu einzelnen Akteuren erschwert),
- sie dadurch gleichzeitig zu erheblichen sektoralen Veränderungen führen, sowie
- sie in weitaus höherem Maße mit den Kernbereichen der unternehmerischen Leistungserstellung abgestimmt werden müssen, da der Anpassungsbedarf nicht nur den Produktionsprozess betrifft, sondern auch Beschaffung, Absatz bis hin zur strategischen Produktplanung und dem Selbstverständnis des Unternehmens als Warenproduzent oder Dienstleister. Diese strukturellen Verschiebungen wurden bisher in Szenarien mit hohen Energieeffizienzpotenzialen nicht berücksichtigt.

Bisher wurde nicht systematisch untersucht, welches Reduktionspotenzial zur Verminderung klimarelevanter Spurengase durch solche Strategien besteht. Daher wird aufbauend auf den Abschätzungen von Walz et al. (2001) an Hand von Beispielen gezeigt, in welchen Größenordnung des Reduktionspotenzial liegt.

9.2 Größenordnung des CO₂-Reduktionspotenzials für ausgewählte Fallbeispiele

9.2.1 Auswahl der Fallbeispiele

Zur Abschätzung der Größenordnung des CO₂-Reduktionspotenzials wurden von Walz et al. (2001) ausgewählte Fallbeispiele analysiert, die unterschiedliche Ausprägungen von stofflichen Recyclingstrategien und umweltfreundlichen Produktkonzepte abdecken. Folgende **Fallbeispiele** wurden untersucht:

- "Nachhaltiger Umgang mit Papier": Die Papierindustrie zählt zu den energie- und abwasserintensiven Branchen und weist seit den achtziger Jahren überdurchschnittliche Wachstumsraten der Bruttowertschöpfung von etwa 4% pro Jahr auf. Gleichzeitig bildet der Stoffstrom Papier ein hervorragendes Beispiel für Möglichkeiten eines Stoffstrommanagements entlang der Wertschöpfungskette, das verstärkte Recyclingmaßnahmen mit neuen Produktkonzeptionen (z. B. Printing-on-Demand, Dematerialisierung von Informationsträgern) kombiniert (International Institute for Environment and Development, 1996; Plätzer, 1998; van den Reek, 1999).
- "Verstärktes Recycling von hochwertigen Kunststoffen": Der Problemdruck bei der Verwertung und Entsorgung von Kunststoffabfällen dürfte eher noch ansteigen, da die Kunststoffbranche mit 6 % pro Jahr mit die höchsten Wachstumsraten aller Wirtschaftszweige in Deutschland aufweist. Da die meisten Kunststoffprodukte langlebig sind, erfolgt der Anstieg des als Abfall zu verwertenden Kunststoffs zeitverzögert zum Kunststoffverbrauch. Entsprechend den Wachstumsraten der vergangenen Jahre wird daher das Abfallaufkommen in den nächsten Jahren massiv zunehmen. Im Unterschied zur bisherigen Diskussion, die sich sehr stark mit den Alternativen rohstoffliche versus energetische Verwertung von Kunststoffabfällen befasst, wurde im Fallbeispiel untersucht, wie sich eine deutliche Zunahme des werkstofflichen Recyclings hochwertiger Kunststoffabfälle auswirken würde (Vgl. z. B. Janz/Weiss, 1996; Dehoust et al., 1999; Heyde/Kremer, 1999; Pilz et al., 1999; Schön et al., 2000).
- "Lebensdauererlängerung von Produkten": Zur Bewertung des Reduktionspotenzials durch Lebensdauererlängerung wurden das Beispiel PKW als langlebiges Gebrauchsgut gewählt. Da bei PKW ein bedeutender Reparatursektor besteht (vgl. Fleig, 2000), können bei ihnen die Effekte eines verstärkten Übergangs von der Neuproduktion auf Wartung und Reparatur analysiert werden.
- "Nutzungsintensivierung von Produkten": In diesem Fallbeispiel werden die Wirkungen untersucht, die sich aus der gemeinsamen Nutzung eines Gebrauchsgutes ergeben. Analysiert wird das Car-Sharing, eines zur Zeit sehr stark in der Diskussion befindlichen Beispiels für eine Nutzungsintensivierung (vgl. Baum/Pesch, 1995; Petersen, 1995; Pretenthaler/Steininger, 1999). Da dieser Bereich zudem durch die Gründung und Expansion von Car-Sharing-Unterneh-

men gekennzeichnet ist, konnten mit der Auswahl dieses Fallbeispiels gleichzeitig die Verschiebungen untersucht werden, die sich aus dem Übergang von der Neuproduktion des Gutes hin zu dienstleistungsähnlichen Tätigkeiten ergeben.

9.2.2 Vorgehensweise und Szenarienbildung

Bei Recyclingstrategien und umweltfreundlichen Produktkonzeptionen beruht die angestrebte Umweltwirkung auf strukturellen Verschiebungen, die in der Summe zu einer Verminderung des Materialdurchsatzes durch die Technosphäre und der damit verbundenen CO₂-Emissionen führen. Es ist daher nicht möglich, bei der Wirkungsanalyse zwischen Umweltentlastung und strukturellen (ökonomischen) Wirkungen zu unterscheiden. Vielmehr ist die Verwendung eines integrierten Analyseinstrumentariums erforderlich, das Strukturwirkungen sowie die erreichbaren Umweltentlastungen unter einheitlichen Rahmenbedingungen und fallspezifischen Annahmen simultan analysiert. Hierzu wurde ein Vorgehen gewählt, das sich grob in die drei Schritte Analyse auf Mikroebene, Szenarienbildung und Wirkungsanalyse mit einem integrierten mesoökonomischen Modell einteilen lässt:

- Für jedes Fallbeispiel wurde eine detaillierte Analyse auf der Mikroebene durchgeführt, um technisch-organisatorische Innovationen wie z. B. Produktkennzeichnung und sortenreine Sortierung von Kunststoffabfällen, printing-on-demand oder nutzerfreundliche elektronische Displays zur Substitution von Papier durch IuK-Technik, produktbegleitende Informationssysteme und verbesserte Austauschbarkeit von lebensdauerbegrenzenden Pkw-Teilen oder vereinfachter Zugang zu Car-Sharing Fahrzeugen durch neue Logistikkonzepte und IuK-Technik zu erfassen. Da diese Entwicklungen z. T. weniger durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung bestehender Entwicklungspfade als vielmehr durch einen Trajektorienwechsel gekennzeichnet sind, musste sich die prospektive Analyse z. T. stärker einer technologisch fundierten Technikvorausschau bedienen.
- Aufbauend auf den Ergebnissen der Mikroanalysen wurden Szenarienanalysen durchgeführt. Hierbei wurde jeweils ein Referenz- und Nachhaltigkeitsszenario mit dem Zeithorizont 2020 gebildet, die sich durch den verstärkten Einsatz der betrachteten Umweltschutzstrategien unterscheiden. Die Szenarienbildung baut auf der Analyse der Potenziale auf. Um möglichst plausible Szenarienannahmen treffen zu können, kam ein Mix an Untersuchungsmethoden zum Einsatz, der von der Auswertung von Literatur und Herstellerangaben über Hinweise aus Delphi-Untersuchungen zur technologischen Weiterentwicklung (ISI, 1998) bis hin zum Einsatz von Stofffluss-Modellen reicht. Aufgrund der vorhandenen Datenlage, des Forschungsstandes und der Möglichkeit, auf detaillierte Sektormodelle zurückgreifen zu können (Patel, 1999; Nathani, 2000) sind hierbei die Ergebnisse zu den Fallbeispielen Papier und Kunststoff als deutlich belastbarer einzustufen als für die Fallbeispiele Lebensdauerverlängerung von Pkw und Car-

Sharing, für die noch erheblicher Forschungsbedarf zur weiteren Fundierung der Potenzialabschätzungen besteht. Die sich aus diesen Analysen ergebenden Ergebnisse hinsichtlich der Szenariengestaltung sind in Tabelle 9-2 zusammengefasst.

- Zur Wirkungsanalyse war es erforderlich, die aus den Unterschieden zwischen Nachhaltigkeits- und Referenzszenario resultierenden Impulse zu quantifizieren (z. B. Zunahme des werkstofflich verwerteten Kunststoffabfalls und Abnahme der Primär-Kunststoffherzeugung). Mit Hilfe des Integrated Sustainability Assessment Systems (ISIS, vgl. Walz et al., 2001) wurden dann die sich aus diesen positiven und negativen Impulsen ergebenden Gesamtwirkungen berechnet. Neben den ökonomischen Strukturwirkungen wurden hierbei auch simultan die Umweltwirkungen berechnet. Um Verzerrungen in den Ergebnissen, die daraus resultieren können, dass im ISIS-Modell für jeden Sektor ein Durchschnittswert gebildet wird, zu vermindern, wurden einzelne Sektoren fallspezifisch in Teilsektoren disaggregiert bzw. die direkten und bedeutsamen Umweltbelastungen direkt aus bottom-up Berechnungen bzw. bestehenden Ökobilanzergebnissen integriert. Aufgrund der Geschlossenheit des Modells und der Berücksichtigung aller zur Deckung der Endnachfrage notwendigen Vorproduktionen werden die ausgewiesenen Umweltbelastungen in besonderer Weise dem Gedanken eines Life-Cycle-Assessment auf aggregierter Branchenebene gerecht.

Tabelle 9-2: Definition der Nachhaltigkeitsszenarien für das Jahr 2020

Fallbeispiel	Bestandteile des Nachhaltigkeitsszenarios
Nachhaltige Produktion und Nutzung von Papier	Reduktion des Papierverbrauchs um gut 20 % gegenüber dem Referenzszenario durch verstärktes Recycling, effizientere Papiernutzung sowie Substitution von Papier durch IuK-Technologien
Kunststoffrecycling	Werkstoffliche und rohstoffliche Verwertung von 68 % der Kunststoffabfälle
Lebensdauererlängerung von Pkw	Anstieg der Lebensdauer von Pkw um 30 %, verursacht durch verändertes Fahrzeugdesign und intensivere Instandhaltung
Nutzungsintensivierung durch Car-Sharing	Zunahme der Mitgliedschaft in Car-Sharing-Organisationen auf 10 % der Führerscheinbesitzer

9.2.3 Ergebnisse

Die sich in den Nachhaltigkeitsszenarien gegenüber den Referenzszenarien ergebenden Veränderungen in den Umweltbelastungen sind in Tabelle 9-3 aufgeführt. Es zeigt sich, dass es mit wenigen Ausnahmen immer zu einer Reduktion der Umweltbelastung kommt. In der Summe addieren sich die Emissionsreduktionen auf

knapp 29 Mio. t CO₂, was immerhin gut 3 % der heutigen bundesweiten CO₂-Emissionen entspricht. Neben der Reduktion der CO₂-Emissionen und des Energieverbrauchs werden können anhand der Szenarienrechnungen auch erhebliche Reduktionen bei anderen Umweltbelastungen und damit – in der Sprache des IPCC - secondary benefits nachgewiesen werden.

Ein Vergleich zwischen den einzelnen Fallbeispielen ist schwierig, zumal sich die Eingriffsintensität in den einzelnen Nachhaltigkeitsszenarien unterscheidet. Ein erster Eindruck kann aus Abbildung 9-2 gewonnen werden, in der die für die Fallbeispiele errechnete Veränderung der Umweltbelastung ins Verhältnis zur Umweltbelastung in Deutschland im Jahr 2000 gesetzt wird. In Abbildung 9-3 kann ein Überblick über die erwarteten Arbeitplatzeffekte der Fallbeispiele gewonnen werden. Hierbei zeigt sich beispielsweise, dass beim Energieverbrauch und den CO₂-Emissionen vor allem das Kunststoffrecycling, bei den Sonderabfällen vor allem die nachhaltige Papierproduktion und -nutzung sowie die Lebensdauerverlängerung zur Umweltentlastung beitragen. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass bei den umweltfreundlichen Produktkonzepten zur Lebensdauerverlängerung und Produktnutzungsintensivierung lediglich ein- wenn auch bedeutsames – Produkt analysiert wurde, nicht aber die Gesamtheit aller für derartige Konzepte in Frage kommender Produkte.

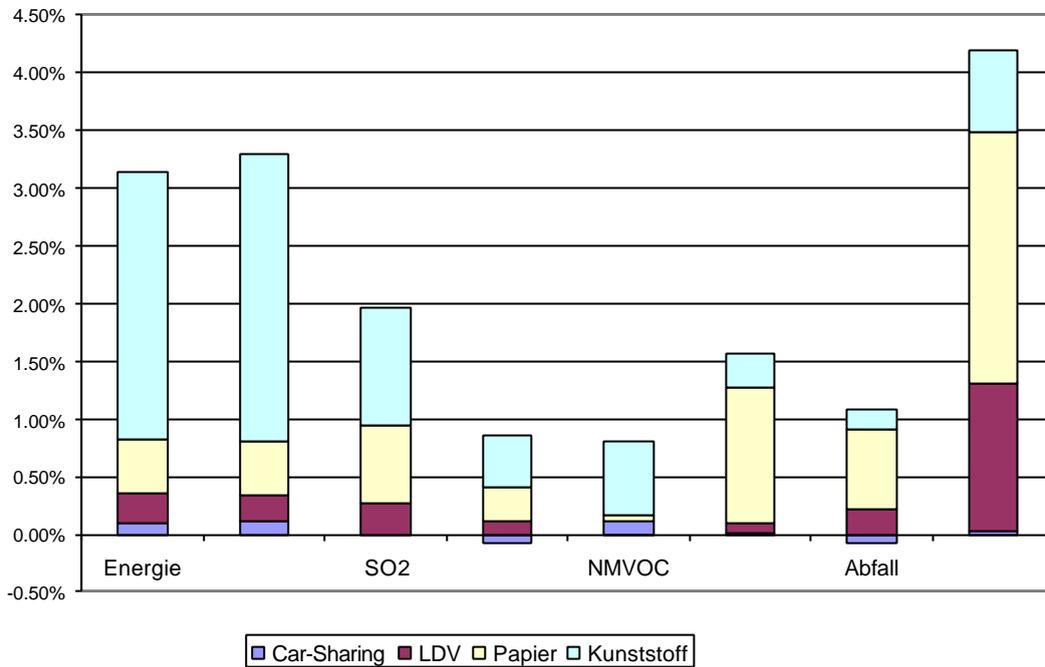
Tabelle 9-3: Größenordnung der Umweltauswirkungen der Fallbeispiele
(Differenz zwischen Referenz- und Nachhaltigkeitsszenario)

Umweltindikator	Einheit	Papier	Kunststoffrecycling	Pkw-Lebensdauerverläng.	Car-Sharing	Zum Vergleich: Deutschland 2000*
Energieverbrauch**	PJ	-68,9	-329	-34,8	-14,7	14.288
CO ₂	Mio. t	-4,0	-21,9	-2,0	-1,0	876
SO ₂	kt	-8,6	-12,9	-3,5	0,1	1.274
NO _x	kt	-4,8	-7,7	-1,9	1,4	1.679
NM VOC	kt	-0,7	-10,1	0,2	-1,8	1.550
Abwasser (ohne Kühlwasser)	Mio. m ³	-91,8	-23,1	-7,2	-0,5	7.806
Abfall zur Beseitigung (ohne Baureststoffe)	kt	-631	-150	-195	70	90.507
Sonderabfall zur Beseitigung	kt	-342	-110	-200	-4	15.664

* Daten von ISI/DIW/IFEU: Datengrundlage für umwelt deutschland 2000, Karlsruhe 2000

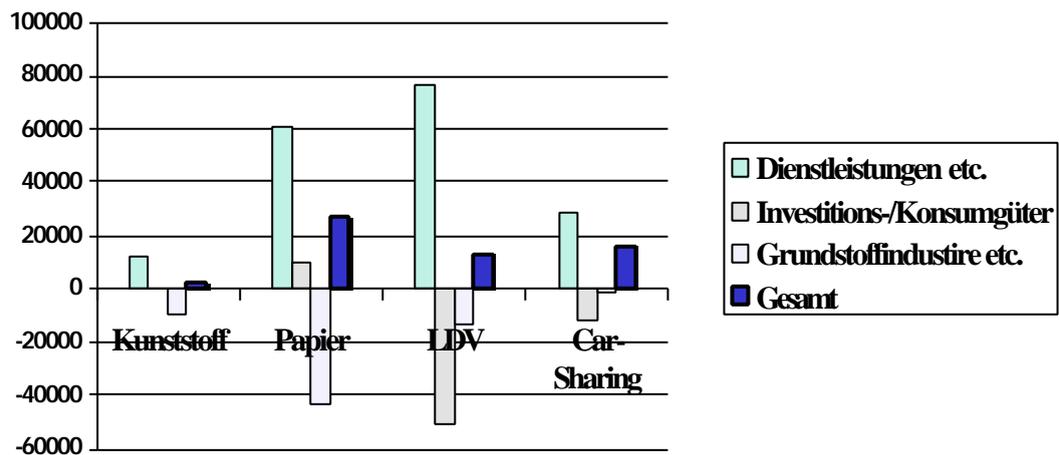
** inklusive nichtenergetischem Energieverbrauch

Abbildung 9-2: Größenordnung der Umweltentlastungen durch die Fallbeispiele im Verhältnis zur Gesamtelastung in Deutschland im Jahr 2000



Quelle: Walz et al., 2001

Abbildung 9-3: Größenordnung der erwarteten Arbeitsplatzeffekte durch die Fallbeispiele



Quelle: Walz et al., 2001

An dieser Stelle muss nochmals eindrücklich wiederholt werden, dass es sich bei diesen Ergebnissen um erste Abschätzungen der denkbaren Größenordnungen handelt. Die Forschung und das methodische Instrumentarium für aggregierte Abschätzungen ist im Bereich dieser Strategien – und hier insbesondere bei den umweltfreundlichen Produktkonzepten - bei weitem noch nicht so ausgereift wie im traditionellen Energiebereich, bei dem seit vielen Jahren auf umfangreiche und detaillierte Potenzialabschätzungen, zahlreichen Untersuchungen zu den Diffusionsbedingungen und auf umfassende methodischen Instrumentarien wie z. B. IKARUS zurückgegriffen werden kann. Dennoch zeigen bereits die hier rezipierten Fallbeispiele auf, dass Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz durchaus ein ansehnliches Potenzial zur Reduktion der Treibhausgase aufweisen.

Um zu ähnlich belastbaren Zahlen wie für die rationelle Energienutzung zu kommen, wird es aber erforderlich sein, das CO₂-Minderungspotenzial dieser Strategien in Zukunft wesentlich intensiver zu untersuchen, sowohl hinsichtlich der Erhöhung der Belastbarkeit der Ergebnisse bereits untersuchter Teilaspekte als auch bezüglich der Beantwortung offener Fragen. Der Kenntnisstand zu einzelnen Aspekten ist noch immer vergleichsweise gering, z. B. bezüglich der Frage, für welche Produktpalette ein nennenswertes Potenzial durch umweltfreundliche Produktkonzepte erwartet werden kann, oder wie groß der Einfluss der unterschiedlichen hemmenden und fördernden Diffusionsfaktoren ist. Im Bereich der energieintensiven Werkstoffe sollte bedacht werden, dass neben Recycling und Verwertung ein erhebliches CO₂-Reduktionspotenzial auch durch gezielte Maßnahmen im Hinblick auf Materialsubstitutionen oder effizientere Materialnutzung erreicht werden könnte, beides Optionen, die der intensiven Untersuchung bedürfen.

10 Literatur

- AG-Energiebilanzen (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2001): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1998. VWEW-Energieverlag, Frankfurt
- AGFW (Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. bei der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke) (2000): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbarer Energien. Frankfurt
- Almeida, A. T. de; Landwehr, M.; Eichhammer, W.; et al. (1996): Actions to Promote Energy Efficient Electric Motors. Motors Study Group. Karlsruhe/Coimbra
- Almeida, A.T. de; Guisse, F.; Previ, A.; Falkner, H.; Reichert, R.; Malmose, K. et al. (2000): Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives. Coimbra
- Audi AG (2001): Sie Summe der Erfahrungen - der Leichtbaupionier heißt A2. URL: <http://www.audi.de>
- Bady, R. u. Biermann, J.-W. (2000): Hybrid-Elektrofahrzeuge - Strukturen und zukünftige Entwicklungen, in: 6. Symposium „Elektrische Straßenfahrzeuge“, Technische Akademie Esslingen, Tagungsband, Esslingen
- Barthel, C., Lechtenböhrer, S. u. Thomas, S. (2001): GHG Emission Trends of the Internet in Germany. in: Langrock, T., Ott, H. E. u. Takeuchi, T. (2001): Japan & Germany: International Climate Policy & the IT-Sector. Proceedings of a Workshop in the Framework of the „Policy dialogue between Japan and Germany for facilitating co-ordinated measures to address global warming. S. 55-67, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy
- Baum, H.; Pesch, S. (1995): Car-Sharing als Lösungskonzept städtischer Verkehrsprobleme. Kölner Diskussionsbeiträge zur Verkehrswissenschaft Nr. 6, Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Köln, Köln
- Becker, H.; Godorr, S.; Kreis, H. u. Vaughan, J. (2000): Die weltweit größte Trennwandkolonne mit Böden - Erfahrungen von der Konzeptfindung bis zur Inbetriebnahme. in: Berichte aus Technik und Wissenschaft, Sonderausgabe zur Achema 2000. Linde AG, Wiesbaden

- Böde, U.; Cremer, C. u. Bradke, H. (2000): Detaillierung des Stromverbrauchs privater Haushalte in der Bundesrepublik Deutschland. Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe
- Bodke, A. S.; Olschki, D. A.; Schmidt, L. D. u. Ranzi, E. (1999) High Selectivities to Ethylene by Partial Oxidation of Ethane. Science 1999, Vol. 285, S. 712-715
- Bradke, H. et al. (1995): Rationelle Energieverwendung in Industrie und Gewerbe, BWK 4/95, S. 149 ff.
- Bradke, H.; Brakhage, A.; Jochem, E.; Petrick, L. u. Rahn, R. (1996): Nutzung der Datenbank und des LP-Modells von IKARUS zur Bestimmung der Potenziale, Zusatzkosten und energiewirtschaftlicher Auswirkungen rationeller Energieanwendung in der Industrie unter dem Gesichtspunkt von Forschung und Entwicklung. Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe
- Brewer, P. G.; Friedrich, G.; Peltzer, E. T.; Orr, F. M. jr. (1999): Direct Experiments on the Ocean Disposal of Fossil Fuel CO₂. Science 284: S943-945
- Brohmann, B.; Cames, M.; Herold, A. u. Boschmann, N. (2000): Klimaschutz durch Minderung der Treibhausgasemissionen im Bereich der Haushalte und Kleinverbrauch durch klimagerechtes Verhalten. Band 1: Private Haushalte. Öko-Institut, Darmstadt
- Buttermann, H. G.; Hillebrand, B. (1999): Klimaschutzzerklärung der deutschen Industrie unter neuen Rahmenbedingungen. Monitoring-Bericht 1999. Rheinisch Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung. Essen
- BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft), ohne Autor (2001): Wäschetrockner auf Wärmepumpenbasis. BWK 53/4
- Crawford, M. G., Holonyak jr., N. u. Kish jr., F. A. (2001): Bye Bye Glühbirne, Spektrum der Wissenschaft, November 2001
- Daimler-Chrysler AG (2000): Umweltbericht 1999, Stuttgart
- Daimler-Chrysler AG (2000): Umweltbericht 2000, Stuttgart
- DB-AG (Deutsche Bahn AG) (1998): Umweltbericht 1998, URL: http://www.bahn.de/konzern/uebersicht/holding/die_bahn_umweltbericht.shtml

- de Beer, J.G.; Phylips, D. u. Bates, J. (2000): Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change - Options to Reduce CO₂-Emissions by Industrial Energy Efficiency Improvement. Utrecht
- de Beer, J.G.; van Wees, M.T.; Worrell, E. u. Blok, K. (1994): Icarus-3. The potentials of energy efficiency improvements in the Netherlands up to 2000 and 2015. Utrecht University, Department of Science, Technology and Society
- Dehoust, G. et al. (1999): Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungskunststoffen. Ökoinstitut, Darmstadt
- Deutsch, C. (1994): Abschied vom Wegwerfprinzip – Die Wende zur Langlebigkeit in der industriellen Produktion. Stuttgart
- Dreier, T., Fischer, F. u. Wagner, U. (2000): Ganzheitliche energetische Bilanzierung eines Personal Computers. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 4/2000, S. 232-236
- Enquête-Kommission (1994): Schlussbericht der Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, Deutscher Bundestag, Drucksache 12/8600, Bonn/Berlin
- Enquête-Kommission (2001): Analyseraster der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“, Vorläufige Fassung, 28.3.2001, Berlin
- Fleig, J. (Hrsg.) (2000): Zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft. Mit Nutzenverkauf, Langlebigkeit und Aufarbeitung ökonomisch und ökologisch wirtschaften. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart
- Geiger, B. u. Heß, H. (1996): Energieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland, in Jahrbuch 1996 Energietechnik, VDI-GET, S. 495-511
- Geiger, B. u. Lindhorst, H. (2000): Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland, in: Jahrbuch 2000 Energietechnik, VDI-GET, S. 243-262
- Geiger, B.; Gruber, E. u. Megele, W. (1999): Energieverbrauch und Einsparung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung, Physica-Verlag, Heidelberg, 364 S.
- Group of Personalities (2001): European Aeronautics: A Vision for 2020. Report of the Group of Personalities. URL: http://europa.eu.int/comm/research/growth/aeronautics2020/pdf/aeronautics2020_en.pdf

- Heyde, M.; Kremer, M. (1999): Recycling and recovery of plastics from packagings in domestic waste – LCA-type analysis of different strategies. Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Freising. LCA Documents, Ecomed publishers, Vol. 5
- Hiessl, H. et al. (1995): Auf dem Weg zu einer ökologischen Stoffwirtschaft. Teil II: Die Rolle einer ganzheitlichen Produktpolitik. In: Gaia 1995, Nr. 2, S. 89-99
- Hirschl, B. et al. (2001): Nachhaltige Produktnutzung. Sozial-ökologische Bedingungen und ökologische Vorteile alternativer Konsumformen, Berlin
- Holloway, S. et al. (1996): The Underground Disposal of Carbon Dioxide. Summary Report, Joule II Project No. CT92-0031, Brüssel
- Holtz, M. H.; Nance, P. K. u. Finley, R. J. (1999): Reduction of Greenhouse Gas Emissions through Underground CO₂-Sequestration in Texas Oil and Gas Reservoirs. Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, Austin
- Huber, P. u. Mills, M. P. (1999): Dig more coal, the PC's are coming, Forbes Magazine, 31. Mai 1999
- IEA (International Energy Agency) (2000): Policies and Measures to Mitigate Greenhouse Gas Emissions: Transportation Options (Light Duty Vehicles). Paris
- International Institute for Environment and Development (IIED) (1996): Towards a Sustainable Paper Cycle. London
- IPTS (Institute for Prospective Technological Studies) (2000a): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries, Hrsg: European Commission, Sevilla
- IPTS (Institute for Prospective Technological Studies) (2000b): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Chlor-Alkali Manufacturing Industry, Hrsg: European Commission, Sevilla
- ISI (1998): Delphi 98 – Umfrage: Zukunft nachgefragt: Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. ISI, Karlsruhe

- Janz, J; Weiss, W. (1996): Kunststoffverwertung im Hochofen - Ein Beitrag zum ökologischen Recycling von Altkunststoffen. In: Verwertung von Kunststoffabfällen. Tagung Herne 23./24. Oktober 1996, VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Berichte 1288, S. 123-138
- Kawamoto, K.; Koomey, J. G.; Nordmann, B.; Brown, R.; Piette, M. A.; Ting, M. u. Meyer, A. K. (2001): Electricity Use by Office Equipment and Network Equipment in the U.S.: Detailed Report and Appendices. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley
- Kech, H. u. Resch, J. (2001): Hocheffizienzpumpen für Heizung und Kühlung. HLH, Bd. 52 (2001) Nr. 10, S. 87-90
- Kolke, R. (1999): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Brennstoffzellenfahrzeuge. Umweltbundesamt, Berlin
- Landwehr, M. u. Jochem, E. (1996): Stromverbrauch in Elektroantrieben. Analyse technischer, ökonomischer und politischer Aspekte der rationellen Stromnutzung. Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe
- Landwehr, M.; Eichhammer, W. u. Engel, T. (1997): Characterization of Electric Motor Stock and Electricity Use in Germany, Final Report. Subcontract for the University of Coimbra (ISR) within the European Union Study "Energy Efficiency Actions for Electric Motors", Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe
- Lochte, H.; Kalkutschky, L.; Schneider, R. und Schmidt, L. (2000): Die Elektrizitätswirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1998. Statistischer Bericht des Referats Elektrizitätswirtschaft, Fernwärme im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. VWEW Energieverlag, Frankfurt
- Lovins, A. (1996): Hypercars: The Next Industrial Revolution. Rocky Mountains Institute, Snowmass URL:
<http://www.rmi.org/images/other/HC-NextIndRev.pdf>
- Lovins, A.; Barnett, J. u. Lovins, J. (1991): Supercars: The Coming Light-Vehicle Revolution. Proceedings 1993 Summer Study of the European Council for an Energy Efficient Economy, Rungstedgård
- Masuhr, K. P.; Eckerle, K.; Bradke, H.; Brakhage, A.; Knöpfel, I.; Lyons, B.; Reichert, J. u. Treber, M. (1991): Konsistenzprüfung einer denkbaren zukünftigen Wasserstoffwirtschaft. Studie im Auftrag des BMBF, Basel

- Müller, H. (1997): Gesamtenergieverbrauch verschiedener Gebäudetypen, In: Ostbayrisches Transfer und Technologie Institut e.V. (OTTI) (Hrsg.): Drittes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden. Tagungsband, S. 17-29
- Muller, M.; Simek, M.; Mak, J. (1995): Modern Industrial Assessments: A Training Manual. The Office of Industrial Productivity and Energy Assessment, Rutgers University, Piscataway
- Nathani, C. (2000): Entwicklung eines Modellsystems zur Simulation der energiewirtschaftlichen und strukturellen Veränderungen einer verstärkten Kreislaufwirtschaft. Systemtechnische und ökonomische Modellierung am Beispiel des Stoffstroms „Papier“, Abschlußbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Oertel, D. u. Fleischer, T. (2000): TA-Projekt „Brennstoffzellen-Technologie“. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. TAB-Arbeitsbericht Nr. 67, Berlin
- Ostertag, K. (2001): Re-assessing no-regret potentials. The example of high efficiency electric motors. In: ECEEE (European Council for an Energy-Efficient Economy) (Hrsg.): Further than ever from Kyoto? Rethinking energy efficiency can get us there. 2001 Summer Study Proceedings. Paris (ADEME editions), S. 304-317
- Patel, M.K. (1999): Closing Carbon Cycles: Carbon Use for Materials in the Context of Resource Efficiency and Climate Change. Utrecht
- Petersen, M. (1995): Ökonomische Analyse des Car-Sharing. Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden
- Pilz, H. et al. (1999): Szenarien zur Verwertung und Entsorgung von Kunststoffverpackungen in Österreich. Wien
- Plätzer, E. T. (1998): Papier versus Neue Medien: Eine Analyse der Umweltverträglichkeit von Presseinformationen im Lichte des technologischen Wandels. Darmstadt
- Porsche Engineering Services (2000): Neue Konzepte für ultraleichte Automobil-Anbauteile aus Stahl. in Stahl-Info,
URL: <http://www.stahl-info.de/deutsch/Automobil/PM-ULSAC-A.htm>
- Prettenthaler, F. E.; Steininger, K.W. (1999): From ownership to service lifestyle: the potential of Car-Sharing. In: Ecological Economics 28, S. 443-453

- Preussag AG (2001): Hapag-Lloyd fliegt mit kerosinsparenden Winglets. URL: <http://www.preussag.de/de/profileonline/touristik/winglets.html>
- Radgen, P. (1999): Abscheidung, Nutzung und Entsorgung von CO₂ aus energie- und stoffumwandelnden Prozessen., in: Fortschrittliche Energiewandlung und -Anwendung 1999, VDI-Berichte 1457, S.423-435
- Radgen, P. u. Blaustein, E. (2001): Compressed Air Systems in the European Union. Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions. Final report for the European Commission (SAVE II), LOG_X Verlag, Stuttgart
- Rath, U.; Hartmann, M.; Präffcke, A. u. Mordziol, C. (1997): Klimaschutz durch Minderung von Leerlaufverlusten bei Elektrogeräten. UBA Text Nr. 45/97, Umweltbundesamt, Berlin
- Schaefer, C. u. Weber, C. (2000): Mobilfunk und Energiebedarf. Energiewirtschaftliche Tagesfragen. Bd. 50 Nr. 4, S. 237-241
- Schlesinger, M.; Eckerle, K.; Hakler, K.; Hobohm, J.; Hofer, J.D.; Kreuzberg, M.; Nolten, A.; Schuppe, T.; Schulz, W. u. Starrmann; F. (1999): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Prognos AG und Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln (EWI), Basel
- Schlomann, B.; Gruber, E.; Eichhammer, W.; Kling, N.; Mannsbart, W.; Stöckle, F. (2001): Evaluierung der Umsetzung der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (EnVKV), Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung und Gesellschaft für Konsumforschung, Karlsruhe und Nürnberg
- Scholl, G.; Zundel, S. (1999): Neue Nutzungskonzepte für Produkte – Entwicklungsperspektiven von Strategien zur Nutzungsdauerverlängerung und Nutzungsintensivierung, in: ZAU 1999, Nr. 4, S. 517-531
- Schön, M. et al. (2000): Ökobilanzieller Vergleich der energetischen Verwertung von Kunststoffen mit Verfahren des rohstofflichen Recyclings für den Raum Mannheim / Ludwigshafen. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Shell (2001): Shell PKW-Szenarien. Mehr Autos – weniger Verkehr? Szenarien des PKW-Bestandes und der Neuzulassungen in Deutschland bis 2020. Deutsche Shell GmbH, 2001, Hamburg

- Siemens AG (2000): Umweltschutz im Mobilfunk - Siemens Mobilfunk-Basisstationen senken Stromverbrauch um 35 Prozent bei Steigerung der Empfangsleistung. Pressemitteilung, 31.5.2000, URL: http://www.siemens.com/de2/html/press/newsdesk_archive/2000/c_0023_d.html
- StaBu (Statistisches Bundesamt) (1999): Produzierendes Gewerbe, Reihe 4.1.1 Beschäftigung, Umsatz und Energieversorgung der Unternehmen und Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- StaBu (Statistisches Bundesamt) (1999): Statistisches Jahrbuch 1999, Wiesbaden
- van den Reek, J.A. (1999): Reduction of CO₂ emissions by reduction of paper use for publication applications. Utrecht
- VCI, Verband der Chemischen Industrie e. V. (1999): Chemiewirtschaft in Zahlen. Ausgabe 1999, Frankfurt
- VDEW, Verband Deutscher Elektrizitätswerke (1999): Endenergieverbrauch in Deutschland 1999, VDEW-Materialien M-22/99, Frankfurt
- Wallentowitz, H.; Patberg, L. u. Schwarz, D. (2000): Der Weg von der Stahl-Schalen-Bauweise zum Stahl-Space-Frame. in: Proceedings Stahl 2000. Düsseldorf, 16./17. Dezember 2000
- Walz, R. et al. (2001): Arbeitswelt in einer nachhaltigen Wirtschaft – Analyse der Wirkungen von Umweltschutzstrategien auf Wirtschaft und Arbeitsstrukturen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes, Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2000): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2000/2001, Düsseldorf
- World Bureau of Metal Statistics, UBS Warburg u. Enron Metals Limited (2000): Metallstatistik 1989 - 1999. Ware/Herts. u. London, 495 S.
- Worrell, E.; Bode, J.-W.; de Beer, J. (1997): Analysing Research and Technology Development Strategies - The „Atlas“-Project. Energy Efficient Technologies in Industry. Utrecht University, Utrecht
- Worrell, E.; Martin, N. u. Price, L. (1999): Energy Efficiency and Carbon Dioxide Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley



Auftrag der Enquete Kommission
„Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der
Globalisierung und der Liberalisierung“

Systematisierung der Potenziale und Optionen für den Gebäudebereich

Überarbeiteter Endbericht

(incl. der Beantwortung der Fragen der Kommission)

30. Oktober 2001

M. Kleemann	(Federführung, Gebäudehülle)	FZ Jülich
U. Birnbaum	(Brennstoffzelle)	FZ Jülich
R. Heckler	(Heizungsanlage)	FZ Jülich
G. Kolb	(Wandler)	FZ Jülich
P. Markewitz	(KWK, BHKW)	FZ Jülich
K. Leubner	(Lüftung, Klimatisierung)	RM Consult Berlin

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)
Forschungszentrum Jülich (FZJ)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Wärmetechnische Verbesserung der Gebäudehülle	1
1.1 Defizitanalyse der vorangegangenen Enquete Kommission	1
1.2 Altbausanierung im Wohngebäudebereich	2
1.2.1 Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen	2
1.2.2 Einsparpotenziale der Typgebäude und des Bestandes	4
1.2.3 Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen	6
1.2.4 Aspekte der Reihenfolge bei der Umsetzung einzelner Sanierungsmaßnahmen	7
1.2.5 Umsetzung der Potenziale und Hemmnisse	8
1.2.6 Arbeitsplatzeffekte und CO2-Minderung des KfW Programms	10
1.3 Neue Wohngebäude	12
1.3.1 Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen	12
1.3.2 Anmerkungen zum Passivhaus	13
1.3.3 Einsparpotenzial im Neubaubereich	14
1.3.4 Umsetzung und Hemmnisse	15
1.4 Zusammenfassung von Alt- und Neubaubereich	15
1.5 Nichtwohnbereich	16
Literatur für Kapitel 1	18
2 Einsparpotenziale durch Verhaltensänderungen	20
2.1 Wohngebäudebereich	20
2.2 Nichtwohnggebäude	20
Literatur für Kapitel 2	21
3 Optimierung der Baugeometrie	22
Literatur für Kapitel 3	23
4 BHKW zur Gebäudeversorgung	25
4.1 Defizitanalyse der Vorarbeiten der vorhergehenden Enquete Kommission	25
4.2 Detaillierung des Energieverbrauchs und der energiebedingten Emissionen	25
4.2.1 Status Quo, Nahwärme-KWK	25
4.2.2 Einsatz von Kleinst-BHKW (außer Brennstoffzelle)	29
4.3 Identifizierung und Quantifizierung der Einsparoptionen und ihrer Potenziale	31
4.3.1 BHKW-Einsatz im Nahwärmebereich (Gebäude)	31
4.3.2 Einsparpotenzial durch den Einsatz von BHKW im Nahwärmebereich (Wohngebäude)	33
4.4 Hemmnisse	35
Literatur zu Kapitel 4	36
5 Wärmebereitstellung mit der Brennstoffzelle im Wohngebäudebereich	39
5.1 Defizitanalyse	39
5.2 Identifizierung und Quantifizierung der Einsparoptionen und ihrer Potenziale	40
5.3 Umsetzung der Potenziale und Hemmnisse	45
Literatur für Kapitel 5	46
6 Niedertemperaturkessel und Brennwertkessel und Gesamtanlage	48
6.1 Niedertemperaturkessel	48
6.2 Brennwertkessel	49

6.3	Einsparmöglichkeiten durch Optimierung des Gesamtsystems	51
6.3.1	Dimensionierung des Kessels	52
6.3.2	Verteilung	53
6.3.3	Wartung und Instandhaltung der Heizungsanlage	53
6.3.4	Umwälzpumpen	53
6.3.5	Mögliche Nutzungsminderung bei nicht optimal betriebenen Brennwertgeräten	55
6.3.6	Einsparpotenziale durch optimale Regelung	56
	Literatur für Kapitel 6	57
7	Wärmepumpen, solartherm. Wandler, Biomasse- und Restenergienutzung	58
7.1	Wärmepumpen	58
7.1.1	Ausführungen der vorangegangenen Enquete Kommission	58
7.1.2	Bisherige Marktentwicklung	58
7.1.3	Anlagekosten	59
7.1.3	Potenziale und Hemmnisse	59
7.2	Solarthermische Wandler	60
7.2.1	Ausführungen der vorangegangenen Enquete Kommission	60
7.2.2	Status der Energie- und CO ₂ -Einsparung	60
7.2.3	Kosten und Wirtschaftlichkeit	61
7.2.4	Potenziale	61
7.3	Biomassewandler	62
7.3.1	Ausführungen der vorangegangenen Enquete Kommission	62
7.3.2	Kosten und Wirtschaftlichkeit	63
7.3.3	Potenzialangaben	65
7.3.4	Hemmnisse	65
7.4	Restenergienutzung	65
	Literatur zu Kapitel 7	66
8	Energieträgerwechsel	67
	Literatur zu Kapitel 8	68
9.	Energieeinsparpotenziale bei Lüftung und Klimatisierung	69
9.1	Defizitanalyse der Vorarbeiten der vorhergehenden Enquete Kommission	69
9.2	Stand der Lüftungs- und Klimatisierungstechnik	69
9.3	Analyse der Energieverbräuche	70
9.3.1	Methodik zur Ermittlung der Energieverbräuche	70
9.3.2	Energieverbräuche von Wohn- und Nichtwohngebäuden	72
9.4	Energieeinsparpotenziale	73
9.4.1	Energieeinsparpotenziale und Entwicklungstrends.zum Einsatz von RLT Anlagen...	73
9.4.2	Energieeinsparpotenziale und Optimierungsmaßnahmen für bestehende RLT-Anlagen..	75
9.4.3	Ausgesuchte branchenspezifische Einsparpotenziale für RLT in Nichtwohngebäuden	76
9.4.4	Zusammenfassung und Systematisierung der Potenziale	76
	Literaturverzeichnis für Kapitel 9	78
10	Zusammenfassung der Potenziale	80
	Literatur für Kapitel 10	82
	Anhang für Kapitel 4	83

1 Wärmetechnische Verbesserung der Gebäudehülle

1.1 Defizitanalyse der vorangegangenen Enquete Kommission

Fehleinschätzung der Altbausanierung

Im Schlussbericht der vorhergehenden Enquete Kommission „Mehr Zukunft für die Erde“ von 1995 werden für den Altbereich sehr detailliert Dämmmaßnahmen für verschiedene Gebäudetypologien mit ihren Wirkungen und Kosten beschrieben. Dabei werden die Potenziale zunächst in Form von flächenspezifischen Heizenergieverbräuchen für den Gebäudebestand bis 2050 angegeben. Die folgende Tabelle 1.1-1 zeigt eine vereinfachte Zusammenfassung.

Im Trendszenario, für das offensichtlich keine besonderen Klimaschutzbemühungen unterstellt wurden, sinkt der jährliche flächenspezifische Verbrauch im Zeitraum 1990 bis 2000 von 160 auf 145 kWh/m² oder um 9 %. Tatsächlich ist der gesamte Energieverbrauch in dieser Dekade um 3% bis 5% gestiegen, während die Wohnfläche gleichzeitig um 8% bis 10 % gewachsen ist. Aus dem Verhältnis dieser Wachstumsraten lässt sich ableiten, dass die tatsächliche Einsparung von 1990 bis 2000 etwa um die Hälfte kleiner war als von der damaligen Enquete Kommission erwartet. Die wichtigste Ursache dürfte sein, dass die Altbausanierung in der Praxis nicht in dem Maße stattgefunden hat, wie die damalige Enquete Kommission gehofft hatte. Auf diesen Punkt wird später noch einmal genauer eingegangen. Die langfristige Fortschreibung des Trendszenarios bis 2050 mit einer Reduktion auf 122 kWh/m² erscheint auch aus heutiger Sicht plausibel (Kleemann et al. 2000).

Tabelle 1.1-1: Einsparpotenziale an Heizenergie im Gebäudebestand in kWh/m² (Nach Schlussbericht der vorhergehenden Enquete Kommission „Mehr Zukunft für die Erde“ von 1995, Seite 369)

	1990	2000	2030	2050
Trendszenario	160	145	128	122
Technischer Fortschritt (Mittelwert des Bereichs)	160	112	60	55
Wirtschaftliches Potenzial	80	57	28	20
Technisches Potenzial	50	38	0	0

Was den technischen Fortschritt z.B. bei Neubauten betrifft, wurde die Entwicklung mit einer bedarfsreduktion von 112 kWh/m² bis 2000 offensichtlich zu pessimistisch geschätzt. Tatsächlich wurden im Jahre 2000 entsprechend der Wärmeschutzverordnung von 1995 je nach A/V Verhältnis deutlich niedrigere Heizenergieverbräuche zwischen 60 und 100 kWh/m² gefordert. Der für 2050 erwartete Wert von 55 kWh/m² ist in einem Szenario „Technischer Fortschritt“ für Neubauten durchaus erreichbar, nicht jedoch für den Gesamtbestand. Das wirtschaftlich umsetzbare Potential für das Jahr 2000 in der vorletzten Zeile von Tabelle 1.1-1 ist bei den heutigen Energiepreisen und bei den in der Wohnungswirtschaft üblichen, kurzen Amortisationszeiten sicher zu optimistisch angesetzt worden. Die Neubau- und Sanierungspraxis der letzten 10 Jahre haben das eindringlich gezeigt. Die in der letzten Zeile gezeigten technischen Potenziale sind im Neubaubereich ohne weiteres umsetzbar. Allerdings sagen die flächenspezifischen Einsparpotenziale in kWh/m², so wie sie in Tabelle 1.1.-1 stehen, noch nichts aus über die insgesamt umgesetzten, absoluten Mengen im Gebäudebestand aus. Diese hängen in der Praxis von der Anzahl und der Qualität der durchgeführten Gebäudesanierungen ab.

Für die Angabe des langfristigen wirtschaftlichen Potenzials ist der zukünftige Heizölpreis ein ganz entscheidender Einflussparameter. Im Schlussbericht der vorhergehenden Enquete Kommission „Mehr Zukunft für die Erde“ von 1995 (Seite 375) wird ein anlegbarer Nutzenergiepreis von 13 Pf/kWh zugrunde gelegt. Im Vergleich zum heutigen Preisniveau bedeutet dies eine erhebliche Preissteigerung. Unter diesen Voraussetzungen erscheinen die langfristigen, wirtschaftlichen Potenziale in Tabelle 1.1-1 realistisch.

Diese Gesamtpotenziale für die CO₂-Minderung bis 2005 im Raumwärmebereich sind in der Tabelle 1.1-2 zusammengestellt (Nach Schlussbericht der vorhergehenden Enquete Kommission „Mehr Zukunft für die Erde“ von 1995, Seite 527). Addiert man die Einzelbeiträge für die alten und neuen Bundesländer in der letzten Zeile von Tabelle 1.1-2, dann ergibt sich für Deutschland ein Bereich von mindestens 29,4 bis höchstens 55 Mio. t. Davon stammen rund 80 % aus der Altbausanierung.

Tatsächlich hat sich jedoch seit 1990 die CO₂-Emission im Gebäudebereich nicht vermindert, sondern ist in den letzten Jahren sogar leicht angestiegen. Die erreichbaren Spareffekte durch die Altbausanierung wurden also sehr stark überschätzt.

Tabelle 1.1-2: CO₂-Einsparpotenziale im Raumwärmebereich in Mio. t von 1990 bis 2005 (Vergleich verschiedener Szenarien, direkte und indirekte Emissionen)

	Alte Bundesländer		Neue Bundesländer	
	BMU/UBA	EK ¹⁾	DIW	PROGNOS
Neubau (Zubau und Reinvestition)	16	18	-	-
Altbausanierung	20	35	8	2,4
Optimierung der Heizungstechnik	6	6	11	6
Vergrößerung der Wohnfläche	-15	-15	-8	-6
Summe Raumwärme (Haushalte)	27	44	11	2,4

¹⁾ EK = Enquete Kommission

Einsparung und Mehremission im Neubaubereich

Für den Neubaubereich werden im Schlussbericht der vorhergehenden Enquete Kommission „Mehr Zukunft für die Erde“ von 1995 das Niedrigenergiehaus (40-70 kWh/m²), das Passivhaus (19 kWh/m²) und das Nullenergiehaus (0 kWh/m²) im Hinblick auf ihre thermischen und z.T. auch auf die wirtschaftlichen Eigenschaften dargestellt. An einer Reihe von Einzelbeispielen werden Einsparpotenziale und Kosten aufgezeigt. In welchem Umfang die einzelnen Bauweisen in den Markt kommen ist jedoch nicht im Detail angegeben. Für den Neubaubereich sind die gesamten Einsparpotenziale und die Mehremissionen (negativ) in Tabelle 1.1-2 zusammen gestellt.

Zusätzliche Neubauten tragen immer zu einer Vergrößerung der CO₂-Emission bei, sofern es sich nicht um Nullenergiehäuser handelt. Eine Einsparung kann nur dann entstehen, wenn durch Neubauten alte, schlecht gedämmte Gebäude ersetzt werden. Dieser Anteil bewegt sich in Tabelle 1.1-2 für die alten Bundesländer im Bereich von 1 bis 2 Mio. t (Zeile „Neubau“ minus Zeile „Vergrößerung der

Wohnfläche“). Neuere Untersuchungen zeigen dagegen, dass die Mehremissionen durch Neubauten die Einsparungen durch Abrisse derzeit noch übertreffen (Kleemann et al. 2000).

1.2 Altbausanierung im Wohngebäudebereich

1.2.1 Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen

Das rechnerische Einsparpotenzial an Heizwärme ergibt sich aus der Differenz der tatsächlichen Verbräuche aller Wohngebäude im Referenzjahr 1999 minus dem durch Sanierung reduzierten Verbrauch der Altbauten, im Zieljahr 2050. Bei einem mittleren Renovierungszyklus sind bis 2050, zumindest theoretisch, alle Altbauten einmal saniert worden. Für die Potenzialabschätzung wird im Sinne einer Obergrenzenbetrachtung eine Vollsanierung unterstellt. Ausgangszustand ist der bauliche und energetische Zustand der existierenden Gebäude im Jahre 1999 (umgerechnet nach IKARUS Datenbank 2000). Alle Gebäude, die vor 1999 gebaut wurden, werden hier als Altbauten bezeichnet und alle, nach 1999 errichtete als Neubauten.

Für die Berechnung der Einsparpotenziale wird folgende, stufenweise Verschärfung der Anforderungen an die Altbausanierung unterstellt:

- Bis 2005 gilt die Energieeinsparverordnung (EnEV).
- Von 2005 bis 2020 gilt ein gegenüber der EnEV verschärfter Niedrigenergiehausstandard, der mit NEH Bezeichnet wird.
- Von 2020 bis 2050 wird ein weiter verschärfter Standard zugrunde gelegt, der als fortschrittlicher Niedrigenergiehausstandard (NEH[†]) bezeichnet wird.

Sollen die mit dieser Entwicklung verbundenen Potenziale umgesetzt werden, dann müssen die Verordnungen vom Gesetzgeber entsprechend umgestaltet werden.

Für die Vollsanierung werden die in der folgenden Tabelle 1.2.1-1 aufgeführten Fensterqualitäten und Dämmdicken zugrunde gelegt. Diese Werte dürften die Obergrenze dessen sein, was am Altbau technisch und wirtschaftlich im betrachteten Zeitraum möglich ist. Die langfristig für den Altbau unterstellten Fenster entsprechen nach dem derzeitigen Stand der Technik einer Spitzenqualität, die dem Passivhausstandard entspricht. Man kann aber davon ausgehen, dass sich diese Technik auch auf breiter Basis bei der Altbausanierung mittel- bis langfristig durchsetzen wird (Feist 2001).

Tabelle 1.2.1-1: Angenommene Dämmung für die rechnerische Schätzung der Sparpotenziale bei Vollsanierung bis 2050

Saniertes Bauteil	Wärmedurchgangszahl, Dämmdicke	Wärmedurchgangszahl, Dämmdicke
	2005 – 2020 (NEH)	2020 – 2050 (NEH [†])
Fenster	1,7 W/m ² K	0,8 W/m ² K
Außenwand	10 cm	16 cm
Dach	16 cm	20 cm
Kellerdecke	10 cm	16 cm

Die Einsparpotenziale werden mit dem IKARUS Raumwärmemodell für mittlere, repräsentative Typgebäude bestimmt und dann auf den zukünftigen Bestand hoch gerechnet. Für den Gebäudebestand in den alten Bundesländern wird die vom Institut für Wohnen und Umwelt (IWU 1991) entwickelte Typologie zugrunde gelegt, die 32 repräsentative nach Größe und Baualter charakterisierte Gebäudetypen enthält (IKARUS DB 1999, Kleemann et al. 2000). Für den Gebäudebestand in den neuen Bundesländern wird eine Typologie verwendet, die das Institut für Lüftung, Heizung und Grundlagen der Bautechnik (IHLGB) Berlin auf der Basis des Gebäudeatlas der Bauakademie der ehemaligen DDR (Bauakademie 1990) erarbeitet hat. Diese Typologie enthält 14 repräsentative Gebäude unterschiedlicher Größen- und Altersklassen.

Bei der Hochrechnung auf den Bestand wurden die Abrissraten für die einzelnen Baualtersklassen berücksichtigt. Da diese aus den derzeit vorliegenden Rahmendaten der Kommission noch nicht hervorgehen, wird hier die Entwicklung des Altbaubestandes nach der Studie von Kleemann et al. (2000) mit dem Titel „Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050“ zugrunde gelegt.

Zur Berechnung der Potenziale wird zunächst unterstellt, dass die Verordnungen zu 100% vollzogen werden, was in der Praxis derzeit nicht der Fall ist (vgl. Kapitel 1.2.4 Hemmnisse). Für 15 % der Gebäude wird angenommen, dass der fortschrittliche Niedrigenergiehausstandard nicht erreicht werden kann (denkmalgeschützt, andere bauliche Gründe, Wärmebrücken etc.). Die berechneten Potenziale beziehen sich nur auf bauphysikalische Verbesserungen. Verhaltensänderungen der Gebäudenutzer und Brennstoffwechsel sind hier nicht eingerechnet worden.

Der Endenergieverbrauch für die Raumwärmebereitstellung im Wohngebäudebereich belief sich im Jahr 1999 nach Tabelle 1.2.1-2 auf rund 2082 PJ (umgerechnet nach DIW 2000 und PROGNOSE 1999). Davon entfallen 40,2 % auf Heizöl, 43 % auf Erdgas, 6,6 % auf Fernwärme, 5,4 % auf Strom und ein Rest von 4,7 % auf Sonstige. Bei den CO₂-Emissionen sind 121,4 Mio. t dem Brennstoffverbrauch zu zurechnen und 54,2 Mio. t entstehen durch den Strom- und Fernwärmeverbrauch zur Raumwärmebereitstellung.

Tabelle 1.2.1-2: Endenergieverbrauch und CO₂ Emission

Endenergieverbrauch für Raumwärme	PJ	2082
CO ₂ -Emission der Brennstoffnutzung (ohne Strom und Fernwärme)	Mio. t	121,4
CO ₂ -Emission der Strom- und Fernwärmennutzung (ohne Brennstoffe)	Mio. t	54,2

1.2.2 Einsparpotenziale der Typgebäude und des Bestands

Die berechneten Verbräuche und Einsparpotenziale für den Heizwärmeverbrauch (Nutzenergie) der einzelnen Typgebäude sind für den Ausgangszustand 1999 und die sanierten Zustände NEH und NEH⁺ in der Tabelle 1.2.2-1 zusammengestellt. Dabei sind die mit der sehr detaillierten, weiter oben beschriebenen Typologie, bestehend aus insgesamt 46 Typgebäuden, gerechneten Ergebnisse der besseren Übersicht wegen in Tabelle 1.2.2-1 auf folgende vier Typgebäude aggregiert worden:

- EFH freistehendes Ein- und Zweifamilienhaus

- RDH Reihen- und Doppelhaus für eine und zwei Familien
- KMH kleines Mehrfamilienhaus (3-6 Wohnungen)
- GMH großes Mehrfamilienhaus (>6 Wohnungen)

Da die einzelnen Typgebäude mit den jeweiligen Flächenanteilen gewichtet wurden, ist die Genauigkeit des Ergebnisses der detaillierten Modellrechnungen durch die Aggregation nicht verändert worden.

Tabelle 1.2.2-1: Flächenspezifische Heizwärmeverbräuche und Einsparpotenziale

Gebäude- typen (ABL)	Verbrauch 1999 kWh/m ² a	Verbrauch NEH kWh/m ² a	Verbrauch NEH ⁺ kWh/m ² a	Einsparpotenzial NEH		Einsparpotenzial NEH ⁺	
				kWh/m ² a	%	kWh/m ² a	%
EFH	170	61	43	109	64	127	75
RDH	151	57	41	94	62	110	73
KMH	152	57	40	95	63	112	74
GMH	119	47	32	72	61	87	73
Alle	148	56	39	92	62	109	74

Im Falle von NEH reichen die Einsparpotenziale von 109 kWh/m² für EFH bis hin zu 72 kWh/m² für GMH mit einem Durchschnitt von 92 kWh/m². Die Gebäudetypen mit dem höchsten Ausgangsverbrauch haben auch die höchsten absoluten Einsparpotenziale. Die relativen Einsparpotenziale weichen dagegen kaum noch voneinander ab, sie liegen im Bereich von 64 bis 61 %. Deutlich höher sind die Einsparungen für den Sanierungsstandard NEH⁺, die im Bereich von 75 bis 73 % liegen.

Vom Wohngebäudebestand des Jahres 1999 sind im Jahre 2050 immerhin noch rund 75 % vorhanden. Nur etwa 25 % der älteren Gebäude werden bis dahin abgerissen sein (vgl. Tabelle 1.2.2-2). Damit kommt der Altbausanierung eine Schlüsselrolle zu.

Tabelle 1.2.2-2: Entwicklung des Altbaubestandes und des Abrisses bis 2050

	Bestand 2020	Abriss 1999-2020	Bestand 2050	Abriss 1999-2050
	Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²	Mio. m ²
EFH	1110	120	890	340
RDH	439	34	369	104
KMH	505	63	417	151
GMH	693	37	589	141
Summe	2747	254	2265	736

Ausgehend von den in Tabelle 1.2.2-1 dargestellten flächenspezifischen Verbräuchen und Sparpotenzialen und den in Tabelle 1.2.2-2 aggregierten Bestands- und Abrissflächen ergibt sich das Endenergie-Einsparpotenzial durch Sanierung der Gebäudehüllen im Wohnbereich und durch Abrisse von 1999 bis 2020 und von 1999 bis 2050. Legt man einen mittleren Gesamtnutzungsgrad für den Bestand von 1999 von 78 % (inkl. Kessel und Heizungsverteilung) zugrunde dann ergeben sich die in Tabelle 1.2.2-3 dargestellten Endenergie-Einsparungen. Da der Nutzungsgrad nicht verändert wird, beziehen sich die ermittelten Einsparungen nur auf die Gebäudehülle.

Tabelle 1.2.2-3: Gesamtes Endenergie-Einsparpotenzial bis 2020 und bis 2050

	2020	2020	2020	2050	2050	2050
	Sanierungs- potenzial	Einsparung durch Abriss	Gesamt- Einsparung	Sanierungs- potenzial	Einsparung durch Abriss	Gesamt- Einsparung
	PJ	PJ	PJ	PJ	PJ	PJ
EFH	182	94	276	404	267	671
RDH	62	24	86	145	72	218
KMH	72	44	116	166	106	272
GMH	74	20	95	181	77	258
Summe	390	183	573	897	523	1419

Bezogen auf den Verbrauch der Haushalte für Raumwärme im Jahre 1999 von 2082 PJ entspricht die gesamte Einsparung im Jahre 2020 von 573 PJ einer Einsparrate von rund 28 %. Bis 2050 werden mit 1419 PJ rund 68 % erreicht. Die Voraussetzungen für dieses Ergebnis waren: ein gehobener Sanierungsstandard (NEH ab 2005 und NEH⁺ ab 2020), eine hundertprozentige Sanierungseffizienz, eine Abrissrate von 25 % bis 2050 und ein nicht sanierbarer, denkmalgeschützter Gebäudeanteil von 15 %.

Unterstellt man die Einsparraten von 28 % für 2020 und von 68 % für 2050 auch für die CO₂ Emission, dann bedeutet dies für 2020 (2050) eine CO₂ Minderung von 33,4 Mio. t (82,7 Mio. t) für die Brennstoffeinsparungen und von 14,9 Mio. t (36,9 Mio. t) für Strom- und Fernwärmeeinsparungen (vgl. Tabelle 1.2.2-4).

Tabelle 1.2.2-4: Entwicklung von Endenergieverbrauch und CO₂ Emission im Altbaubereich

		1999	2020	2050	Änderung 1999-2020	Änderung 1999-2050
Endenergieverbrauch für Raumwärme	PJ	2082	1509	663	-573	-1419
CO ₂ -Emission der Brennstoffnutzung (ohne Strom und Fernwärme)	Mio. t	121,4	88,0	38,7	-33,4	-82,7
CO ₂ -Emission der Strom und Fernwärmenutzung (ohne Brennstoffe)	Mio. t	54,2	39,3	17,3	-14,9	-36,9

Dieses hohe Minderungs-Potenzial unterstreicht die herausragende Bedeutung der Altbausanierung. Jede der im folgenden behandelten Maßnahmen hat demgegenüber ein erheblich geringeres Potenzial. Die Altbausanierung ist damit die weitaus wichtigste Klimaschutzmaßnahme im Gebäudebereich.

1.2.3 Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen

Bei heutigen Energiepreisen und bei betriebswirtschaftlicher Rechnung mit kurzen Amortisationszeiten sind viele der Sanierungsmaßnahmen dann nicht wirtschaftlich, wenn die Gesamtinvestition (baulich plus energetisch) gegen die Energieeinsparung gerechnet wird. Bei einer fairen Wirtschaftlichkeitsrechnung sind die Gesamtinvestitionen in bauliche Sowieso-Investitionen und in energetische Zusatz-Investitionen zu unterteilen. Die Zusatzinvestitionen liegen üblicherweise im Bereich von 30 bis 80 % der Gesamtinvestition, je nach Bauteil und Gebäudetyp (vgl. Spalten zwei und drei in Tabelle 1.2.3-1). Nur die Zusatzinvestitionen sind der erreichten Geldeinsparung durch verringerten Energieverbrauch gegenüber zu stellen.

Tabelle 1.2.3-1: Anhaltswerte für den Wirtschaftlichkeitsvergleich von Sanierungsmaßnahmen bei einem über den Bestand gemittelten Gebäude (Kosten bezogen auf Gebäudefläche)

Sanierungsmaßnahme	Gesamtkosten (baulich+ energetisch)	Kosten der energetischen Sanierung	Jahreskosten (4 %, techn. Lebensdauer ¹⁾)	Jahreskosten (8%, 12 Jahre)	Energieeinsparung	Geldeinsparung bei verschiedenen Energiepreisen		
						0,07 DM/kWh	0,10 DM/kWh	0,13 DM/kWh
						DM/m ²	DM/m ²	DM/m ²
Außenwand-erneuerung	120 - 155	35 - 75	1,63 - 3,50	4,64 - 9,95	72	5,04	7,20	9,36
Fenster-erneuerung	85 - 140	41 - 117	2,37 - 6,76	5,44 - 15,53	88	6,16	8,80	11,44
Neues Dach (Steildach)	100 - 120	20 - 45	0,99 - 2,22	2,65 - 5,97	48	3,36	4,80	6,24

Die Kostenangaben in Tabelle 1.2.3.-1 sind nach folgenden Quellen umgerechnet und mit einer Reihe von Einzelinformationen ergänzt worden : Feist W. 1998, Gruson C. et al. 1994, IKARUS-Datenbank 2000.

¹⁾ Außenwand 50 Jahre, Fenster 30 Jahre, Dachhaut 45 Jahre

Im Falle einer Wirtschaftlichkeitsrechnung mit einer günstigen Verzinsung von 4 % und einer Abschreibungsdauer, die der technischen Lebensdauer entspricht, sind die Geldeinsparungen durch geringeren Energieverbrauch fast über den ganzen Kostenbereich höher als die Jahreskosten aus der Investition. Bei volkswirtschaftlicher Rechnung lohnen sich die Sanierungsmassnahmen auf jeden Fall.

Wird mit marktüblichen Zinssätzen von 8 % und üblichen Abschreibungsdauern von 12 Jahren gerechnet, dann sind bei einem aktuellen Heizölpreis von 0,70 DM/Liter nur die kostengünstigsten Maßnahmen gerade noch wirtschaftlich. Es ist dann notwendig, dass zur Sanierung nur die Materialien/Bauteile gekauft und eingesetzt werden, die das beste Preis/Nutzen Verhältnis aufweisen. Dies erfordert eine sorgfältige Planung und ausführliche Preisvergleiche. Außerdem muss versucht werden, die Investitionsmittel zu möglichst günstigen Konditionen zu bekommen, z.B. zinsverbilligte Kredite, wie sie die KfW für die Altbausanierung bereit stellt. Bei Heizölpreisen von 1 DM/Liter (0,10 DM/kWh) und mehr sind die Maßnahmen auch bei mittleren und hohen Kosten wirtschaftlich, wie ein Vergleich der Jahreskosten und der Geldeinsparungen in Tabelle 1.2.3-1 zeigt.

1.2.4 Aspekte der Reihenfolge bei der Umsetzung einzelner Sanierungsmaßnahmen

Bei der Umsetzung der Einzelmaßnahmen kann die relative Wirtschaftlichkeit als ein Kriterium für die Festlegung der Reihenfolge bei der Durchführung angewendet werden. Diese Kenngröße wird aus dem Verhältnis der Jahreskosten zu der jährlich eingesparten Energie gebildet. Die folgende Tabelle 1.2.4-1 zeigt die Zahlenwerte, basierend auf den Daten in Tabelle 1.2.3-1. Dabei sind die Mittelwerte der Kosten bei 8 % Verzinsung und 12 Jahren Abschreibungsdauer als Referenz genommen worden.

Obwohl die Unterschiede der Kosten-Kennzahlen in der rechten Spalte von Tabelle 1.2.4-1 nicht signifikant groß sind, ergibt sich die erkennbare Reihenfolge: 1. Dach, 2. Außenwand und 3. Fenster.

Tabelle 1.2.4-1: Kosten-Nutzen-Kennzahlen für einzelne Sanierungsmaßnahmen

Sanierungsmaßnahme	Energiebezogene Kosten der Einsparmaßnahmen
	DM/kWh
Dacherneuerung (Steildach)	0,09
Außenwändeerneuerung	0,10
Fenstererneuerung	0,12

Die Dacherneuerung bzw. die Dämmung der obersten Geschossdecke ist nach den vorstehenden Überlegungen die effizienteste Einzelmaßnahme. Dem trägt auch der Entwurf der Energieeinsparverordnung in §9 Absatz 3 Rechnung. Dort heißt es: "Eigentümer von Gebäuden mit normalen Innentemperaturen müssen nicht begehbare aber zugängliche oberste Geschossdecken beheizter Räume bis zum 31. Dezember 2005 so dämmen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der Geschossdecke 0,3 W/(m²K) nicht überschreitet".

In der Sanierungspraxis lässt sich das Kriterium der relativen Kosten aber nicht immer anwenden, weil Prioritäten sich nach der Sanierungsbedürftigkeit des Bauteils richten. So wird ein Gebäudebesitzer in der Regel das Bauteil zuerst sanieren, das defekt ist. Im Falle einer Vollsanierung aller Bauteile, die in der Regel anzustreben ist, spielt die Reihenfolge ohnehin keine Rolle mehr.

Für ein Umsetzungsprogramm ist die Reihenfolge bei der Durchführung von Einzelmaßnahmen nicht so wichtig. Viel wichtiger ist es, dass zuerst die vielen älteren, schlecht gedämmten Gebäude, die sogenannten Hochverbraucher, entsprechend der Energieeinsparverordnung vollsaniert werden. Damit ließen sich an den Gebäuden Sparpotenziale von bis zu 75 % ausschöpfen.

1.2.5 Umsetzung der Potenziale und Hemmnisse

Geringe Umsetzungsgeschwindigkeit der Potenziale: Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden die bauliche Sanierung und die energetische Sanierung gleichzeitig durchgeführt. Die baulichen Sanierungen werden nach Ablauf der Lebensdauer der Bauteile vorgenommen. Solche Lebensdauer- oder Renovierungszyklen liegen üblicherweise im Bereich von 30 bis 60 Jahren (Mittel ca. 50 Jahre). In der Praxis werden diese Zyklen in der Regel eingehalten. Allerdings kann im Falle eines Besitzerwechsels die Sanierung gelegentlich früher erfolgen. In dem genannten Renovierungszyklus sind alle Bauteile (Fenster, Dach und Außenwand) mindestens einmal erneuert worden. Durch diesen Zyklus wird das Tempo der Umsetzung von Einsparmaßnahmen begrenzt. So werden bei einem mittleren Renovierungszyklus von rund 50 Jahren pro Jahr höchstens 2% der Bauten saniert. Mit diesem Tempo, und nicht schneller, können dann auch die Einsparpotenziale umgesetzt werden.

Unzureichende Sanierungseffizienz in der Praxis: Der Renovierungszyklus sagt etwas aus über die mögliche Anzahl der Sanierungen, nicht jedoch über die energetische Qualität der durchgeführten Sanierungen. Um hierüber auch eine Aussage zu bekommen, wird der Begriff der Sanierungseffizienz eingeführt. Er ist das Verhältnis von tatsächlich erreichter Einsparung bei den in einem Jahr energie-

tisch sanierten Gebäude bezogen auf den Maximalwert der Einsparung bei Vollsanierung aller im Zyklus zu sanierenden Gebäude².

In einer unveröffentlichten Untersuchung, die von der Programmgruppe STE des Forschungszentrums Jülich für eine deutsche Großstadt durchgeführt wurde, hat sich gezeigt, dass die energetische Sanierungseffizienz der Altbaurenovierung nur bei ca. 40 % liegt. Eine Auswertung der 1%-Wohnungstichprobe des Statistischen Bundesamtes, die derzeit von der Programmgruppe STE des Forschungszentrums Jülich durchgeführt wird, lässt z.T. noch geringere Sanierungseffizienzen vermuten. Im Hinblick auf die Energieeinsparung kann also im Gegensatz zur heute üblichen Sanierungspraxis bei der Altbausanierung das Zweieinhalb- bis Dreifache erreicht werden. Die Gründe für die unzureichende Sanierung sind:

- Die z.T. fehlende Wirtschaftlichkeit, unzureichende Anreize und Kapitalmangel,
- das Mieter-Eigentümer Dilemma,
- mangelnde Information und Motivation der Gebäudeeigentümer.
- Fehlende Kontrolle des Vollzugs.

Alle diese Hemmnisse sind von der vorhergehenden Enquete Kommission auch schon genannt worden. Eine Quantifizierung der unzureichenden Sanierungseffizienz lag damals allerdings noch nicht vor. Werden die heute praktizierten Sanierungseffizienzen von ca. 30 bis 40 % fortgeschrieben, dann können bis 2050 statt der maximal möglichen Einsparungen nur etwa ein Drittel erreicht werden (vgl. Tabelle 1.2.5-1). Dies zeigt die Wichtigkeit des Vollzugs der Verordnungen bei der Sanierung. Es macht daher keinen Sinn, die Wärmeschutzverordnungen immer weiter zu verschärfen, wenn sie zu einem großen Teil nur unzureichend eingehalten werden. Die Politik muss sich deshalb zunächst vorrangig um den Vollzug der existierenden Verordnungen bemühen, bevor über eine weitere Verschärfung nachgedacht wird.

Tabelle 1.2.5-1: Reduktion der Einsparpotenziale durch eine unzureichende Sanierungseffizienz

		Maximale Sanierungseffizienz 100 %		Heute übliche Sanierungseffizienz 35 %	
		2020	2050	2020	2050
		Endenergieeinsparung	PJ	573	1419
CO ₂ -Minderung durch Brennstoffeinsparung	Mio. t	33,4	82,7	12	29
CO ₂ -Minderung durch Strom- und Fernwärmeeinsparung	Mio. t	14,9	36,9	5	13

Effiziente Heizungstechniken ersetzen keine Gebäudesanierung: Gelegentlich wird von Interessenverbänden damit argumentiert, dass die Gebäudesanierung nicht vorrangig sei, weil man mit effizienten Heizungstechnologien wie Brennwertkessel, KWK etc. auch genügend Energie sparen könne.

² Beispiel: Aufgrund des Alters kommt pro Jahr eine bestimmte Anzahl von Gebäuden in den Renovierungszyklus und wird baulich saniert. Werden von diesen Gebäuden aber nur 60 % energetisch saniert und wird dabei nur 50 % der Einsparung erreicht, die bei einer Vollsanierung entsprechend der Verordnung erreicht worden wäre, dann beträgt die Sanierungseffizienz bezogen auf die Gesamtzahl der baulich sanierten Gebäude 30 % (0,6*0,5).

Dem soll hier widersprochen werden. Im Sinne eines umfassenden effizienten Klimaschutzes sind beide Bereiche zusammen wichtig. Es ist zunächst notwendig, den Wärmebedarf durch eine gute Dämmung zu reduzieren und dann den verbleibenden, geringeren Bedarf mit einer effizienten Heizungstechnologie zu decken. Nur dann kommt es zu einer sinnvollen Ausschöpfung aller Potenziale. Die Gebäudesanierung, die möglichst als erster Schritt durchgeführt werden sollte, hat gegenüber einer Verbesserung der Heizungstechnologie folgende Vorteile:

- Mit einer Vollsanierung der Gebäudehülle werden wesentlich höhere Einsparungen realisiert.
- Durch eine Dämmung wird die Nutzenergienachfrage verringert, d.h. die Maßnahme setzt direkt an der Ursache an. Dies ist bei einer Heizungserneuerung nicht der Fall. Hier wird lediglich der Endenergiebedarf verringert, nicht jedoch der Nutzenergiebedarf.
- Eine Dämmung verbessert das Wohnklima in den Räumen durch eine höhere innere Oberflächentemperatur. Gleichzeitig wird die Gefahr von Feuchteschäden verringert. Dies kann durch einen Heizungsaustausch so nicht erreicht werden.
- Die Technologien zur Wärmedämmung sind ausgereift, am Markt verfügbar und in vielen Fällen auch wirtschaftlich (s. vorhergehenden Absatz).
- Die verschiedenen Dämmmaßnahmen sind sehr langlebig und haben eine mindestens doppelt so lange Lebensdauer wie Heizungsanlagen.
- Die Sanierungsmaßnahmen im Altbaubereich sind außerordentlich arbeitsplatzintensiv und können einen wichtigen Beitrag zur Arbeitsplatzbeschaffung liefern. Bei einem mittleren Renovierungszyklus von 50 Jahren für Wohngebäude müssten jährlich durchschnittlich 2% des Bestandes oder 700.000 m² vollsaniert werden. Dadurch würden rund 250.000 bis 300.000 Arbeitsplätze bevorzugt in der Bauwirtschaft geschaffen bzw. erhalten.

1.2.6 Arbeitplatzeffekte und CO₂-Minderungen des KfW Programms

Kreditentwicklung: Das KfW Programm zur CO₂ Minderung dient der zinsverbilligten, langfristigen Finanzierung von Investitionen zur Energieeinsparung und zur CO₂-Reduzierung in Wohngebäuden. Das Kreditangebot galt in den ersten Jahren nur für die alten Bundesländer und Berlin (West). Von 1996 bis Ende 1999 wurden Kredite von 4,5 Mrd. DM bereit gestellt und damit insgesamt 23,3 Mio. m² Wohnfläche saniert (vgl. Tabelle 1.2.6-1). Bezogen auf die Fläche des Gebäudebestandes in den alten Bundesländern von rund 2,6 Mrd. m² entspricht die durchschnittlich pro Jahr sanierte Fläche einem Anteil von 0,22 %. Damit deckt das KfW Programm nur 1/10 der bei einem Renovierungszyklus von 50 Jahren pro Jahr notwendigen Sanierungsrate von 2 % ab.

Tabelle 1.2.6-1: Kreditzusagen des CO₂-Minderungsprogramms der KfW (Quelle KfW)

		1996	1997	1998	1999	Summe
Kreditzusagen	Mrd. DM	1,43	0,89	0,78	1,35	4,5
Sanierte Wohnflächen	Mio. m ²	8,58	5,04	3,88	5,79	23,3

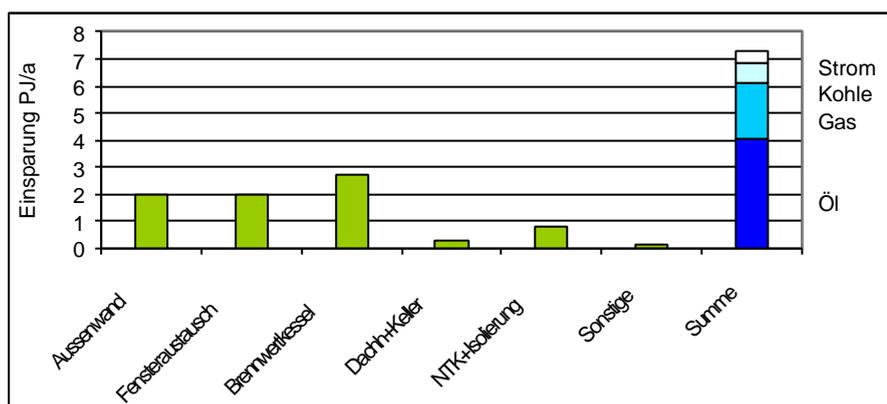
Bisher wurde das Programm von den Kreditnehmern überwiegend zur Finanzierung von Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle und zur Erneuerung der Heizungsanlage genutzt (Teilsanierung). Rund 40 % oder 1,8 Mrd. DM wurden für die Außenwanddämmung verwendet, 24 % bzw. 1,1 Mrd. DM wurden in den Einbau von Brennwertkesseln investiert und 20 % oder knapp 1 Mrd. DM wurden für die

Fenstererneuerung eingesetzt. Allein diese drei Maßnahmen beanspruchten 84 % der gesamten Kreditsumme.

Energie-Einsparung: Die kumulierten jährlichen Gesamteinsparungen für ein Kreditvolumen von 4,5 Mrd. DM sind in Abbildung 1.2.6-1 dargestellt. Sie wurden im Rahmen einer Studie geschätzt, die das Forschungszentrum Jülich im Auftrag der KfW durchgeführt hat (Kleemann et al. 2000).

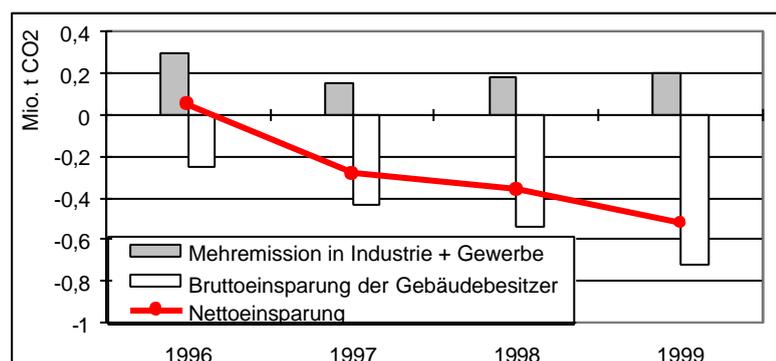
Die drei am meisten durchgeführten Maßnahmen decken rund 81% der gesamten Energieeinsparung ab: Brennwertkessel 28%, Außenwanddämmung 27% und Fensteraustausch 26%. Die resultierende jährliche Gesamteinsparung beläuft sich Ende 1999 auf ca. 7,3 PJ. Bezogen auf den Verbrauch aller Haushalte in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von rund 2.335 PJ beträgt die kumulierte Einsparung nach vier Jahren Laufzeit lediglich 0,3 %. Bezieht man die Einsparung auf die sanierte Wohnfläche, dann wird eine spezifische jährliche Einsparung von 85 kWh pro m² erreicht. Die rechte Säule in Abbildung 1.2.6-1 zeigt die Einsparung nach Energieträgern. Öl verliert mit einem Anteil von 57% am stärksten, dann folgen Gas mit 26%, Kohle mit 10% und Strom mit 7%.

Abbildung 1.2.6-1: Brennstoffeinsparung im Altbaubereich bis Ende 1999 durch das KfW Programm



CO₂-Einsparung: Zunächst entstehen durch die Sanierungstätigkeit und die vorgelagerte Herstellung der verschiedenen Bauteile zusätzliche CO₂-Emissionen, die sich von 1996 bis 1999 auf durchschnittlich rund 200.000 Tonnen pro Jahr belaufen. Diese Mehremissionen müssen von den Bruttoeinsparungen der sanierten Gebäude abgezogen werden. Abbildung 1.2.6-2 zeigt, dass die Bruttoeinsparungen von 250.000 Tonnen im Jahre 1996 auf 720.000 Tonnen bis 1999 ansteigen.

Abbildung 1.2.6-2: Entwicklung der Netto-CO₂-Einsparung im Altbaubereich bis Ende 1999



Die Nettoeinsparung erreicht nach vier Jahren Laufzeit Ende 1999 einen Betrag von rund 520.000 Tonnen CO₂. Bezogen auf den gesamten CO₂ Ausstoß des Haushaltssektors für Raumwärme in Deutschland entspricht das einer Minderung von rund 0,4%. Die spezifische Minderung je Quadratmeter sanierter Wohnfläche beläuft sich auf 22 kg CO₂.

Gesamtwirtschaftliche Beschäftigungseffekte: Die Beschäftigungs- und CO₂-Effekte in Industrie und Gewerbe wurden mit Hilfe der volkswirtschaftlichen Input/Output Analyse geschätzt. Der überwiegende Teil der Sanierungstätigkeiten konzentriert sich auf die Sektoren Hoch- und Tiefbau, das Ausbaugewerbe und den Dienstleistungsbereich. Dies betrifft die Berufsgruppen Maurer, Glaser, Heizungsinstallateure, Planer, Architekten usw. Neben den Sanierungsarbeiten an den Gebäuden ist die Produktion der verschiedenen Vorleistungsgüter wie z. B. die Herstellung der Baustoffe, der Fenster oder der Heizungsanlagen mit erfasst worden.

Die KfW geht davon aus, dass durch die Kredite von 4,5 Mrd. DM noch weitere bauliche Investitionen an den Objekten der Kreditnehmer in Höhe von ca. 3,5 Mrd. DM angestoßen werden. Daraus entsteht ein gesamtwirtschaftlicher Nettobeschäftigungseffekt von durchschnittlich ca. 13.500 Personenjahren pro Jahr. Beschäftigungsverluste von 300 Personenjahren pro Jahr, die durch den eingesparten Energieverbrauch in der Energiewirtschaft verursacht werden, sind eingerechnet.

Der bauwirtschaftliche Beschäftigungseffekt des KfW-Programms beläuft sich auf ca. 10.000 Arbeitsplätze. Gemessen an der absoluten Beschäftigungszahl in der Bauwirtschaft von 3,2 Mio. (1998) ist dies wenig. Gemessen an der relativen Entwicklung ergibt sich jedoch ein günstigeres Bild. So wurden z. B. von 1995 auf 1996 rund 98.000 Arbeitsplätze in der westdeutschen Bauwirtschaft abgebaut. Mit dem Beschäftigungseffekt des KfW-Programms von 10.000 Arbeitsplätzen konnte in diesem Jahr ein um 10% höherer Verlust an Arbeitsplätzen im Baugewerbe verhindert werden.

Das neue KfW Programm: Die vorstehenden Untersuchungen zeigen, dass die Wirkung des KfW Programms in der Vergangenheit dem berühmten Tropfen auf den heißen Stein entspricht. Deshalb wurde Anfang 2001 von der KfW ein modifiziertes Programm mit einem jährlichen Kreditrahmen von 2 Mrd. DM aufgelegt, das die Kombination von mehreren Maßnahmen mit einem weiter verbilligten Kredit fördert (KfW 2001). Damit soll die Effizienz des Programms erhöht werden.

1.3 Neue Wohngebäude

1.3.1 Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen

Neubauten ersetzen den durch Abriss entstandenen Wohnraumverlust und decken den zusätzlich entstehenden Wohnungsbedarf ab. Dieser zusätzliche Bedarf resultiert aus steigenden Haushaltszahlen und einem steigenden Wohnflächenbedarf pro Kopf. Neubauten führen grundsätzlich zu Mehrmissionen, sofern es sich nicht um Nullenergiehäuser handelt. Ein Teil dieser Mehrmissionen wird durch den Abriss der alten Wohngebäude kompensiert.

Unter Neubauten werden alle Gebäude verstanden, die von 1999 bis 2050 gebaut werden.

Einsparpotenziale lassen sich definieren, wenn mit zukünftigen Neubauten der Energieverbrauch gegenüber einer geltenden Referenz-Verordnung deutlich unterschritten wird. Man muß sich aber klar machen, dass es sich dabei, bezogen auf den Verbrauch im Referenzjahr, um fiktive Einsparungen handelt. Auch der reduzierte Verbrauch der Neubauten vergrößert auf jeden Fall den Energieverbrauch. Für die folgenden Abschätzungen wird die Energieeinsparverordnung (EnEV) von heute bis zum Jahre 2050 als Referenz zugrunde gelegt.

In den letzten 30 Jahren sind die Bestimmungen für den Wärmeschutz im Gebäudebereich fünf mal, d.h. durchschnittlich alle sechs Jahre, verschärft worden. Dabei hat sich der mittlere zulässige Heizwärmeverbrauch etwa um den Faktor fünf verringert. Obwohl der Spielraum für zusätzliche Einsparungen inzwischen klein geworden ist, existieren noch weitere Möglichkeiten. Die derzeit in Schweden geltende Baunorm von 1990 hat gegenüber der EnEV z.B. im Neubaubereich im Mittel um 40 % bis 45 % niedrigere Wärmeübergangskoeffizienten (außer Fenster). Trotz der in Schweden häufig praktizierten Holzbauweise, bei der sich das Gebäude leichter dämmen lässt als bei der deutschen Steinbauweise, kann man davon ausgehen, dass auch bei uns noch weitere, über die EnEV hinausgehende Sparpotenziale bestehen. Weitere Stufen zur Verringerung des zulässigen Wärmebedarfs wären das Niedrigenergiehaus (NEH), das Passivhaus und das Nullenergiehaus.

Zur Schätzung der Entwicklung im Neubaubereich wird eine stufenweise Verschärfung der Wärmeschutzverordnung für den Neubaubereich bis auf das Passivhausniveau in folgenden Schritten unterstellt:

- Bis 2005 gilt die Energieeinsparverordnung EnEV.
- Von 2005 bis 2020 gilt ein gegenüber der EnEV um 22 % verschärfter Niedrigenergiehaus-Standard (NEH) für den zulässigen Heizwärmeverbrauch.
- Von 2020 bis 2050 soll der Passivhausstandard zur Anwendung kommen. Dieser Standard bedeutet gegenüber der EnEV eine Verringerung des mittleren Heizenergieverbrauchs um rund 75 %.

Das zukünftige Neubauvolumen wird entsprechend der Langfrist-Studie von Kleemann et al. 2000 mit dem Titel „Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050“ fest gelegt.

1.3.2 Anmerkungen zum Passivhaus

Nach Feist (2000) dürften im Jahre 2001 in Deutschland rund 1000 Passivhäuser existieren. Dabei geht die Marktentwicklung steil nach oben, mit noch Wachstumsraten von über 100 % pro Jahr. Neben neuen Wohngebäuden werden zunehmend Nichtwohngebäude und erste Altbausanierungen in Passivhausbauweise erfolgreich realisiert (Käser, Seiler 2000). Das Passivhaus wird von einer wachsenden Zahl von Planern, Bauunternehmern und Nutzern als bedeutende Perspektive erkannt. Planungshilfen für den Passivhaus-Standard liegen inzwischen vor und hochwertige, für das Passivhaus geeignete Komponenten liegen inzwischen vor. Nach Überwindung der „Kinderkrankheiten“ und nach beginnender Markteinführung sind die Komponenten erheblich kostengünstiger geworden.

Eine Vielzahl von Messungen zum Heizenergieverbrauch in Passivhaus-Siedlungen hat gezeigt, dass der niedrige Heizwärmebedarf des Passivhausstandards von nur 13 kWh/m² a ohne weiteres ein-

gehalten werden kann. Gegenüber dem Niedrigenergiehausstandard bedeutet dies eine weitere Einsparung um 75 %. Allerdings erfordert dies Dämmstoffdicken von 250 bis 500 mm. Ebenso unverzichtbar sind hocheffiziente Fenster mit Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung und gut gedämmtem Fensterrahmen. Weiterhin ist eine sehr wirksame mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung notwendig.

Die Mehrkosten für Passivhäuser sind nach Feist 2000 seit den ersten Prototypen im Jahre 1991 von damals 100.000 DM pro Wohneinheit auf 15.000 DM Anfang 2000 gefallen. Mit einem weiteren Absinken auf 10.000 DM ist in wenigen Jahren zu rechnen. Bei solchen Kosten und einem Heizölpreis von 1 DM/Liter rechnet sich das Passivhaus volkswirtschaftlich.

Die Rückmeldungen von Passivhausbewohnern sind ausgesprochen positiv (Feist 2000, Pfäffinger 2000). Genannt werden die Helligkeit der Räume, das angenehme Raumklima in allen Zimmern aufgrund der hohen Oberflächentemperaturen, die zugfreien Fenster und der Luftaustausch.

Dem hohen Entwicklungspotenzial der Passivhausbauweise wurde bei den hier durchgeführten Potenzialabschätzungen Rechnung getragen. Ab 2020 wurde der Passivhausstandard für Neubauten unterstellt. Über die teilweise Einsetzbarkeit von Passivhausbauteilen bei der Altbausanierung gibt es bisher erst wenig Erfahrungen. Feist 2001 geht davon aus, dass z.B. Fenster in Passivhausqualität mittelfristig auch bei der Altbausanierung einsetzbar sind. Bei den hier vorliegenden Potenzialabschätzungen für den Altbaubereich wurde deshalb unterstellt, dass der Anteil der hochwertigen Fenster steigt und das ab 2020 alle Fenster bei der Altbausanierung Passivhausqualität haben (vgl. Tabelle 1.2.1-1).

1.3.3 Einsparpotenzial im Neubaubereich

Die fiktiven Einsparungen und die verbleibenden Netto-Mehrverbräuche durch den Neubaubereich sind in Tabelle 1.3.3-1 zusammengefasst. Es handelt sich um Endenergieverbräuche (mittlerer langfristiger Nutzungsgrad 95 %). Würden alle Neubauten bis 2050 nur nach der EnEV gedämmt, dann würde der Verbrauch an Heizwärme bis 2020 (2050) um 149 PJ (315 PJ) ansteigen. Bis 2020 führt die 2005 beginnende Verschärfung der EnEV um 22 % zu Einsparungen von 24,5 PJ. Die Einführung der Passivhausbauweise für alle Neubauten ab 2020 lässt die Einsparungen bis 2050 auf 148 PJ anwachsen. Entscheidend ist schließlich der verbleibende Netto-Mehrverbrauch, der sich 2020 (2050) auf 125 PJ (167 PJ) beläuft.

Tabelle 1.3.3-1: Fiktives Heizwärme-Einsparpotenzial und Netto-Mehrverbrauch durch verstärkte Einführung der Passivhausbauweise bis 2050

		2020	2050
Neubaufäche insgesamt	Mio. m ²	588	1240
Gesamtverbrauch des Neubaus nach EnEV	PJ	149	315
Einsparpotential durch Verschärfung der EnEV	PJ	-24,5	-148
Netto-Mehrverbrauch durch Neubau	PJ	125	167

1.3.4 Umsetzung und Hemmnisse

Umsetzung der Passivhausbauweise: Die verstärkte langfristige Einführung der Passivhausbauweise scheint technisch ohne weiteres erreichbar zu sein. Die hochwertigen Techniken für Fenster, Lüftungen und Dämmung, die ein Passivhaus benötigt, sind heute schon verfügbar und in einer Reihe von Projekten eingesetzt worden. Fortschrittliche Fenster mit U-Werten von $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ können jetzt schon hergestellt werden. Auch für die Lüftung stehen inzwischen hochwertige Geräte zur Verfügung, die in Zukunft auch verstärkt im Nichtpassivhaus eingesetzt werden. Bei den Dämmtechniken zeigt sich, dass immer mehr Hersteller dazu übergehen, energetisch hochwertige Systeme anzubieten. Das größte Hemmnis sind derzeit allerdings noch die Mehrkosten. Neben den Kosten ist die z.T. noch weit verbreitete, fehlende Akzeptanz der Passivhaus-Wohnqualität (z. B. geschlossene Fenster, mechanische Lüftung) ein weiteres ernst zu nehmendes Hemmnis. Es herrscht die Vorstellung, dass der Nutzer im Gebäude zu sehr „eingeschlossen“ ist, obwohl die Erfahrungen von Passivhausbewohnern dies offensichtlich nicht bestätigen (vgl. Kapitel 1.3.2). Hier besteht in der Öffentlichkeit und auch bei Fachleuten noch ein erheblicher Aufklärungsbedarf.

Vollzug der Wärmeschutzverordnung: Ein weiteres erhebliches Hemmnis im Neubaubereich ist der Vollzug der Wärmeschutzverordnung. Für die vorliegende Schätzung wurde ein hundertprozentiger Vollzug unterstellt. In der Praxis ist dieser Wert häufig niedriger. Eine noch nicht veröffentlichte Untersuchung, die von der Programmgruppe STE des Forschungszentrums Jülich für eine deutsche Großstadt durchgeführt wird, zeigt, dass der Vollzug im Neubaubereich von 1995 bis 2000 nur bei rund 50 % liegt. Werden diese Vollzugsraten fort geschrieben, dann können die Potenziale bis 2050 bei weitem nicht ausgeschöpft werden. Der Vollzug ist im Neubaubereich genau so wichtig wie im Altbaubereich. Wie im Kapitel zur Altbausanierung schon ausgeführt, macht es daher keinen Sinn, die Verordnungen weiter zu verschärfen ohne vorher den Vollzug zu verbessern.

1.4 Zusammenfassung von Alt- und Neubaubereich

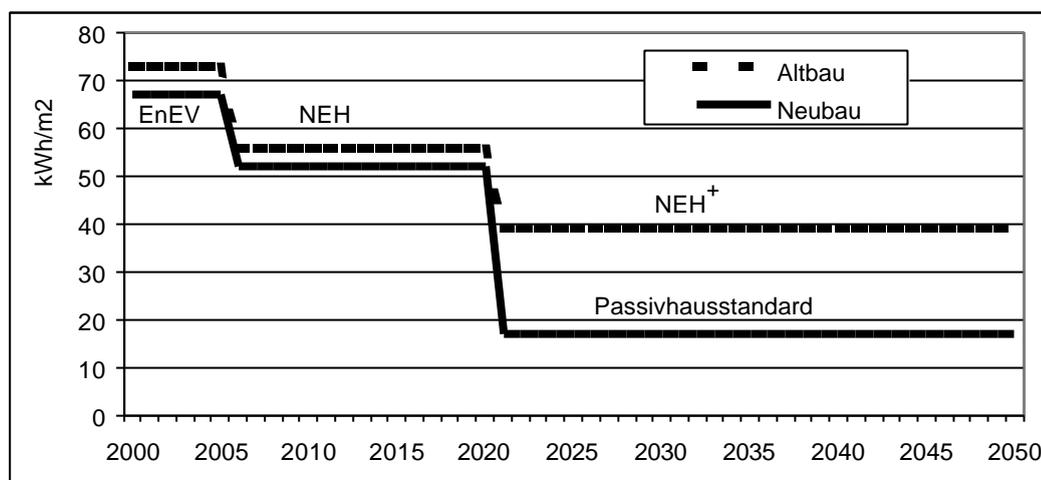
Die ermittelten Potenziale für den Wohnbereich sind in Tabelle 1.4-1 zusammengestellt. Die jährliche Gesamteinsparung für Raumwärmebereitstellung aus Sanierung, Abriss und Mehrverbrauch erreicht bis 2020 rund 448 PJ, was bezogen auf den Verbrauch von 1999 eine Einsparrate von 22 % bedeutet. Bis 2050 betragen die Potenziale 1253 PJ oder 60 %.

Tabelle 1.4-1: Entwicklung der Energieeinsparung im gesamten Wohngebäudebereich

		2020	2050
Altbaubereich			
Einsparung durch Sanierung	PJ	390	897
Einsparung durch Abriss	PJ	183	523
Neubaubereich			
Netto-Mehrverbrauch	PJ	-125	-167
Summe Alt- und Neubau	PJ	448	1253
Einsparrate bezogen auf Verbrauch 1999	%	22	60

Die Entwicklung des zulässigen, spezifischen Heizwärmeverbrauchs, die den Potenzialschätzungen zugrunde liegt, ist in Abbildung 1.4-1 jeweils für den Alt- und den Neubaubereich dargestellt. Voraussetzung für diese Entwicklung ist eine erste Verschärfung der Energieeinsparverordnung im Jahre 2005 um 20 bis 25 % und eine zweite noch stärkere Verschärfung um 2020. Im zweiten Schritt sollten die zulässigen Heizenergieverbräuche im Altbaubereich um weitere 30 % gesenkt werden und im Neubaubereich sollte generell der Passivhausstandard angestrebt werden. Vor einer Verschärfung der Verordnungen sollte, wie oben schon ausgeführt, das Problem der unzureichenden Sanierungseffizienz und das Problem des unzureichenden Vollzugs der Verordnung politisch gelöst werden. Ohne diese Maßnahmen können die gesetzten Klimaschutzziele nicht erreicht werden.

Abbildung 1.4-1: Unterstellte Entwicklung des Heizenergieverbrauchs im Wohngebäudebereich



Bei den Sanierungspotenzialen im Altbaubereich handelt es sich unter der Prämisse einer volkswirtschaftlichen Betrachtung um wirtschaftliche Potenziale. Bei einzelwirtschaftlicher Betrachtung ist nur ein Teil der Potenziale wirtschaftlich. Der Anteil lässt sich jedoch nur schwer schätzen. Unter dem Aspekt der einzelwirtschaftlichen Betrachtung sind die Altbausanierungspotenziale nicht eindeutig den Kategorien „wirtschaftliche Potenziale“ und „technische Potenziale“ zu zuordnen.

Bei den Einsparpotenzialen durch Abriss von Altbauten und bei den Nettomehrverbräuchen im Neubaubereich handelt es sich im Sinne des Analyserasters der Enquete Kommission um strukturelle Potenziale.

Die Erwartungspotenziale hängen im Gebäudebereich sehr stark vom Vollzug der Verordnungen ab. Gelingt es der Politik nicht, die derzeitige Praxis zu verbessern, dann beträgt das Erwartungspotenzial für 2050 nur ein Drittel bis die Hälfte der oben genannten Gesamtpotenziale.

1.5 Nichtwohnbereich

Der Bereich der Nichtwohngebäude zeichnet sich durch einen sehr inhomogenen Gebäudebestand aus. Je nach Art der gewerblichen Nutzung sind die Gebäude nach Bauweise, Form, Größe und wärmetechnischem Zustand extrem unterschiedlich. Bei der Schätzung der Einsparpotenziale kann des-

halb nicht typologisch vorgegangen werden, wie bei den Wohngebäuden. Ein weiteres Problem ist, dass bei den angegebenen Energieverbräuchen meist nicht erkennbar ist, wie sie sich auf die Heizung der Gebäude und auf die gewerbliche Nutzung verteilen. Der Wärmebedarf für die Raumwärmebereitstellung muss geschätzt werden.

Tabelle 1.5-1 zeigt die Entwicklung des Verbrauchs und der Einsparungen im Nichtwohngebäudebereich. Die Zahlen basieren im wesentlichen auf Prognos 1999, Kleemann et al. 2000/2 und UBA 2000 Band 2. In den Zeilen 1 bis 3 der Tabelle ist die Entwicklung des Gebäudebestandes dargestellt. Gegenüber dem Wohngebäudebestand ist hier eine deutlich höhere Abrissrate zu erwarten. Während im Wohngebäudebereich im Jahre 2050 noch 75 % des heutigen Bestandes vorhanden sind, sind es im Nichtwohnbereich nur noch 43 %. Zum Ausgleich der Abrisse ist eine relativ starke Neubaurate erforderlich. Der Gesamtbestand im Jahre 2050 liegt rund 12 % über dem Gesamtbestand im Jahre 1999.

Tabelle 1.5-1: Entwicklung der Endenergieeinsparung zur Raumwärmebereitstellung im Nichtwohnbereich durch Verbesserung der Gebäudehülle

		1999	2020	2050	
1	Altbau- Gebäudefläche	Mio m ²	1000	687	407
2	Neubau- Gebäudefläche	Mio m ²	0	302	628
3	Gesamt-Gebäudefläche	Mio m ²	937	989	1035
4	Spez. Heizenergie-Verbrauch (Altbau)	kWh/m ²	165	132	88
5	Spez. Heizenergie-Verbrauch (Neubau)	kWh/m ²	100	75	55
6	Nutzungsgrad der Heizung Altbau ¹⁾		0,78	0,78	0,78
7	Nutzungsgrad der Heizung Neubau		0,9	0,9	0,9
8	Endenergieverbrauch Altbau	PJ	756	500	221
9	Endenergieverbrauch Neubau	PJ	0	91	138
10	Endenergieverbrauch Gesamt	PJ	756	591	359
11	Gesamteinsparung bezogen auf 1999	PJ	0	165	397
12	Gesamteinsparung bezogen auf 1999	%	0	22	52

¹⁾ Es wurde der Wert aus dem Wohngebäudebereich übernommen

Bei der Entwicklung des mittleren Verbrauchs in Zeile 4 ist eine Sanierungsrate von 2 % pro Jahr, bezogen auf die Gebäudefläche, unterstellt. Dabei wurde wie im Wohngebäudebereich eine Sanierungseffizienz von 100 % zugrunde gelegt. Bei der Entwicklung der flächenbezogenen Verbräuche im Neubaubereich wurde ähnlich wie im Wohngebäudebereich im Jahre 2005 eine Verschärfung der Verordnung um 25 % angenommen, die bis 2020 gelten soll. Danach wurde eine weitere Verschärfung um 25 % unterstellt.

In den Zeilen 6 und 7 ist keine Verbesserung des mittleren Nutzungsgrades des Bestandes unterstellt worden. Dadurch beziehen sich die Einsparungen nur auf die Gebäudehülle.

Die Zeilen 11 und 12 der Tabelle 1.5-1 zeigt die Einsparungen bezogen auf den Referenzverbrauch im Jahre 1999. Bis 2020 beträgt das Einsparpotenzial 165 PJ oder 22 % und im Jahre 2050 werden 397 PJ oder 52 % erreicht.

Literatur für Kapitel 1

Bauakademie (1990): Bauakademie der DDR: Gebäudeatlas – Mehrfamilienwohngebäude der Baujahre 1880 bis 1980, Verlag Bauinformation, Berlin 1990

DIW (2000), Energiebilanz insgesamt, EXCEL Tabellen, www.diw-berlin.de.

Feist W. (1998): Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Passiv Haus Institut Darmstadt.

Feist W. (2001), Passivhaus-Institut Darmstadt, mündl. Mitteilung zum Potenzial von Passivhäusern.

Feist W. (2000), Passivhaus-Ein neuer Standard mit hohem Entwicklungspotenzial, Zeitschrift „EnergieEffizientes Bauen“, 1/2000, 1. Jahrgang, Seite 3-8.

Gruson C. et al. (1994): Kostenermittlung für wärmetechn. Maßnahmen an der Gebäudehülle, Forschungszentrum Jülich, IKARUS Projektbericht 5-10, Jülich.

IHLGB (1991): R. Rosin, P. Glitz, H. Borges, G. Lorenz: Gebäudetypologie und spezifischer Energiebedarf für den Wohnungsbestand in den neuen Bundesländern, Institut für Lüftung, Heizung und Grundlagen der Bautechnik (IHLGB), Berlin 1991

IKARUS-DB (1999): IKARUS-Datenbank Version 3.1, entwickelt vom Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1999

IKARUS-Datenbank (2000), Version 3.1, Update Frühjahr 2000, Fachinformationszentrum Karlsruhe.

IWU (1991): W. Ebel, W. Eicke, W. Feist, W. Gabler: Ergänzungen zur Studie „Energiesparpotential im Gebäudebestand“, Bericht BMFT TP 5.02.1, Oktober 1991, Institut Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt, 1991

Käser R. und Seiler B. (2000), Scheune wird zum Passivhaus, Zeitschrift „EnergieEffizientes Bauen“, 4/2000, 1. Jahrgang.

KfW (2001), Informationsblatt „KfW-CO₂-Gebäudesanierungs-Programm, KfW-Informationszentrum Frankfurt am Main.

Kleemann M. et al. (1999): CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das CO₂-Minderungsprogramm der KfW, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 17.

Kleemann M., Kuckshinrichs W. und Müller M. (2000/1), Emissionsreduzierung und Beschäftigungseffekte durch Gebäudesanierung, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 50. Jg. (2000) Heft 6.

Kleemann M., Heckler R., Kolb G. und Hille M. (2000/2): Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 23.

Mehr Zukunft für die Erde (1995), Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz, Schlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), 1995 Economica Verlag GmbH, Bonn.

Pfäffinger J. (2000), 10 Jahre im Passivhaus, Bewohner Interview, Zeitschrift „EnergieEffizientes Bauen“, 4/2000, 1. Jahrgang, Seite 54-55.

PROGNOS (1999), Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, Basel 1999.

UBA (2000), Klimaschutz durch Minderung von Treibhausgasemissionen im Bereich Haushalte und Kleinverbrauch durch klimagerechtes Verhalten, Band 1 und 2 und Anlagenband zu Band 1, Forschungsbericht 204 01 120.

2 Einsparpotenziale durch Verhaltensänderungen

2.1 Wohngebäudebereich

Der Energieverbrauch zur Raumwärmebereitstellung wird im wesentlichen durch die folgenden Parameter beeinflusst, die wiederum vom Verhalten des Nutzers abhängen:

- die Raumtemperatur und
- die Luftwechselzahl.

Nach der DIN 4701 soll die Innentemperatur in beheizten Wohnräumen 20° C betragen und in Bädern 24° C. In Nebenräumen wie Fluren, Vorräumen und WC können die Temperaturen bei 15° C liegen. Verschiedene Umfragen geben Bereiche für die mittlere Raumtemperatur von ca. 20 bis 23° C an (UBA 1999). Durch die Verringerung der Raumtemperatur um 1° C wird der Verbrauch um 7 bis 8 % verringert. Das zeigt, dass hier nicht unerhebliche Sparpotenziale liegen.

Die Luftwechselzahl gibt an, wie oft das Luftvolumen in einem Raum innerhalb einer Stunde vollständig ausgetauscht wird. Neben der Fensterstellung beeinflussen die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und die Windgeschwindigkeit den Luftwechsel. Aus hygienischen und bauphysikalischen Gründen wird zur Schadensvermeidung eine Luftwechselzahl von 0,8 h⁻¹ vorgeschlagen (Hartmann et al. 1999). Dies erfordert in der Regel eine kurzzeitige Lüftungsdauer bei gekipptem Fenster von 10 bis 20 Minuten. Ein dauernd gekipptes Fenster hat Luftwechselzahlen von 1,5 bis 4 und kann den Energieverbrauch bis zum Doppelten vergrößern. Werden die Fenster dauernd halb geöffnet, dann kann sich der Verbrauch im ungünstigsten Falle verdreifachen bzw. versechsfachen. Diese Zahlen zeigen eindringlich, welche energetische Bedeutung richtiges Lüften hat. Durch falsches Lüften kann die Wirkung jeder guten Sanierung wieder völlig zunichte gemacht werden.

In UBA 1999, Anlagenband zum Band 1 wird ein verhaltensbedingtes Einsparpotenzial für die Raumwärmebereitstellung in Deutschland für 1999 von 30 % oder 625 PJ des Verbrauchs angegeben. Hier liegt eine Reduzierung der mittleren Temperatur von 2° C und eine Luftwechselzahl von nur 0,4 h⁻¹ zugrunde. Es erscheint plausibel, dass diese Bedingungen bei einem Großteil der Nutzer nicht umsetzbar sind. Außerdem dürfte die niedrige Luftwechselzahl insbesondere bei älteren Gebäuden zu Feuchteproblemen führen (Hartmann et al. 1999). Deshalb wird in UBA 1999 nur ein Erwartungspotenzial von 10,4 TWh oder 181 PJ angegeben. Bezogen auf den Gesamtverbrauch im Jahre 1999 von 2083 PJ entspricht dies einem relativen Anteil von 8,7 %. Diese Prozentzahl wird für die Schätzung der zukünftigen Potenziale fortgeschrieben.

2.2 Nichtwohngebäude

In UBA 2000, Band 2 werden für den Nichtwohnbereich verhaltensbedingte Einsparpotenziale von 25 bis 30 % des Verbrauchs angegeben. Bezogen auf den Gesamtverbrauch für die Raumwärmebereitstellung von 213 PJ entspricht dies 53 bis 64 PJ. Allerdings wird dieses Potenzial als eine Obergrenze angesehen, die sich in der Praxis wohl nicht umsetzen lässt. Das Erwartungspotenzial bezüglich der Verhaltensänderungen wird mit rund 7 % (15 PJ) für 2020 angegeben. Die Zurückhaltende Annahme beruht auf speziellen Hemmnissen im Nichtwohngebäudebereich. So gibt es oft keine individuellen

Regelungsmöglichkeiten (z.B. Großraumbüro oder Werkhalle) oder der Komfortanspruch ist sehr hoch (z.B. Hotels, Krankenhäuser). Außerdem fehlt bei dem Nutzer der Anreiz zum Sparen, da er nicht unmittelbar von der Einsparung profitiert (UBA 2000, Band 2).

Literatur für Kapitel 2

Kleemann M., Heckler R., Kolb G. und Hille M. (2000/2): Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 23.

Hartmann T., Kremonke A. und Reichel D. (1999), Gewährleistung einer guten Raumlufthqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste, Forschungsbericht des Instituts für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung Dresden.

UBA (2000), Klimaschutz durch Minderung von Treibhausgasemissionen im Bereich Haushalte und Kleinverbrauch durch klimagerechtes Verhalten, Band 1 und 2 und Anlagenband zu Band 1, Forschungsbericht 204 01 120.

3. Optimierung der Baugeometrie

Im Rahmen dieser Untersuchung werden nur die beiden wichtigsten Optimierungsmaßnahmen für die Gestaltung der Baugeometrie von Neubauten behandelt. Die Massnahmen sind:

- Die Minimierung des Verhältnisses von Gebäudeoberfläche zu Volumen (A/V). Je kleiner A/V ist, umso geringer sind die Transmissionsverluste und um so geringer ist der Heizwärmebedarf. Erreicht wird dies durch Vereinfachung der Bauform und durch kompakte mehrgeschossige Zeilenbauten.
- Die Ausrichtung der größten Fensterfläche nach Süden, um den maximalen Gewinn an Sonneneinstrahlung zu erzielen. Dies setzt allerdings eine entsprechend effiziente Verglasung der Fenster voraus und einen Sonnenschutz im Sommer. Bei mehrgeschossigen Zeilenbauten ergibt eine Ost-West Ausrichtung die optimale Sonnennutzung.

Einsparpotenziale durch geringes A/V Verhältnis: Die Gebäudeform hat einen erheblichen Einfluß auf den Energieverbrauch, wie die folgenden Beispiele zeigen.

- Ein kompaktes Mehrfamilienhaus mit $A/V=0,4$ hat im Mittel gegenüber einem freistehenden Einfamilienhaus ($A/V=0,8$) einen um fast 30 % verminderten Wärmebedarf.
- Ein freistehendes Einfamilienhaus mit Steildach ($A/V=0,8$) hat einen 18 % niedrigeren Wärmebedarf als ein gleichgroßer Winkelbungalow mit Flachdach ($A/V=1,06$) (Scharping et al. 1997).
- Ein Einfamilien-Reihenhaus ($A/V=0,45$) kann einen bis zu 20 % niedrigeren Energieverbrauch haben als ein freistehendes Einfamilienhaus ($A/V=0,75$). Deshalb empfehlen Fisch et al. 2001 grundsätzlich die geschlossene Bauweise statt der offenen.

Da aber beim Wohnungsbau der Haustyp, z.B. Ein- oder Mehrfamilienhaus, aufgrund anderer Überlegungen festgelegt wird, stehen diese Potenziale praktisch nicht mehr in vollem Umfang zur Verfügung. Lediglich bei der individuellen Gestaltung können noch kleinere Potenziale ausgeschöpft werden. Es sollen keine komplizierten Gebäudeformen (Kühlrippenarchitektur) geplant werden (Fisch et al 2001). Bei kleineren und mittleren Gebäuden kann (umgerechnet nach Roth 1982) durch eine Vereinfachung der Bauform z.B. ohne Vor- und Rücksprünge sowie ohne Gauben und Erker und durch eine kompaktere Gesamtform eine Einsparung von rund 5 % an einem Einzelgebäude erzielt werden. Dies betrifft aber nur den Neubau und da auch nur einen Teil der Einfamilienhäuser und der kleinen Mehrfamilienhäuser. Die großen Mehrfamilienhäuser werden ohnehin schon mit minimalem A/V Verhältnis gebaut. Dazu ist noch zu sagen, dass generell die Bedeutung des A/V Verhältnisses abnimmt, je besser die Wärmedämmung ist (Marko und Braun 1997).

In Tabelle 3-1 sind die Netto-Mehrverbräuche der Neubauten nach Tabelle 1.3.2-1 und die erreichbare Einsparung für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie kleine Mehrfamilienhäuser ausgewiesen. Dabei wurde vorausgesetzt, dass diese Gebäudetypen einen Anteil von 70 % an den zukünftigen Neubauten haben und die großen Mehrfamilienhäuser von rund 30 % (IKARUS Datenbank 2000, Kleemann et al. 2000). Bei den in Frage kommenden 70 % wurde weiterhin unterstellt, dass bei der Hälfte der Gebäude die Forderung nach minimalem A/V Verhältnis ohnehin erfüllt wird. Dass diese Annahme nicht unrealistisch ist, zeigt die heute übliche Baupraxis.

Die Einsparpotenziale von 2 PJ für 2020 und von 3 PJ für 2050 sind Erwartungspotenziale. Das größte Hemmnis bei der Umsetzung dieser Potenziale dürfte die von den Architekten beanspruchte gestalterische Freiheit sein.

Tabelle 3-1: Einsparpotenziale durch Verringerung des A/V Verhältnisses

		2020	2050
Nettomehrverbrauch der Neubauten	PJ	125	167
Einsparpotenzial	PJ	2	3

Einsparpotenziale durch Südausrichtung der größten Fensterfläche: Die passive Nutzung der Sonnenenergie setzt eine optimale Wahl des Standortes und der Gebäudeausrichtung voraus. Ziel dieser Maßnahmen ist eine maximale Südfäche und möglichst kleine Fassadenflächen in andere Richtungen. Innerhalb der Bebauungsgrenzen sollte der Architekt das Haus so nahe wie möglich am nördlichen Grundstücksrand anordnen. Damit kann dann der Eigentümer auf der verfügbaren Südfäche des Grundstückes die gewollte Besonnung und die ungewollte Beschattung der Südseite des Hauses selbst beeinflussen (UBA 1997, Lohr et al. 1991). Zusätzlich sollte eine Windschutzbepflanzung konzipiert werden und eine Fassadenbegrünung (nicht nach Süden) angestrebt werden (Fisch et al 2001).

Die Einflüsse einer falschen oder ungünstigen Ausrichtung der Gebäude können erheblich sein. Nach Roth 1982 umgerechnet beträgt die Einsparung am Einzelgebäude 10 bis 20 %. Die Hochrechnung auf die zukünftigen Neubauten ist allerdings problematisch. Da die Südausrichtung in der Regel heute schon praktiziert wird, wenn das Grundstück und die Lage es zulassen, ist ein zusätzliches Potenzial kaum abzuschätzen. Im Einzelfall wird eine Südausrichtung aufgrund der lokalen Gegebenheiten nicht möglich sein, so dass ein Potenzial an diesen Stellen nicht existiert. Außerdem wird der Wärmege-
winn durch die Sonneneinstrahlung beim Wärmebedarf des Gebäudes mit den heute üblichen Re-
chenverfahren ohnehin berücksichtigt.

Die Gestaltung der Häuser mit den größten Fenstern nach Süden wird in der Praxis üblicherweise realisiert, wenn die lokale Situation dies ermöglicht. Ob in Zukunft die Fenster vergrößert werden, um einen größeren passiven Solargewinn zu erzielen, wird davon abhängen, inwieweit hocheffiziente Verglasungen preiswert zur Verfügung stehen.

Solargewinne treten auch im Sommer auf und sind dann aber unerwünscht. Große Fensterflächen tragen deshalb in der warmen Jahreszeit zu einer Überhitzung bei, wenn kein geeigneter Sonnenschutz vorgesehen wird (Bundesarchitektenkammer 1996).

Literatur für Kapitel 3

Bundesarchitektenkammer (1996), Hrsg., Energiegerechtes Bauen und Modernisieren, Wuppertal Institut und Planungs-Büro Schmitz Aachen, Birkhäuser Verlag.

Fisch N. et al. (2001), Solarstadt - Konzepte, Technologien, Projekte, Verlag W. Kohlhammer, ISBN 3-17-015418-4.

IKARUS-Datenbank (2000), Version 3.1, Update Frühjahr 2000, Fachinformationszentrum Karlsruhe.

Kleemann M., Heckler R., Kolb G. und Hille M. (2000/2): Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 23.

Lohr A. et al. (1991), Energie- und umweltbewußtes Bauen mit der Sonne, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, ISBN 3-88585-799-5.

Marko A. und Braun P. (1997), Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden, Springer Verlag, ISBN 3-540-60369-7.

Roth U.(1982), Rationelle Energieverwendung in der Bauleitplanung, in Vohenstrauß-Seminar: zukünftige Energieversorgung im ländlichen Raum, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Arbeitspapiere Heft 4, Bonn 19982.

Scharping H., Heitmann G. und Michael K. (1997), Niedrigenergiehäuser in der Praxis, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, ISBN 3-8249-0372-5.

UBA (1997), Hrsg., Leitfaden zum ökologisch orientierten Bauen, C.F. Müller Verlag Heidelberg, ISBN 3-7880-7521-X.

4 BHKW zur Gebäudeversorgung

4.1 Defizitanalyse der Vorarbeiten der vorhergehenden Enquete Kommission

Im Rahmen der vorhergehenden Enquete-Kommission wurden zum Thema Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) insgesamt drei Studien vergeben, die sowohl den industriellen KWK-Einsatz (Pruscek et al. 1994) als auch die öffentliche Siedlungs-KWK (Schulz et al. 1994, Prognos et al. 1994) analysieren und zwischen alten und neuen Bundesländern unterscheiden. Schwerpunkt der Studien ist die Abschätzung möglicher KWK-Ausbaupotenziale.

Eine eingehende Differenzierung zwischen Nah- und Fernwärmeversorgung erfolgt in den beiden Studien, die sich mit der öffentlichen Siedlungs-KWK auseinandersetzen, nicht. Eine detaillierte Betrachtung der Nahwärme-KWK (z.B. BHKW-Einsatz zur Objektversorgung, Einsatz von BHKW zur Nahwärmeversorgung, Einsatz von Kleinst-BHKW in Wohngebäuden) sowie die Abschätzung von Einsatzpotentialen wurde nicht vorgenommen. In (Schulz et al. 1994) wird hinsichtlich des BHKW-Einsatzes lediglich eine qualitative Bewertung vorgenommen, indem u.a. die Bedeutung des BHKW-Einsatzes zur Einzelobjektversorgung, zur Nahwärmeversorgung insbesondere in Kleinstädten sowie zur Bildung von Nahwärmeinseln (spätere Einbindung in größere Netze) hervorgehoben wird.

Unabhängig davon, dass in den von der vorherigen Enquete-Kommission in Auftrag gegebenen Studien zur Nahwärmeversorgung keine genaueren Angaben getroffen wurden, ist darauf hinzuweisen, dass sich die Rahmenbedingungen für die KWK insgesamt sowie den BHKW-Einsatz im speziellen gegenüber 1994 stark verändert haben, was insbesondere großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsüberlegungen hat. Zu nennen sind in erster Linie die durch die Liberalisierung des Strommarktes ausgelösten Strompreisreduzierungen bzw. Reduzierung der Stromerlöse. Weiterhin ist auf die veränderten Randbedingungen hinzuweisen, wie z.B. die Verbändevereinbarung VVII, die evtl. Befreiung von der Mineralölsteuer bzw. Stromsteuer, das KWK-Vorschaltgesetz sowie das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG), die den KWK-Einsatz u.U. gegenüber einer getrennten Stromerzeugung begünstigen können.

4.2 Detaillierung des Energieverbrauchs und der energiebedingten Emissionen

4.2.1 Status Quo, Nahwärme-KWK

Derzeit existiert keine Statistik, die den Bestand von Blockheizkraftwerken vollständig und umfassend beinhaltet. Nach Angaben der ASUE e.V. (ASUE 1999) waren Ende 1997 etwa 5000 motorbetriebene BHKW-Anlagen mit einer Gesamtleistung von etwa 2,3 GW in Betrieb.¹ Diese Angaben basieren auf eine Umfrage, die von der ASUE gemeinsam mit der VDEW durchgeführt wurde. Da die BHKW-Neuinstallationen zwischen 1997 und 1999 gegenüber den Vorjahren um 75% zurückgingen (Gailfuß 2001) und ein weiterer Investitionsrückgang für das Jahr 2000 aufgrund des eingeführten Strommarkt Wettbewerbs festzustellen ist, dürfte die installierte Leistung sich gegenüber Ende 1997 nicht signifikant geändert haben. Etwa 10% der installierten Anlagen sind der Versorgung von Wohngebäu-

Hierbei handelt es sich lediglich um motorbetriebene Blockheizkraftwerke. Kleinere Gasturbinen mit Abwärmenutzung sind hierunter nicht erfasst. Zur Information: Nach /Gailfuß 2000/ waren Ende 1997 etwa 155 kleinere Gasturbinen (<10 MW_{el}) mit einer Gesamtleistung von 520 MW_{el} installiert. Aufgrund des höheren Abwärmepotentialniveaus gegenüber BHKW werden diese hauptsächlich in der Industrie eingesetzt.

den zuzurechnen (Tabelle 4.2.1-1). Allerdings beinhaltet die Rubrik „Sonstige“ ebenfalls Nahwärmeprojekte, die verschiedene Abnehmer aus unterschiedlichen öffentlichen Bereichen versorgen, so dass der Anteil für die Wohngebäudeversorgung etwas höher liegen dürfte.

Tabelle 4.2.1-1: Einsatzgebiete der BHKW-Anlagen, Stand Ende 1997 (ASUE 1999)

Einsatzgebiet	Anteil bezogen auf die Anlagenanzahl
Industrie und Gewerbe	25 %
Deponien	6 %
Kläranlagen	10 %
Öffentliche Gebäude	14 %
Krankenhäuser	6 %
Hallen-/Schwimmbäder	8 %
Wohngebäude	10 %
Sonstige	21 %
GESAMT	100 %

In BHKW werden hauptsächlich Gase als Brennstoff eingesetzt. So schätzt die ASUE (1999), dass rund 54% der installierten Leistung mit Erdgas befeuert werden. Bezieht man den Erdgasanteil von Mischfeuerungen mit ein, liegt der gesamte leistungsbezogene Erdgasanteil sogar bei etwa 75%. Nach (Traube et al. 2001), die sich auf eine Statistik der VDEW beziehen, liegt der Erdgasanteil der BHKW-Siedlungsversorgung sogar bei etwa 93%.

Obwohl es etwa 1300 Anlagen bis zu einer Leistungsgröße von 50 kW_{el} gibt, beträgt ihr Anteil an der gesamten installierten BHKW lediglich 0,7%. Dagegen stellen Anlagen mit einer Leistungsgröße von über 1 MW_{el} mit etwa 80% den größten Anteil dar. Über die den zukünftigen Einsatz von Klein-BHKW herrschen unterschiedliche Meinungen. Während nach (Suttor 2001, Bd. 4 Kpt. 8/5.1) ein Trend zu kleinen BHKW-Anlagen nicht zu erkennen ist, räumen andere (Traube et al. 2001, Gailfuß 1998) der Nahwärme-KWK durchaus gute Chancen ein.

Kurzbeschreibung der heute üblichen Nutzungstechnologien zur Nahwärmeversorgung

Um welche Anlagenkonzepte es sich bei der Nahwärmeversorgung im Detail handelt, geht aus den Statistiken nicht hervor. Angaben zu Einzelanlagen finden sich -wenn überhaupt- in den Referenzlisten der Hersteller bzw. Lieferanten sowie Anlagendokumentationen oder speziellen Publikationen. (vgl. Suttor 2001 Bd. 4) Nachfolgend findet sich eine beispielhafte Kurzbeschreibung von zwei bestehenden BHKW-Nahwärmeprojekten. Hierbei handelt es sich um einen erdgasbasierten BHKW-Einsatz zur Versorgung von mehreren Gebäuden. Die BHKW decken durchgehend über das ganze Jahr den Warmwasserbedarf sowie im Winter einen Großteil der Wärme ab. Während sie leistungsmäßig für 15 bis 20% der wärmeseitigen Spitzenlast ausgelegt sind, betragen die wärmeseitigen jährlichen Arbeitsanteile ca. 50 bis 75%. Die restliche Wärme wird in einem Spitzenlastkessel produziert. Durch die Installation von relativ großen Warmwasserspeichern wird die Auslastung der Anlagen erhöht. Die in Tabelle 4.2.1-2 aufgelisteten BHKW erreichen Betriebsstundenzahlen von etwa 6000 h und sogar darüber.

Eine Darstellung typischer BHKW-Beispiele für die Siedlungs-KWK differenziert nach Anwendungsfällen findet sich in (Traube et al. 2001). In dieser Studie werden standardisierte BHKW-Versorgungsobjekte (Tabelle 4.2.1-3) gewählt, die nicht nur das eigentliche BHKW sondern auch die Komponenten Spitzenkessel, Wärmespeicher etc. umfassen. Die dort beschriebenen Versorgungssysteme entsprechen dem Stand der Technik. In der Studie werden auch BHKW-Systeme mit Brennwertechnik berücksichtigt. Gegenüber heutigen konventionellen BHKW führt der Einsatz von Brennwertechnik zu einer Primärenergieeinsparung von ca. 10%.

Die primärenergieseitige Einsparung (ohne Brennwertechnik) gegenüber einer getrennten Erzeugung (Heizzentrale/dez. Heizkessel sowie GuD-Stromerzeugung) liegt je nach Versorgungsfall zwischen 10 und 16%. Da sowohl die gekoppelte als auch die getrennte Erzeugung erdgasbasiert ist, sind die prozentualen Angaben identisch mit der analogen CO₂-Einsparung.

Tabelle 4.2.1-2: BHKW-Einsatz in der Nahwärmeversorgung (realisierte Einzelbeispiele)

<p>Nahwärmeversorgung in Bad Homburg</p> <p><i>Versorgung von sieben Mehrfamilienhäusern (240 Wohnungen) sowie eines Jugendzentrums (Weiterer Anschluss von 60 Wohnungen geplant)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Nahwärmenetz: 320 Doppelmeter, Stahl-Mediumrohre mit Hartschaumisolierung mit entsprechenden Hausübergabestationen (100 bis 300 kW) • BHKW: 2 x 52 kW_{el}, 2 x 100 kW_{th} sowie 2 x 20 kW_{th} (Brennwert) • 6 Zylinder-4 Takt-Gas-Otto-Motor • Gaskesselanlage 2 x 720 kW • Wärmespeicher: 10 m³ • Inbetriebnahme 1998 <p><i>Auslegungsdaten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Jährliche Stromproduktion: 675 MWh • Jährliche Wärmeproduktion: 3000 MWh (davon jeweils 50% BHKW u. Kessel) • Jährlicher Brennstoffverbrauch: 3775 MWh
<p>Europahaus Langenhagen</p> <p><i>Nahwärmeversorgung für ein Objekt (16 neue Doppelhäuser) mit 64 Wohnungen (4171 m² Wohnfläche)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • BHKW energiewerkstatt ASV 18/43 • 2 x 14 kW_{el}, 2 x 32 kW_{th} • Spitzenlastkessel 290 kW • Zentraler Warmwasserspeicher: 4m³ • Inbetriebnahme 1996 <p><i>Auslegungsdaten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Jahresstromerzeugung: 153, 5 MWh • Jahreswärmebedarf: 699 MWh (davon durch BHKW etwa 75%) <p>Betriebsstundenzahl: 5000 bis 6000 h</p>

Quelle: (Suttor 2001, Bd. 4)

Tabelle 4.2.1-3: Beispiele von BHKW-Versorgungsobjekten für die Siedlungsversorgung, Stand der Technik (Traube et al. 2001)

<p>Mehrfamilienhaussiedlung, vorhandenes Wohngebiet mit Zeilenbebauung, 30 sanierte Mehrfamilienhäuser mit jeweils 20 Wohnungen (Wärmeversorgungsfall 2)</p> <p>Jährlicher Gesamtwärmebedarf: 3551 MWh Nahwärmeverteilungsverluste am Wärmeabsatz: 2,8% BHKW (Erdgas):</p> <ul style="list-style-type: none"> Pe=310 kW Pth=470 kW (25% bez. auf die Höchstlast) ηe=35% ηth=54% Jahresnutzungsdauer: 5540 h (gemäß Jahresdauerlinie) Jahreswärmeerzeugung: 2604 MWh (71% der gesamten Wärmedeckung) Jahresstromerzeugung: 1696 MWh <p>Spitzenlastkessel:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pth=1600 kW ηth=94% Jahreswärmeerzeugung: 1046 MWh Jahresnutzungsdauer: 654 h <p>Primärenergieeinsatz (gesamt incl. Spitzenlastkessel): 6362 MWh</p>
<p>Neuabaugebiet mit ausschließlicher Wohnbebauung (Baujahr ab 2000), 8 Mehrfamilienhäuser jeweils 18 Wohnungen (320 Wohnungen), (Wärmeversorgungsfall 1b)</p> <p>Jährlicher Gesamtwärmebedarf: 719 MWh Nahwärmeverteilungsverluste am Wärmeabsatz: 6,1% BHKW (Erdgas):</p> <ul style="list-style-type: none"> Pe=54 kW Pth=101 kW (26% bez. auf die Höchstlast) ηe=31% ηth=58% Jahresnutzungsdauer: 5522 h (gemäß Jahresdauerlinie) Jahreswärmeerzeugung: 558 MWh (73% der gesamten Wärmedeckung) Jahresstromerzeugung: 294 MWh <p>Spitzenlastkessel:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pth=330 kW ηth=94% Jahreswärmeerzeugung: 205 MWh Jahresnutzungsdauer: 622 h <p>Primärenergieeinsatz (gesamt incl. Spitzenlastkessel): 1180 MWh</p>
<p>Vorhandenes Wohngebiet mit Zeilenbebauung (Baujahr 1975); 40 sanierte MFH jeweils 20 Wohnungen, zusätzlich Neubausiedlung mit 20 Mehrfamilienhäusern mit jeweils 18 Wohnungen und 500 Reihenhäusern gemäß EEV 2000, (Wärmeversorgungsfall:3b)</p> <p>Jährlicher Gesamtwärmebedarf: 10253 MWh Nahwärmeverteilungsverluste am Wärmeabsatz: 8,9% BHKW (Erdgas):</p> <ul style="list-style-type: none"> Pe=1080 kW Pth=1360 kW (23% bez. auf die Höchstlast) ηe=38% ηth=48% Jahresnutzungsdauer: 5707 h (gemäß Jahresdauerlinie) Jahreswärmeerzeugung: 7762 MWh (73% der gesamten Wärmedeckung) Jahresstromerzeugung: 6097 MWh <p>Spitzenlastkessel:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pth=4910 kW ηth=94% Jahreswärmeerzeugung: 3405 MWh Jahresnutzungsdauer: 694 h <p>Primärenergieeinsatz (gesamt incl. Spitzenlastkessel): 21202 MWh</p>

4.2.2 Einsatz von Kleinst-BHKW (außer Brennstoffzelle)

Durch die Verringerung von Leistungsgrößen erhofft man sich zukünftig ein größeres Anwendungspotential insbesondere zur Wärmeversorgung in Ein- und Mehrfamilienhäusern aber auch zur Objektversorgung im Kleinverbrauchssektor sowie im Bereich der kommunalen Versorgung. Unter Mini-BHKW (Kleinst-BHKW) werden Anlagen verstanden, deren Leistungsspektrum im Bereich 5 bis 15 kW_{el} liegt. Im Rahmen eines Arbeitskreises hat die VDEW die Einsatzmöglichkeiten sowie die Wirtschaftlichkeit derartiger Kleinst-BHKW untersuchen lassen. Nachfolgend finden sich kurz skizziert einige Ergebnisse dieser Analysen; eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in (Suttor 2001, Bd. 4, Teil 3/5.6).

Wird ein Kleinst-BHKW für ein Mehrfamilienhaus nach dem Wärmebedarf und für eine Ausnutzungsdauer von 5000 Stunden ausgelegt, zeigen Auslegungsrechnungen, dass die motorische thermische Auslegungsleistung nur etwa 10 bis 30 Prozent betragen darf. Hiervon ausgehend wird auf eine Mindestgröße für die Wohngebäude geschlossen. Unterschiedliche Wärmestandards unterstellt, liegt der jahresbezogene Wärmeerzeugungsanteil von BHKW zwischen 38 und 75%. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen wird zwischen einer kompletten Neuerrichtung (Vollkostenrechnung) sowie einer BHKW-Einbindung in eine bestehende Heizzentrale unterschieden. Der Arbeitskreis stellt fest, dass bei Neuabau eines BHKW-Nahwärmesystems lediglich bei dem schlechtesten Wärmedämmstandard aller untersuchten Varianten ein Kostenüberschuss erzielt wird. Bei einem relativ guten Wärmestandard ist nach Ansicht des Arbeitskreises ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich. Bei einer nachträglichen BHKW-Einbindung ergeben sich Jahreskostenüberschüsse bei allen Wärmestandards sofern der Anteil des eigengenutzten Stroms an der BHKW-Erzeugung über 60% liegt. Letztendlich gelangt der Arbeitskreis zu dem Schluß, dass ein Kleinst-BHKW nur bei Wärmeverbrauchern mit einem hohen Grundlastwärmebedarf möglich ist. Ein Einsatz in Wohngebäuden erfordert eine Wärmehöchstlast von mindestens 70 kW.

Eine relativ neue Entwicklung stellt das leistungsmodulierte Kleinst-BHKW dar, das sich dem jeweiligen Bedarf an Strom und Wärme anpasst und für die Versorgung von größeren Einfamilien- und Zweifamilienhäusern sowie für Gewerbebetriebe entwickelt wurde. Über eine Impulsführung wird die erzeugte Strom- und Wärmemenge in einem Bereich von 1,5 bis 5 kW_{el} geregelt. Die Wärme wird in einen Pufferspeicher gegeben und bei Bedarf verbraucht. Durch diese Konstellation erhofft man sich einen monovalenten Betrieb, der eine zusätzliche konventionelle Heizung erübrigt. (Suttor 2001, Kpt. 3/5.4)

Stirling-Motor

Eine Alternative zu Blockheizkraftwerken stellen sogenannte Stirling-Motoren dar. Der Vorteil des Stirlingmotors liegt in der Unabhängigkeit der Wärmezufuhr. Prinzipiell läßt sich hierdurch der Einsatz von Biomasse in Form von Feststoffverbrennung in einem KWK-Prozess nutzen. In diesem Zusammenhang ist auf Stirling-Motor-Konzept (40 kW_{el}, 100 kW_{th}) in Krailling/München hinzuweisen, bei dem Wärmeversorgung durch zwei mit Hackholzschnitzel befeuerten Kesseln geschieht (Suttor 2001, Teil 3.9.1,8.3.12). Problematisch bei der marktreifen Entwicklung von Stirlingmotoren sind die hohen Anforderungen an die Hochtemperaturbeständigkeit von Wärmetauscher und Regenerator sowie an

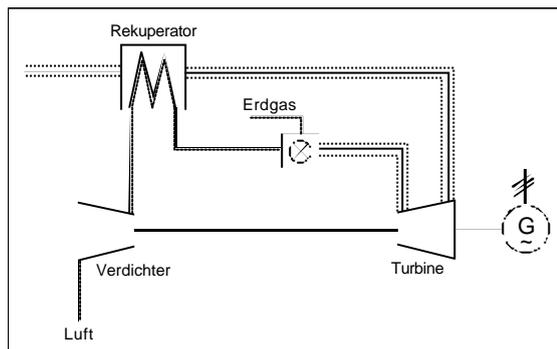
die Dichte des Arbeitsvolumens (150 bis 190 bar). Heutige Prototypen erreichen elektrische Wirkungsgrade von mehr als 40%. (Suttor 2001, Teil 5.8.8).

Stirling-Motoren lassen sich sowohl für die Prozessdampf- wie auch für Fernwärmeversorgung einsetzen. Allerdings existieren bislang kaum Betriebserfahrungen. Nach Einschätzung von (AGFW 2000) scheint die Einführung von gasbetriebenen Stirling-Motoren durchaus möglich, da hier das Entwicklungspotential als hoch eingeschätzt wird.

Mikrogasturbine

Stand der Technik: Aus der Turboladetechnik, wie sie in Fahrzeugmotoren verwendet werden, und aus Hilfsantrieben von Flugzeugen, die zur Bordenergieversorgung genutzt werden, wurden s.g. Mikrogasturbinen entwickelt, die Strom sowie Wärme erzeugen. Sie können mit knapp 30 kW_{el} bis 200 kW_{el} im unteren Leistungsbereich der KWK-Anlagentechnik eingeordnet werden. Es handelt sich um kleine Turbinensysteme mit Drehzahlen von 100.000 U/min und mehr. Hauptkomponenten sind der Verdichter, Brennkammer, Turbine, Generator und Rekuperator, der der internen Luftvorwärmung dient, so dass elektrische Wirkungsgrade von 25 – 30 % erreicht werden, vgl. Abbildung 4.2.2-1.

Abbildung 4.2.2-1: Vefahrensschema eines Mikrogasturbinensystems

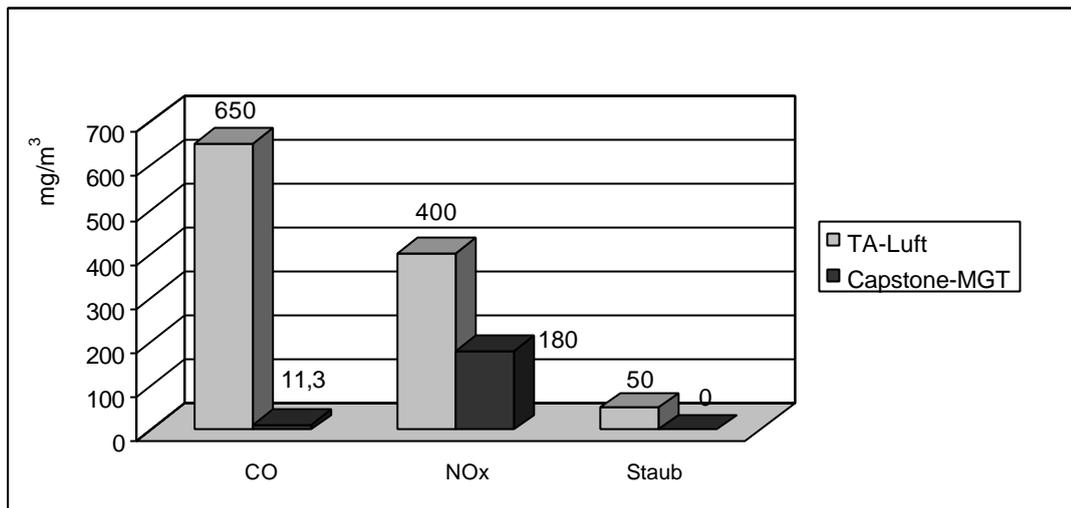


In der Regel soll der Wärmeeinfall dieser Konzepte zur Warmwasserbereitung dienen, aber bei Abgastemperaturen von knapp 300 °C ist auch eine Dampferzeugung möglich, so dass sich eine Ausweitung der Einsatzmöglichkeiten in industrielle wie gewerbliche Bereiche ergibt. Schließlich ermöglicht das Temperaturniveau auch eine Einbindung von Absorptionskältemaschinen zur Klimakälteerzeugung, wodurch insbesondere in der wärmeren Jahreszeit, die von schwacher Wärmenachfrage geprägt ist, eine höhere Anlagenauslastung erreicht wird.

Kosten und Emmissionsvorteile: Das Interesse an Mikrogasturbinen besteht erst seit kurzer Zeit, so dass es bislang weltweit nur wenige Hersteller gibt, die solche Systeme anbieten. Die Investitionskosten für diese GT-Bauarten liegen im Bereich von 1.700 und 3.000 DM/kW_{el} und sind damit vergleichbar zu "konventionellen" KWK-Systemen. Während bei 4.000 bis 8.000 Betriebsstunden in der Regel nur geringfügige Wartungsarbeiten durchgeführt werden sollen, stehen nach 30.000 Stunden größere Instandhaltungsmaßnahmen an. Insgesamt werden als Instandhaltungskosten von den Herstellern 1,5 – 3,0 Pf/kW_{el} angegeben. (Blesing 2001; Dielmann et al. 2000)

Dielmann und Blesing sehen für Mikrogasturbinen wegen der günstigen Kosten, der guten Leistungsdaten sowie der geringen Emissionen, vgl. Abbildung 4.2.2-2, ein vielseitiges Anwendungsspektrum im Bereich kleiner KWK-Anlagen. Dort können sie zu gasmotorischen Anlagen in Konkurrenz treten und in Bereichen eingesetzt werden, in denen Gasmotoren keine Wirtschaftlichkeit erreichen.

Abbildung 4.2.2-2: Vergleich der Grenzwerte TA-Luft mit Emissionsdaten einer Capstone Mikrogasturbine (Dielmann et al. 2000)



Kombination von Brennstoffzelle und Mikrogasturbine: Eine deutliche Steigerung des elektr. Wirkungsgrades berechnen (Bohn et al. 2001) und auch (Winkler 2000, 2001) durch Kombination von SOFC mit Mikrogasturbinen. Da diese Systeme bei hohen Temperaturen arbeiten, werden an die verbindenden Komponenten hohe Temperaturanforderungen gestellt. So kann das Verschalten der beiden Systeme durch einen Rekuperator eine Wirkungsgradsteigerung auf knapp 53 % bewirken. Durch Temperaturanhebung der Brennstoffzellenabgase auf ein Turbineneingangsniveau von 1.300°C, können Wirkungsgrade von über 60 % berechnet werden. (Winkler 2000, 2001) sieht für kombinierte Hochtemperaturbrennstoffzellensysteme ein Wirkungsgradpotential von ca. 80 %.

In Anbetracht der hohen Anforderungen einerseits, die solche Systeme an Werkstoffe und Prozeßtechnik stellen, und des Entwicklungsstandes der Techniken andererseits, ist nicht davon auszugehen, dass diese Systeme für den Einsatz im Energiesektor Haushalt in den nächsten Jahren realisiert werden, zumal solche Systeme vermutlich auch in den MW-Leistungsbereich vorstoßen werden.

4.3 Identifizierung und Quantifizierung der Einsparoptionen und ihrer Potenziale

4.3.1 BHKW-Einsatz im Nahwärmebereich (Gebäude)

Aufgrund der Aktualität des KWK-Themas sind –insbesondere in jüngerer Zeit- eine Vielzahl von Studien und Expertisen angefertigt worden. Allerdings ist die Motivation und damit die Fragestellung der jeweiligen Arbeiten sehr unterschiedlich. Insbesondere vor dem Hintergrund des von der Bundesregierung im Oktober 2000 verabschiedeten Klimaschutzprogramms (Klima 2000), in dem der KWK eine

bedeutende Rolle als CO₂-Reduktionsmöglichkeit (-10 Mio t bis zum Jahr 2010 und -23 Mio t bis zum Jahr 2020) zugemessen wird, sowie der EU-Forderung, den KWK-Stromanteil zu verdoppeln, wurden eine Vielzahl von Studien und Expertisen angefertigt. Prinzipiell lassen sich die Studien hinsichtlich ihrer Zielsetzung wie folgt unterscheiden:

- Ein Teil der Studien (Traube et al. 2001; AGFW 2000; DIW/Öko 2000; Schneider 2000; IER 1999) befasst sich mit der technischen Beschreibung und der Rolle von KWK-Technologien bzw. -Versorgungsfällen, für die jeweils Energieeinsparungen, CO₂-Reduktionen sowie Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom und Wärme analysiert werden. Teilweise enthalten die Studien auch Bestandsanalysen (DIW/Öko 2000) sowie Informationen über externe Kosten (IER 1999).
- Ein anderer Teil von Studien hat die Erhebung und Abschätzung von Potentialen zur Zielsetzung. Ein Vergleich der Ergebnisse gestaltet sich allerdings aus vielerlei Gründen (z.B. unterschiedliche Methodik, verschiedene Rahmenannahmen wie Energiepreise etc.) sehr schwierig.

Da der Schwerpunkt der hier durchzuführenden Studie auf Potentialerhebungen liegt, erfolgt im nachfolgenden eine Zusammenfassung von Ergebnissen der wichtigsten Potentialabschätzungen bzw. Arbeiten, in denen Potentiale genannt werden. Eine Kurzcharakteristik der Studien inklusive der wichtigsten Ergebnisse findet sich im Anhang. Eine Übersicht enthält Tabelle 4.3.1-1 Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass Potentialabschätzungen in den meisten Studien nicht die eigentliche Zielsetzung sind. In den meisten Fällen werden die Potentialangaben auf der Basis älterer Studien hergeleitet. Oftmals wird Bezug auf eine Studie (Nitsch et al. 1994) genommen, in der für Baden-Württemberg Nahwärmepotentiale hergeleitet wurden. Diese Ergebnisse werden in einigen Fällen auf die Bundesrepublik hochgerechnet. Über die Art und Weise der Hochrechnung und ob die Besonderheiten in den neuen Bundesländern hinreichend berücksichtigt wurden, werden in der Regel keine Angaben gemacht. Viele Arbeiten beschränken sich lediglich auf die Angabe eines Stromerzeugungspotentials während die Angabe des damit korrelierenden Wärmepotentials nicht erfolgt.

Tabelle 4.3.1-1: Nahwärme-KWK-Potentiale in verschiedenen Studien

Gailfuß 1998	Elektrische Leistung bis 2010: ca. 5,2 GW (ca. 13000 Anlagen) Wärmepotential bis 2010: keine Angabe
Altener et al. 1998	Theoretisch techn. Potential bis 2010: 40 bis 64 TWh _{el} Technisch wirtschaftl. Potential bis 2010: 21,6 bis 36 TWh _{el} Unter verbesserten wirtsch. Randbedg. bis 2010: 35,2 bis 60 TWh _{el} Wärmepotential bis 2010: keine Angabe
Nitsch et al. 1999	Öffentl. und private Klein-KWK bis 2010: 65 TWh _{el} Wärmepotential bis 2010: keine Angabe
Müsgens et al. 2000	Wärmepotential bis 2020: 33,9 TWh _{th} (Szenario I) bis 88 TWh _{th} (Szenario II) Äquiv. Stromerzeugung bis 2020: 17,4 TWh _{th} (Szenario I) bis 50,7 TWh _{th} (Szenario II)
Dienhart et al. 1997	Technisches strukturelles Wärmepotential bis 2020: 94 TWh _{th} Äquivalente Stromerzeugung bis 2020: 36,6 TWh _{el} (ca. 8 GW _{el})

Ein Vergleich der Studien gestaltet sich daher äußerst schwierig und dürfte aufgrund oftmals fehlender Transparenz nur sehr begrenzte Aussagekraft besitzen. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass derzeit

keine Studie vorliegt, in der Nahwärmepotentiale für die Bundesrepublik Deutschland detailliert und originär erhoben wurden.

4.3.2 Einsparpotential durch den Einsatz von BHKW im Nahwärmebereich (Wohngebäude)

Nach Nitsch et al. 1994 beträgt das BHKW Potenzial für Wohn- und Nichtwohngebäude rund 28 % des gesamten Wärmebedarfs (Raumwärme und Warmwasser). Bei einem Bedarf von rund 3334 PJ (926 TWh) im Jahre 1999 ergibt sich damit ein BHKW Potenzial von 932 PJ (259 TWh). Nitsch et al. 1994 geben für Baden-Württemberg an, dass sich das Potenzial zu rund 40 % auf Wohngebäudebereich und zu 60 % auf den Nichtwohngebäudebereich verteilt. Überträgt man diese Relation auf ganz Deutschland, dann ergibt sich für den Wohngebäudebereich ein BHKW-Potenzial von 374 PJ (104 TWh) und für den Nichtwohnbereich von 558 PJ (155 TWh).

Müsgens et al 2000 gehen davon aus, dass bis 2020 ein Basispotenzial von ca. 32 PJ (9 TWh) ausgeschöpft wird. Dies dürfte demnach ein wirtschaftliches Potenzial sein. In zwei weiteren Zubauszenarien für 2020 wurde eine Verdoppelung der Stromerzeugung bis 2020 und bis 2010 unterstellt. Dies würde zu einer Potenzialausschöpfung von 122 PJ bzw. 317 PJ (34 bzw. 88 TWh) führen.

Bei der Schätzung dieser Potenziale wurde offensichtlich davon ausgegangen, dass die Wärmedichten, so wie sie zum Zeitpunkt der Studiererstellung vorhanden waren, erhalten bleiben. Werden jedoch die in Kapitel 1 aufgezeigten Sanierungspotenziale umgesetzt, dann reduziert sich der Wärmeverbrauch in Einzelgebäuden bis zu 75 %, und die mittlere Wärmedichte im Bestand geht bis 2050 um rund 60% zurück. So erwartet die AGFW schon mittelfristig im Bestand Umsatzeinbußen von 25 bis 35 % (AGFW 1996). Viele Versorgungsfälle, für die heute noch ein Potenzial gesehen wird, entfallen, wenn die Altbausanierung konsequent durchgeführt wird. Wird für den Neubaubereich, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, eine Entwicklung zum Passivhausstandard unterstellt, dann reduziert sich dort das Potenzial mindestens in einem ähnlichen Verhältnis wie im Altbaubereich. Nach Tabelle 1.4.-1 verringert sich der Wärmebedarf im Wohngebäudebereich um 60 % und nach Tabelle 1.5-1 im Nichtwohngebäudebereich um 52 %. Werden die Reduktionspotenziale an der Gebäudehülle voll ausgeschöpft, dann reduziert sich das verbleibende KWK Potenzial wie in Tabelle 4.3.2-1 gezeigt.

Tabelle 4.3.2-1: Entwicklung der KWK Wärmepotentiale bis 2050 unter Berücksichtigung einer verstärkten Altbausanierung und einer Verschärfung der Verordnung im Neubaubereich

		1999	2020	2050
Technisches BHKW-Wärmepotenzial Wohngebäude	PJ	374	292	151
Technisches BHKW-Wärmepotenzial Nichtwohngebäude	PJ	558	436	266
Technisches BHKW-Wärmepotenzial Gebäude (Summe)	PJ	932	727	418

Ausgehend von dem für BHKW unter Berücksichtigung von Wärmedämmmaßnahmen zuvor ermittelten Wärmepotentials erfolgt auf der Basis typischer Wärmeversorgungsfälle eine Abschätzung der primärseitigen Einsparung und der damit verbundenen CO₂-Einsparung. Die typischen Wärmeversorgungsfälle stammen aus (Traube et al. 2001) sowie (Suttor 2001). Insgesamt werden für die Sied-

lungs-(BHKW)-Nahwärmeversorgung insgesamt fünf typische Wärmeversorgungsfälle zugrundegelegt. Unter Berücksichtigung des nach Neu- und Altbauten differenzierten Potentials werden diese den Einzelpotentialen nach einem Vergleichsschlüssel zugeordnet.

Desweiteren wird unterstellt, dass die gekoppelte Erzeugung durch erdgasbefeuerte Spitzenlastkessel und BHKW-Gasmotoren erfolgt. Weiterhin werden Verluste für die Nahwärmeverteilung sowie vermiedene Netzverluste durch BHKW-Stromerzeugung berücksichtigt. Um die Einsparung des KWK-Einsatzes berechnen zu können, sind entsprechende Referenzsysteme für die getrennte Erzeugung zu unterstellen. Insgesamt werden die aus dem KWK-Einsatz resultierenden Primärenergieverbräuche sowie die CO₂-Emissionen mit 3 Möglichkeiten der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme beispielhaft verglichen (Tabelle 4.3.2-2).

Tabelle 4.3.2-2: Technisches Energie- und CO₂-Einsparpotential durch Einsatz von BHKW (Stand der Technik 2000) bis 2020 im Wohngebäudebereich

BHKW-Nahwärmepotential bis 2020:	292 PJ		
Gekoppelte Erzeugung (BHKW-Gasmotor, erdgasbef. Spitzenlastkessel) (resultierend aus fünf unterschiedlichen Wärmeversorgungsfällen)			
Brennstoffbedarf:	514,86 PJ		
Stromerzeugung:	41,66 TWh		
CO ₂ -Emissionen	28,83 Mio. t		
Getrennte Erzeugung			
<i>Fall 1: Zentraler erdgasgef. Heizkessel, GuD-Erdgas-Kraftwerk</i>			
Brennstoffbedarf:	603,64 PJ		
CO ₂ -Emissionen:	33,80 Mio. t		
Energieeinsparung durch KWK:	14,71 %		(ca. 89 PJ)
CO ₂ -Einsparung durch KWK:	14,71 %		(ca. 5 Mio. t)
<i>Fall 2: Dezentrale erdgasgef. Heizkessel, GuD-Erdgas-Kraftwerk</i>			
Brennstoffbedarf:	583,81 PJ		
CO ₂ -Emissionen:	32,69 Mio. t		
Energieeinsparung durch KWK:	11,81 %		(ca. 69 PJ)
CO ₂ -Einsparung durch KWK:	11,81 %		(ca. 3.9 Mio t)
<i>Fall 3: Dezentrale Heizkessel, Steinkohlekraftwerk</i>			
Brennstoffbedarf:	672,75 PJ		
CO ₂ -Emissionen:	51,07 Mio. t		
Energieeinsparung durch KWK:	23,47 %		(ca. 158 PJ)
CO ₂ -Einsparung durch KWK:	43,55 %		(ca. 22.2 Mio t)

Die in Tabelle 4.3.2-2 aufgelisteten primärseitigen Einsparungen verdeutlichen den technologiebedingten Einspareffekt gegenüber einer getrennten Erzeugung. Diese liegen bei gleichem Brennstofftyp sowohl für die gekoppelte als auch für die getrennte Erzeugung zwischen 11 bis 14 %. Da im Fall 1 und Fall 2 sowohl für die gekoppelte als auch getrennte Erzeugung der gleiche Energieträger zugrundegelegt wird, sind die Reduktionsanteile identisch mit der CO₂-Einsparung, die absolut gese-

hen etwa 4 bis 5 Mio. t beträgt. Die Reduktionspotentiale fallen im Fall 3 deutlich höher aus als in den anderen beiden Fällen. Gegenüber einer kohlebasierten Stromerzeugung liegt die technologiebedingte Energieeinsparung bei etwa 24%. Bedingt durch den Wechsel zur kohlenstoffreicheren Kohle liegt das gesamte CO₂-Minderungspotential bei etwa 44%, was einer Einsparung von 22 Mio. t entspricht.

In Tabelle 4.3.2-3 sind die gesamten Einsparpotenziale, die nach dem Verfahren in Tabelle 4.3.2-2 berechnet wurden, zusammen gestellt. Die dort aufgelisteten Werte sind als Bandbreiten angegeben, wobei der minimale Wert sich aus Fall 2 ergibt und die Obergrenze aus Fall 3.

Tabelle 4.3.2-3: Technisches Energie- und CO₂-Einsparpotential durch Einsatz von BHKW im Gebäudebereich

		1999	2020	2050
Energieeinsparpotenzial Wohngebäude	PJ	88 - 202	69 - 158	36 - 82
Energieeinsparpotenzial Nichtwohngebäude	PJ	132 - 302	103 - 236	63 - 144
Energieeinsparpotenzial Gebäude (Summe)	PJ	220 - 504	172 - 394	99 - 226
CO ₂ -Einsparpotenzial Wohngebäude	Mio. t	5 - 29	4 - 22	2 - 12
CO ₂ -Einsparpotenzial Nichtwohngebäude	Mio. t	7,4 - 43	6 - 33	4 - 20
CO ₂ -Einsparpotenzial Gebäude (Summe)	Mio. t	12 - 71	10 - 55	6 - 31,5

Die in den Tabelle 4.3.2-2 und 4.3.2-3 unterstellten BHKW-Konzepte sowie die Alternativen der getrennten Erzeugung entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Weitere technologiebedingte Einsparungen bei BHKW bringt die Wahl der heute schon verfügbaren Brennwerttechnik, die gegenüber der konventionellen Variante eine energieseitige Einsparung von etwa 10% aufweist. Allerdings ist zu sehen, dass die Brennwerttechnik auch in Heizkesseln und Heizzentralen eingesetzt werden kann. Dies bedeutet, dass die absoluten Emissionen sowohl der gekoppelten als auch der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in der Summe durch Brennwerttechnik verringert wird, die prozentuale Differenz zwischen beiden Varianten jedoch hiervon fast unverändert sein dürfte.

Während bei der getrennten Stromerzeugung wird ein GuD-Kraftwerk mit einem Nettonutzungsgrad von 57% bzw. ein Steinkohlekraftwerk mit einem Nettonutzungsgrad von 43% unterstellt. Geht man davon aus dass die Effizienz der Motorkonzepte nicht mehr signifikant gesteigert werden kann, jedoch eine signifikante Erhöhung des Nettonutzungsgrades von Kohlekraftwerken -längerfristig gesehen- durchaus möglich ist, reduziert sich die CO₂-Einsparung der KWK-Lösung der getrennten Erzeugung.

4.4 Hemmnisse

Bedingt durch die Liberalisierung des Strommarktes ist es zu einem drastischen Rückgang der Strompreise gekommen. Dies hat in vielen Fällen dazu geführt, dass BHKW-Anlagen nicht mehr betriebswirtschaftlich betrieben werden können, da die den ursprünglichen wirtschaftlichen Kostenkalkulationen zugrundeliegenden Stromerlöse nicht erzielt werden. Unter den derzeitigen betriebswirtschaftlichen Kriterien können neue BHKW-Anlagen in der Regel nicht wirtschaftlich betrieben werden, wobei die KWK-Vergünstigungen (z.B. Befreiung von der Stromsteuer, vermiedene Netzkosten nach VVII

etc.) bereits berücksichtigt sind. (Traube et al. 2001, Ritzau 2001). Da bei Klein-BHKW oftmals gegen den Tarifkunden-Strompreis gerechnet wird (vermiedener EVU-Strombezug), ist die Wirtschaftlichkeit derartiger Anlagen in vielen Fällen gegeben. Hierbei ist anzustreben, dass der Anteil des produzierten BHKW-Stroms möglichst den Großteil des Stromeigenverbrauchs abdeckt.

Weitere Hemmnisse lassen sich wie folgt stichwortartig zusammenfassen:

- Der Bezug von Zusatzstrom (Reservestrom) einer BHKW-Objektversorgung kann unter derzeitigen Bedingungen die Wirtschaftlichkeit des Objekts in Frage stellen.
- Als weiteres Hemmnis ist die Einholung von Genehmigungen und Erlaubnissen für die Aufstellung Bau eines BHKW zu sehen, da nur wenige Bundesländer eine Freistellung von Klein-BHKW von der formellen Antragstellung kennen. (Suttor 2001)
- In vielen Fällen sind auch Wissens- und Informationsdefizite auf unterschiedlichsten Ebenen als Hemmnisse anzuführen, die dem Bau einer möglicherweise geeigneten Objektversorgung entgegen stehen.
- Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme muss sich sowohl unter den Bedingungen des Strommarktes als auch denen des Wärmemarktes behaupten.
- Nahwärmeversorgungen werden in vielen Fällen durch den forcierten Ausbau einer Gasversorgung behindert. Nach (AGFW 2000) weisen viele Gebiete mit hoher Bebauungsdichte bereits Gasversorgungsgrade von über 90% auf.

Literatur zu Kapitel 4

AGFW (2000), Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbarer Energien. (Vorstudie, Abschlussbericht), Frankfurt 2000

Altener et al. (1998) Altner, G., Dürr, H.-P., Michelsen, G.: Zukünftige Energiepolitik Phase II, Studie im Auftrag der Niedersächsischen Energieagentur, November 1998

ASUE (1998) Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE e.V.): BHKW-Marktübersicht'98. www.asue.de

Blesing A. (2001): Mikrogasturbinen – Eine neue Technik zur dezentralen Energieversorgung, GAS-WÄRME International (50) Nr. 3/2001

Bohn D. et al. (2001), Das Potenzial der Kopplung von Mikrogasturbine und Brennstoffzelle für die dezentrale Energieversorgung, Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung, Dezentrale Energiesysteme, VDI Berichte 1594, Bochum 13. und 14. März 2001.

Dienhard et al. (1997): Dienhart, H.; Langniß, O.: Perspektiven des BHKW-Einsatzes im Wohngebäudebereich – eine wirtschaftliche und energetische Bewertung. Langfassung des Beitrages für „Die Wohnungswirtschaft“, Nov./Dez. 1997, www.dlr.de

Gailfuß (1998): Gailfuß, M.: CO₂-Minderungspotentiale durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland. Peter Lang Verlag 1998

Gailfuß (2000): Angaben nach Gailfuß, M., siehe www.bhkw-infozentrum.de/anwendung

Gailfuß et al. (2001): Gailfuß, M.; Seidel, M.: Motorische Blockheizkraftwerke und stationäre Brennstoffzellen. Brennstoff-Wärme-Kraft BWK Bd. 53 (2001) Nr. 4, S. 85-90

IER (1999): Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER): Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. IER-Forschungsbericht 60. Stuttgart, August 1999

Klima (2000): Nationales Klimaschutzprogramm – Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000 (Fünfter Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO₂-Reduktion“), Berlin, www.bmu.de

Müsgens et al. (2000): Müsgens, F.; Schulz, W.; Starrmann, F.: Kurzexpertise zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. Kurzexpertise im Auftrag des BMWi, Januar 2000

Nitsch et al. (1994): DLR; ZSW; IBS; IMH (Federführung: Nitsch, J.): Wirtschaftliches und ausschöpfbares Potential der Kraft-Wärme-Kopplung in Baden-Württemberg. Untersuchung im Auftrag des Landes Baden-Württemberg. Hauptband, Stuttgart 1994, www.dlr.de

Nitsch, J., Langniß, O. (1999): Erneuerbare Energien – Potentiale und Perspektiven. Beitrag im Rahmen der Konferenz „Energiewende jetzt!“ Bundestagsfraktion Bündnis 90/die Grünen, Berlin, 30./31.10. 1999 Berlin S. 3

Prognos, IfE (1994): Technisch wirtschaftliche Analyse der Potentiale zur Verminderung des Energieverbrauchs, der Nutzung fossiler Energieträger und der Emission energiebedingter klimarelevanter Spurengase für die neuen Bundesländer. Studie im Auftrag der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestags, 1994

Pruschek, R.; Oeljeklaus, G.; Lokurlu, A.; Vogelsang, H. (1994): Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausgasminderung durch Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie. Studienprogramm der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages. Band 3, Energie (Teilband I), Economica Verlag 1995.

Ritzau, M. (2001): Kann man unter den aktuellen Bedingungen KWK-Anlagen wirtschaftlich betreiben ?, Vortrag im Rahmen der Berliner Energietage, GEE-Veranstaltung: KWK-Ausbau im Brennpunkt, 14.05.2001, www.gee.de, www.bet-aachen.de

Schneider, L. (1999): Wirtschaftlichkeit und optimaler Betrieb von KWK-Anlagen unter den neuen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Werkstattreihe des Öko-Instituts Nr. 118, Freiburg 2000, www.oeko-institut.de

Schulz, W.; Traube, K.; Salmen, H.-U. (1994): Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausgasminde rung durch Kraft-Wärme-Kopplung zur Fern- und Nahwärmeversorgung (ABL und NBL) im Bereich der Siedlungs-KWK. Studienprogramm der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages. Band 3, Energie (Teilband I), Economica Verlag 1995

Starrmann, F. (2001): Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in liberalisierten Energiemärkten. (Diss.) Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts Band 56, Oldenbourg Industrieverlag, München 2001

Suttor, W. (Hrsg.) (2001): Praxis der Kraft-Wärme-Kopplung. Band 1 bis 4 (Stand März 2001), C.F.Müller Verlag Heidelberg

Traube, K.; Schulz, W. (2001): Aktuelle Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. Kommunalwirtschaftliche Forschung und Praxis (Gottschalk, W., Hrsg.) Band 3, Peter Lang Verlag 2001

/Winkler 2000/ Winkler, W.: „Brennstoffzelleninnovation und konkurrierende Technologien“, Brennstoffzellen in der Energiewirtschaft, IRR- Konferenz: 26. Und 27. Januar 2000, Bonn

Winkler, W. (2001): Unterschiede und Synergieeffekte bei stationären und mobilen SOFC-GT Systemen, Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung, Dezentrale Energiesysteme, VDI-Berichte 1594, Bochum, 13. und 14. März 2001

5 Wärmebereitstellung mit der Brennstoffzelle im Wohngebäudebereich

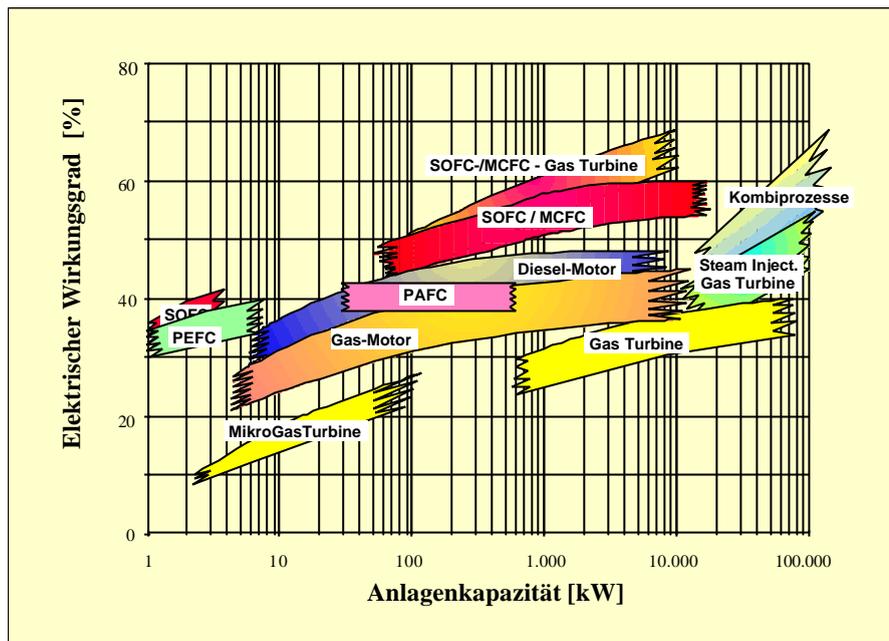
5.1 Defizitanalyse

Für das Studienprogramm der vorhergehenden Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" wurden einige Studien erarbeitet, die sich im Zusammenhang mit dem Haushaltssektor mit der Thematik "Energieeinsparung" und auch "Effizienzsteigerung" auseinandersetzen. KWK- oder BHKW-Techniken auf der Grundlage von Brennstoffzellensystemen wurden jedoch nicht detailliert betrachtet.

Im Mittelpunkt der Studie von (Eicke-Henning et al. 1995) stehen die durch bauliche Maßnahmen erreichbaren Energieeinsparungen, in (Gruson et al. 1995) werden ausschließlich wärmetechnisch relevante Maßnahmen an der Hülle von Gebäuden untersucht und in (Schulz et al. 1995) konzentrieren sich die Autoren darauf, für Fernwärmeversorgung geeignete Siedlungsstrukturen zu analysieren. Zwar werden in letzterer Studie auch BHKW-Anlagen im Leistungsbereich ab 15 kW_{el} berücksichtigt, da aber vom Auftraggeber vorgegeben war, nur konkurrenzfähige und bewährte Techniken einzubeziehen, wurden Brennstoffzellenanlagen nicht betrachtet.

Seit 1994 haben sich in der bundesdeutschen Energiepolitik die Rahmenbedingungen deutlich verändert: Rationelle und sparsame Energienutzungstechniken sowie erneuerbare Energien sollen einen höheren Stellenwert haben und größere Versorgungsbeiträge leisten. Da es in den zurückliegenden Jahren auf dem Gebiet der BHKW-Technik außerdem vielversprechende Weiterentwicklungen (Kleinstheizkraftanlagen) und Neuerungen gegeben hat, nimmt sie in aktuellen Szenarien zu zukünftigen Energieversorgungsstrukturen einen breiteren Raum ein als bisher (Traube et al. 2000; Müsgens et al. 2000).

Zu den technischen Neuerungen zählen insbesondere Brennstoffzellensysteme, die als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur direkten Objektversorgung im Haushaltsbereich und Kleingewerbe eingesetzt und gegebenenfalls auch in das öffentliche Netze eingebunden werden sollen. Zu den besonderen Merkmalen der Brennstoffzellen gehören ihre im Vergleich mit anderen Techniken sehr guten elektrischen Wirkungsgrade, die in der Regel sonst nur von mehrere hundert MW großen, zentralen Stromerzeugungsanlagen auf der Grundlage modernster GuD-Technik erreicht werden, vgl. Abbildung 5.1-1. So könnte in dem Marktsegment Haushalt, in dem ein relativ hohes Strompreisniveau herrscht, ein spürbarer Beitrag zur Energieversorgung geleistet werden.

Abbildung 5.1-1: Wirkungsgrade von Energieerzeugungstechniken und Anlagengrößen

5.2 Identifizierung und Quantifizierung der Einsparoptionen und ihrer Potenziale

Der gasversorgte Gebäudebereich eignet sich für den Einsatz von Brennstoffzellen

Der Wohnungsbestand liegt in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1999 bei etwa 37 Millionen Einheiten, von denen etwa 20 Millionen zu Mehrfamilienhäusern mit mehr als 3 Einheiten zu rechnen sind. Rund 17 Millionen sind Ein- und Zweifamilienhäuser. Beheizt werden ca. 16 Millionen Wohnungen (das entspricht einem Anteil von gut 43 %) mit Erdgas, 13 Millionen mit Heizöl und der Rest mit Fernwärme, Strom, Flüssiggas, Kohle oder Holz. Im Wohnungsneubau dominieren Gasheizungssysteme, mit denen derzeit etwa 70 % der Gebäude ausgerüstet werden.

Als Hemmnis für die Verlegung eines Gasnetzes in Neubaugebieten mit geringem Wärmebedarf und infolgedessen mit geringer Gasnachfrage, bedingt durch eine stärkere Dämmung als von der Energieeinsparverordnung (EnEV) vorgeschrieben oder durch Passivhausbau, erweisen sich die hohen Investitionskosten, die große Kapitalmengen für lange Zeit binden, so die Ausführungen verschiedener Gasversorger und Stadtwerke. Es ist damit zu rechnen, dass in solchen Siedlungen keine Gasnetze mehr oder nur zögerlich verlegt werden. Allerdings wird auf absehbare Zeit der Anteil der Passivhäuser noch klein bleiben und die Bereitschaft, stärker zu dämmen als die EnEV vorschreibt ist bei den Gebäudeeigentümern gering (vgl. Kapitel 1.3).

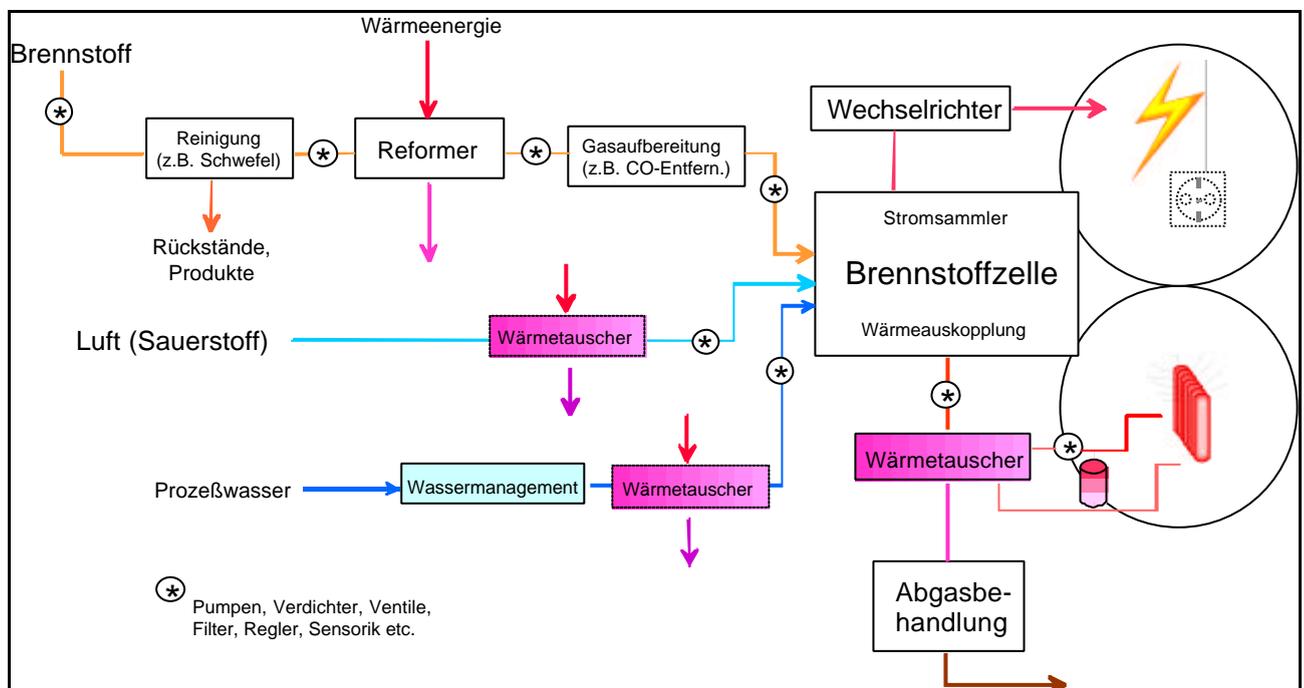
Da Erdgas bis zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft vermutlich der problemloseste Brennstoff für stationär eingesetzte PEFC wie auch SOFC sein wird, werden diese Techniken auf ein Erdgasnetz angewiesen sein, zumindest wenn sie im größeren Umfang zur Energieerzeugung eingesetzt werden sollen. Andere Lösungen, etwa die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle oder Brennstoffzellen mit für flüssige Kohlenwasserstoffträger geeigneten Reformern, erscheinen mittelfristig für stationäre Anwendungen nicht realisierbar.

Aufgrund ihrer Möglichkeiten und Eigenschaften stellt die Brennstoffzellentechnik in Aussicht, den zukünftigen Anforderungen einer umfassenderen Energieversorgung im Sektor Haushalt gut genügen zu können: Der Wärmebedarf geht zurück, während die Stromnachfrage weiter ansteigt bzw. auf gleichem Niveau verharrt. Damit geht die Nachfrage in Richtung des Strom-zu-Wärme-Verhältnisses, wie es von Brennstoffzellensystemen erzeugt werden kann: hohe Stromerzeugung bei geringer Wärme-Produktion.

Anmerkungen zum Stand der Technik

Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand werden für den Einsatz als BHKW-Anlagen in der Hausenergieversorgungssystem die PolymerElektrolytmembranBrennstoffzelle (PEFC) sowie die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC=SolidOxidFuelCell) als erfolgversprechend angesehen. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen diesen beiden Entwicklungen ist die Betriebstemperatur, die bei der PEFC bis 90°C reicht und bei der SOFC bis ca. 900°C. Wegen der hohen Temperaturen kann bei der SOFC die Reformierung des Einsatzgases zu einem überwiegenden Teil in der Zelle erfolgen; da wegen der hohen Temperaturen kein Katalysator verwendet werden muß, werden keine besonders hohen Qualitätsanforderungen an die Gasreinheit gestellt. Bei der PEFC muß eine umfangreiche Gasreinigung und Reformierung vor der Zelle erfolgen, um eine Deaktivierung des Katalysators zu verhindern, die Prozeßtechnik ist diesbezüglich aufwendiger/anspruchsvoller. Der komplexe Aufbau eines Brennstoffzellensystems mit den verschiedenen Komponenten ist in Abbildung 5.2-1 schematisch skizziert.

Abbildung 5.2-1: Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellensystems



Umfangreiche Labor- und Feldtests werden in Deutschland von den Unternehmen Hamburg Gas Consult GmbH (HGC), Vaillant GmbH und Sulzer-Hexis AG in Zusammenarbeit mit Versorgungsunternehmen, Hochschulinstituten, Ingenieurgesellschaften u.a. mit dem Ziel durchgeführt, marktfähige Produkte zu entwickeln. Erprobt werden zwei PEFC- sowie ein SOFC-System (vgl. Tabelle 5.1-1).

Tabelle 5.2-1: Brennstoffzellensysteme für den Einsatz zur Hausenergieversorgung

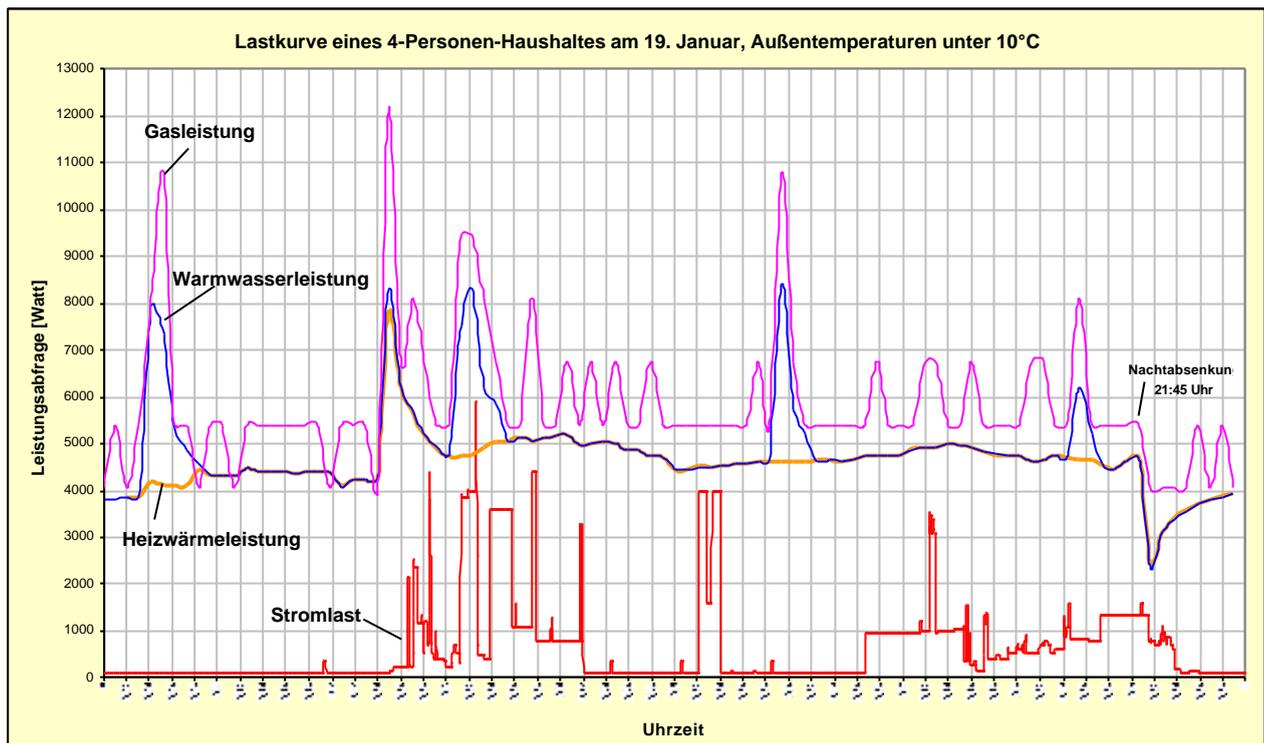
	PEFC	PEFC	SOFC
Europ. Systementwickler	Vaillant	HGC	Sulzer-Hexis
Leistung	4,6 kW _{el} / 7 kW _{th} (plus Spitzenkessel 25-50 kW _{th})	3 kW _{el} / 8 kW _{th} (kurzzeitige Leistungssteigerung auf 5 kW _{el} möglich)	1 kW _{el} / 3 kW _{th}
elektrische Wirkungsgrade	> 35 %	~ 38 %	bis 40 % Teillast ~25 % Volllast
Temperaturniveau	60°C - 80 °C	60°C - 80°C	700°C - 1000°C
Entwicklungsstand	Beginn von Feldtests in 2001	Feldtests: seit 1999	Feldtests: seit 1998
Marktreife	2002	2002/2003	2002/2003
Einsatzgebiet	Haushalt & Gewerbe (Mehrfamilienhaus)	Hausenergieversorgung	Haushalt (Einfamilienhaus)
Kommentar	Partner: Plug Power (USA), hat Erfahrungen mit Hausenergiesystemen, aufwendige Brenngasaufbereitung	Partner: American Power Corp. (USA); aufwendige Brenngasaufbereitung	Planares System; alleiniger Systementwickler, wenig Know How Austausch; einfache Brenngasaufbereitung

Die niedrige Betriebstemperatur von PEFC-Systemen läßt vermuten, dass eine Einspeisung der ausgekoppelten Wärme nur in relativ kleine Nahwärmenetze möglich ist. Sie scheinen deshalb eher für eine Einzelobjektversorgung geeignet zu sein, bei dem das Leitungsnetz nicht sehr groß und die Wärmeverluste begrenzt bleiben.

Problematik der Wärme- und Stromnachfragekurven

Die Analyse der Nachfragekurven von Elektrizität und Wärme in einzelnen Haushalten zeigt, dass eine gekoppelte Erzeugung in der Regel nicht deckungsgleich zur Nachfrage ist. In Abbildung 5.2-2 sind für ein reales Objekt die Ganglinie der Gaskesselleistung (bestimmt im 15-Minuten-Intervall) für die Deckung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs sowie die Ganglinie der Stromnachfrage (bestimmt im 10-Sekunden-Takt) für einen Januartag skizziert. Bemerkenswert sind die extremen Ausschläge der Stromnachfrage einerseits und die niedrige "Stromgrundlast" andererseits, die bei dem untersuchten Einfamilienhaus (EFH) mit 4 Personen bei rund 100 Watt liegt. Durch die Trägheit der verwendeten Meßgeräte konnten die Anfahrspitzen nicht festgestellt werden, die beim Einschalten verschiedener Geräte auftreten und die kurzfristig noch höhere Leistungen "ziehen". Die Kesselleistung wird zu einem wesentlichen Anteil vom Heizwärmebedarf bestimmt, der aufgrund baulicher Maßnahmen, wie Fensteranordnung etc., spürbar von der Sonneneinstrahlung beeinflusst wird. Die Tageschwankungen sind vornehmlich auf die Warmwasserbereitung bzw. auf das "Temperaturhalten" zurückzuführen, das durch kontinuierliche Verluste im Speicher sowie den Leitungen aber auch durch Warmwasserverbrauch erforderlich wird. Die Jahrsbenutzungstunden des 18 kW-Gaskessels lagen im mehrjährigen Mittel bei ca. 1700 h/a.

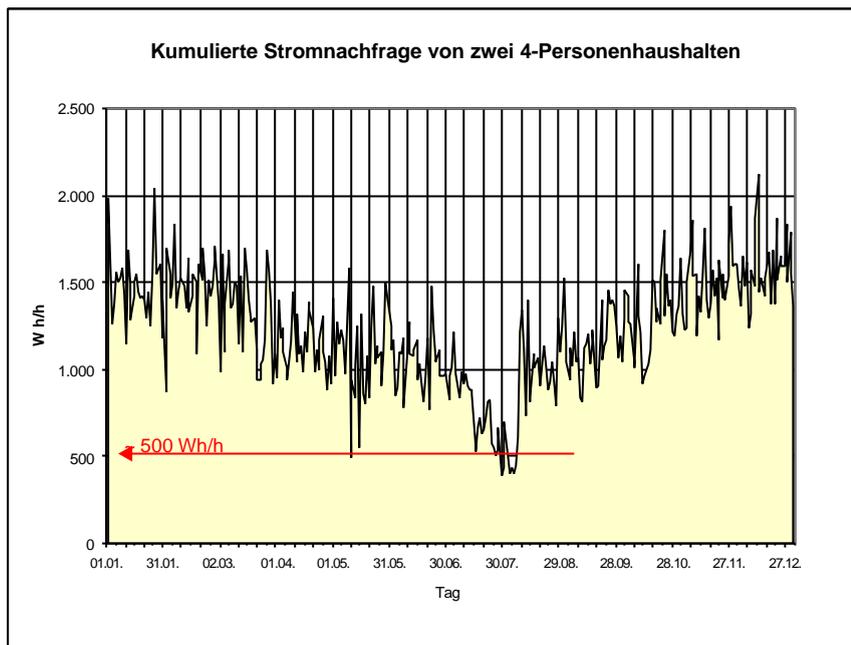
Da die Möglichkeiten der Steuerung/Lenkung der Leistungsabfrage wie auch Lastspitzenverschiebungen in Richtung auf ein für die gekoppelte Versorgung günstigeres Verhältnis in einem EFH bislang nur ungenügend analysiert wurden, sei auf Potenzialangaben anderer Quellen zurückgegriffen.

Abbildung 5.2-2: Lastkurven eines 4-Personen-Haushalt (Einfamilienhaus)

(Dienhart et al., 1997) erwarten, dass der Einsatz von kleinen BHKW-Anlagen bei Wohnobjekten von 10 – 14 Einheiten und einem Wärmebedarf von insgesamt 100 MWh/a zweckmäßig wird. Um die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme weiter zu verbessern, sollten außerdem mehrere Objekte zusammengeschlossen werden. Zwar wird der wirtschaftliche Einsatz von BHKW-Anlagen im Ein- oder Zweifamilienhaus zunächst nicht gesehen, aber da neue Wärmedämmrichtlinien dazu führen, dass der Heizwärmebedarf insbesondere in Neubauten sinkt, wird eine verbesserte Wettbewerbsposition für BHKW-Anlagen erwartet.

Dienhart berücksichtigt bei seiner Analyse die Tatsache, dass ein unterschiedliches Verbraucherverhalten zu einer gewissen Vergleichmäßigung der gemeinsamen Lastkurve führt. In solch einem Versorgungsfall wird das dezentrale Versorgungssystem besser ausgenutzt und erreicht höhere Jahresbenutzungsstunden. Als Beispiel dazu soll Abbildung 5.2-3 dienen.

Sie zeigt die kumulierte Stromnachfrage von zwei Haushalten mit unterschiedlichen Gewohnheiten, wie man aus den Einzeldarstellungen erkennen kann. Durch den Zusammenschluß steigt die "Grundlast" von 200 Watt bzw. 250 Watt auf etwa 500 Watt an, bei einer gleichzeitigen Abschwächung der Ausschläge zwischen Lastspitzen und -tälern.

Abbildung 5.2-3: Darstellung der kumulierten Jahresstromnachfrage von zwei Haushalten

Potenziale der Brennstoffzelle im Wohngebäudebereich

(Dinter et al. 2001) führen in "KWK mit Brennstoffzellen" aus, dass die Brennstoffzellentechnik einen Teil der vom EWI bis 2010 erwarteten Stromerzeugung aus KWK-Anlagen abdecken wird, weil sie eine bereits heute ökologisch attraktive und mittelfristig auch ökonomisch lukrative Energieerzeugungstechnik ist. Von Vorteil ist, dass der für den Brennstoffzellenbetrieb bevorzugte Brennstoff Erdgas über eine sehr gut ausgebaute Infrastruktur verfügt, so dass er nahezu jedem Verbraucher zugänglich ist. Nach (Heinen 2001) erwarten die RWE, dass in den nächsten 15 Jahren etwa 20 bis 70 % der ca. 400.000 neuen bzw. zu erneuernden Hausenergieversorgungsanlagen als Brennstoffzellensysteme ausgeführt werden und zur Stromerzeugung einen Beitrag von 3 bis 15 TWh_{el}/a leisten werden. Diese Zahlen sind in etwa konsistent mit den Umsatzerwartungen der Hersteller, die weiter unten beschrieben sind.

Aus den Stromerzeugungszahlen lässt sich ein Wärmeangebot von ca. 16 bis 60 PJ/a (4,5 bis 20 TWh/a) ableiten. Unterstellt man, dass der Brennstoffzellenmarkt 2004 mit einem Jahresumsatz von 10.000 Anlagen beginnt (Vaillant) und dann linear auf die von (Heinen 2001) prognostizierten Jahresumsätze von 80.000 bis 280.000 Anlagen pro Jahr ansteigt, dann ergibt sich ein kumulatives Wärmepotenzial bis 2015 von 110 bis 440 PJ (30 bis 120 TWh). Bezogen auf den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Haushaltsbereich im Jahre 1999 von 2335 PJ entspricht dies einem relativen Anteil von 5 bis 29 %. Dies ist jedoch kein Einsparpotenzial, sondern ein Substitutionspotenzial.

Bis 2050 kann für die Brennstoffzelle das gesamte in Kapitel 3.1 identifizierte KWK Potenzial für den Wohnbereich und das derzeitige Gasanschlussvolumen im Bereich der Mehrfamilienhäuser als technisches Potenzial angesehen werden. Dies dürfte dann die Hälfte bis 2/3 des gesamten Wärmebedarfs im Wohngebäudebereich im Jahre 2050 sein.

5.3 Umsetzung der Potenziale und Hemmnisse

Umsatzvorteilungen der Hersteller

Die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen, die für einen Einsatz im Haushaltsbereich geeignet sind, ist trotz der zahlreichen Feldversuche und Demonstrationsobjekte noch nicht abgeschlossen. Eine Markteinführung sowie der freie Verkauf solcher Anlagen wird erst in einigen Jahren erwartet. Vaillant beabsichtigt, ab 2004 pro Jahr 10.000 Brennstoffzellen-Heizgeräte abzusetzen. Sulzer-Hexis äußert sich dahingehend, dass man ab 2010 pro Jahr etwa 100.000 Einheiten weltweit vermarkten möchte, wobei die Systeme nicht direkt an den Endverbraucher verkauft werden sollen, sondern an Unternehmen, die den Markt bedienen und über geeignete Vertriebswege verfügen. Auch HGC beabsichtigt, ab 2004 eine Serienproduktion aufzunehmen, um dann direkt den Privatkunden beliefern zu können.

Hemmnis Kosten

Unter Berücksichtigung des Entwicklungsstandes werden von den Unternehmen nur Zielkosten veröffentlicht, zu denen diese Anlagen angeboten werden sollen. Voraussetzung ist allerdings, dass bestimmte Mindeststückzahlen pro Jahr abgesetzt werden können, wobei unklar ist, ob von den Unternehmen die gleiche Zielgruppe anvisiert wird. Sowohl von Vaillant als auch von Sulzer-Hexis werden Stückzahlen von ca. 100.000 genannt, ab deren Realisierung die Kosten im Bereich von 1.500 – 2.000 Euro/kW_{el} liegen sollten, wobei zur Anlage auch ein Spitzenkessel gehört, der bei Bedarf die über die Leistung der Brennstoffzelle hinausgehende Wärmenachfrage erfüllt.

Sollten die gesetzten Kostenziele erreicht werden können, dann wären die Brennstoffzellensysteme in Bezug auf das Investment mit gasmotorischen Systemen vergleichbar, die heute in den kleinen Leistungseinheiten (~5 kW_{el}) zu Preisen von etwa 1.900 Euro/kW_{el} angeboten werden (z.B. ecopower Mini BHKW modulierend 1,3 – 4,8 kW_{el} und 4 - 12,5 kW_{th}, (ecopower 2000 und VALENTIN) oder SenerTec-Gas-HKA 5,5 kW_{el} und 12,5 kW_{th} (Suttor KWK und SenerTec).

Emissionsvorteile der Brennstoffzelle

Neben der Wirtschaftlichkeit, die nicht nur vom Investment sondern zu einem erheblichen Anteil auch vom bisher ungewissen Aufwand für Wartung, Instandhaltung und Ersatz bestimmt wird, gehören Emissionen mit zu den wichtigsten Entscheidungskriterien. In dieser Hinsicht wird sich die Brennstoffzellentechnik selbst im Vergleich mit den modernen, die TA-Luft-Werte um 50 % und mehr unterschreitenden Gasheizkraftanlagen gut behaupten können, selbst wenn sie nicht mit Wasserstoff sondern zunächst mit Erdgas betrieben wird. Die Kohlendioxidemissionen werden wegen des besseren elektrischen Wirkungsgrades geringer ausfallen, und die limitierten Schadstoffe aufgrund verfahrenstechnischer Besonderheiten nur in Spuren auftreten.

Nach Berechnungen von Buderus (Buderus 2001) und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft gehen die Kohlendioxidbetriebsmissionen bei der Versorgung eines 3 Personen-Haushaltes, der einen Jahreswärmebedarf von 18.000 kWh und einen Strombedarf von 3.500 kWh hat, um 36 % zurück, wenn statt eines Niedertemperatur-Öl-Kessels und konventionelle Stromerzeugung ein erdgas-

befeuertes Brennstoffzellenheizgerät zum Einsatz kommt. NO_x -, SO_2 - und CO-Emissionen gehen beim BZ-Gerät gegen Null.

Literatur für Kapitel 5

Bünger, U. (2000): Einsatzbedingungen und Marktchancen von Brennstoffzellen als Klein-BHKW, "Effiziente und umweltfreundliche Strom- und Wärmeerzeugung mit Brennstoffzellen", Friedrichshafen, 20. – 21. Juli 2000

Dielmann, K.; Ihle, R.; Schieke, W. (2000): Mikro-Gasturbine Entwicklungsstand Vorteile und Markteinführung, Bayerngas-Symposium 2000, 20.07.2000, München

Dienhart, H.; Langniß, O. (1997): Perspektiven des BHKW-Einsatzes im Wohngebäudebereich – eine wirtschaftliche und energetische Bewertung, in "Die Wohnungswirtschaft", Nov./Dez. 1997

Dinter, F.; Bergmann, H. (2001): KWK mit Brennstoffzellen – Modelle für zukünftige Privat- und Industriegastkundenversorgung, VGB-Tagung, Februar 2001

Ecopower (2001), "Mini-BHKW", Technische Dokumentation, Juli 2000

Eicke-Henning, H. et al. (1995): Empirische Überprüfung und Kosten, im Gebäudebestand und bei Neubauten Energie einzusparen und die Energieeffizienz zu steigern, Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre, Band 3 Energie

Gruson, C.; Kerschberger, A.; Rouvel, L. (1995): Kostenermittlung für wärmetechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle, Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre, Band 3 Energie

Heinen, J. (2001): Power of Innovation: RWE Brennstoffzellenprojekt, 64. AGEF-Seminar "Brennstoffzellen und ihre technische Einbindung", 16.Mai 2001

Müsgens, F.; Schulz, W.; Starrmann, F. (2000): Kurzexpertise zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung, im Auftrag des BMWi, Februar 2000

Oertel, D.; Fischer, T. (2000): TA-Projekt "Brennstoffzellen-Technologie" Dez. 2000, TAB-Arbeitsbericht Nr. 67

Pehnt, M.; Nitsch, J. (2001): Einsatzfelder und Marktchancen von Brennstoffzellen in der industriellen und öffentlichen Kraft-Wärme-Kopplung, www.bhkw-info.de

Prognos (1995): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel 1999

Schulz, W; Traube, K.; Salmen, H.-U. (1995): Ermittlung und Verifizierung der Potenziale und Kosten der Treibhausgasminderung durch Kraft-Wärme-Kopplung zur Fern- und Nahwärmeversorgung (ABL und NBL) im Bereich Siedlungs-KWK, Enquête-Kommission „Schutz der Edathmosphäre, Band 3 Energie

SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, www.senertec.de

Simader, R.; Heissenberger, T. (1999): Brennstoffzellensystem – Energietechnik der Zukunft? bm:vw, Wien August 1999

Steinborn, F.: Auslegung von Brennstoffzellen-Kraftwerken, www.bhkw-info.de

Suttor, W.; Müller, A. (2000): Das Mini-Blockheizwerk, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2000

Suttor, W.: Praxis Kraft-Wärme-Kopplung, "Loseblattsammlung", C.F. Müller Verlag Heidelberg

Traube, K.; Schulz, W. (2000): Ökologische und ökonomische Wirkung eines mittelfristigen Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung zur Nah-/Fernwärmeversorgung in Deutschland, Juni 2000

VALENTIN persönliche Informationen von VALENTIN Energie- und Umwelttechnik GmbH, www.ecopower.de

6 Niedertemperaturkessel, Brennwertkessel und Gesamtanlage

Niedertemperatur- und Brennwertkessel wurden in der vorhergehenden Enquete Kommission (Enquete 1995) in vielen Fällen nicht so ausführlich beschrieben, dass man Technikdaten identifizieren könnte. So wird lediglich die Brennwerttechnik (BW) pauschal mit den damals installierten „herkömmlichen guten“ Niedertemperaturkesseln (NTK) verglichen. Es werden Endenergieeinsparungen im Bereich von 6 bis 10 % bei Gas ausgewiesen und von 3 bis 6 % bei Öl. Gegenüber älteren Kesseln werden Einsparpotenziale bis 40 % festgestellt.

6.1 Niedertemperaturkessel

Entwicklung der Nutzungsgrade

In der IKARUS Datenbank (IKARUS-DB 2000), werden Nutzungsgrade für NT-Kessel mit Ölzerstäubungsbrenner und Gasbrenner mit und ohne Gebläse bis 2020 angegeben. Die Entwicklung der mittleren Werte ist in der Tabelle 6.1-1 dargestellt. Im Leistungsgrößenbereich 10-80 kW liegen die Werte für 1995 im Bereich 93 bis 95 %. Nach der Heizungsanlagenverordnung von 1994 sollen die minimalen Nenn- und Teillastwirkungsgrade für NT-Kessel zwischen 87,5 und 90 % liegen (Prognos 1999). Da die Kesseltechnik nach Aussagen der Hersteller heute schon fast bis an die Grenze des physikalisch machbaren vorgestoßen ist, sind die zusätzlich zu erschließenden Nutzungsgradpotenziale nur noch gering. So sind bis 2020 nur noch Steigerungen von ein bis zwei Prozentpunkten zu erwarten. Bis 2050 ist werden praktisch keine Verbesserungsmöglichkeiten mehr gesehen. Vielmehr wird langfristig ein Trend zu Brennwertkesseln einsetzen, die – bedingt durch die Technik - einen noch besseren Ausnutzungsgrad haben.

Tabelle 6.1-1: Nutzungsgrade (%-Werte) bei voller Auslastung

	1995	2005	2020
Ölzerstäubungsbrenner	93	94	95
Gasgebläsebrenner	95	96	96
Gasbrenner ohne Gebläse	94	95	95

Spezifische Kosten

Die spezifischen Investitionskosten in DM₉₅/kW Nennleistung, aber ohne Energiezufuhr und ohne Speicher, sind für 10 bis 80 kW Nennleistung in Tabelle 6.1-2 zusammengestellt.

Tabelle 6.1-2: Anhaltswerte für die spezifischen Anlagekosten

	10 kW DM/kW	50 kW DM/kW	80 kW DM/kW
Ölzerstäubungsbrenner	734	207	174
Gasbrenner	769	195	161

In der IKARUS Datenbank werden diese aktuellen Kostenangaben bis 2020 fortgeschrieben. Eine Heizleistung von 10 kW ist typisch für ein Einfamilienhaus (EFH) und 50 bis 80 kW sind für von Mehrfamilienhäusern (MFH) geeignet. Bemerkenswert ist die starke Kostendegression mit steigender

Heizleistung von 75 % bei Öl und von 80 % bei Gas fast 80 % für den Übergang von 10 auf 80 kW. Gegen diese sehr niedrigen Kosten müssen neue Technologien konkurrieren.

Einsparpotential

Zur Abschätzung möglicher Einsparungen durch den Einsatz von modernen NT-Kesseln anstelle des heutigen Bestandes an Öl- und Gaskesseln wird wie folgt vorgegangen: Es werden die für 2020 erwarteten Endenergieverbräuche für Raumwärme in Wohn- und Nichtwohngebäuden aus den Tabellen 1.2.2-4 und 1.5-1 entnommen. Sie betragen 2009 PJ (1509+500). Der mittlere Nutzungsgrad des heutigen Kesselbestandes wird mit 87,5 % angenommen (vgl. Tabelle 6.2-4) und für 2020 wird ein optimistischer Wert von 94 % unterstellt. Die Verteilungsverluste zu den Heizkörpern sind bei dieser Betrachtung konstant gehalten worden. Damit ergibt sich für die Wohngebäude ein Einsparpotenzial von 108 PJ und für die Nichtwohngebäude von 36 PJ. Von heute bis 2020 können bei einem mittleren Austauschzyklus der Kessel von 20 Jahren alle Anlagen einmal erneuert worden sein. Insofern paßt der Zeithorizont bis 2020 recht gut. Eine Hochrechnung auf 2050 macht keinen Sinn, weil der Wirkungsgrad der NT-Kessel nicht mehr steigen wird und weil außerdem der effizientere Brennwertkessel zum Einsatz kommt.

6.2 Brennwertkessel

Nutzungsgrade

Im Gegensatz zum normalen Kessel wird bei der Brennwerttechnik der im Abgas enthaltene Wasserdampf kondensiert, und die dabei gewonnene Verdampfungswärme wird technisch genutzt. Dadurch wird der Energieinhalt des oberen Heizwertes, auch Brennwert genannt, genutzt. Der Nutzungsgrad wird jedoch auf den kleineren unteren Heizwert bezogen, wodurch sich dann Werte über 100 % ergeben können. Auf jeden Fall ist der Nutzungsgrad eines Brennwertkessels (BWK), wenn er richtig betrieben wird, deutlich höher als der eines NT-Kessels.

Tabelle 6.2-1 zeigt die mittleren Nutzungsgrade für Öl- und Gasbrennwertkessel für eine Temperaturspreizung von 70/50 °C (IKARUS Datenbank). Bei einer Niedertemperaturspreizung 40/30 °C kann der Nutzungsgrad 4 bis 5 Prozentpunkte höher angesetzt werden, d. h. die Nutzungsgrade für Öl erreichen bis 100 % und die für Gas bis 105 %.

Tabelle 6.2-1: Mittlere Nutzungsgrade bei einer Temperaturspreizung von 70/50 °C

Techniken / Statusjahre	1995	2005	2020
Ölzerstäubungsbrenner	-	96	96
Gasgebläsebrenner	100	100	101

Bei hier angegebenen Nutzungsgrade beziehen sich auf Brennwert-Anlagen, deren Gesamtsystem – Rohrleitungen (Dimensionierung und Wärmeisolierung), Pumpenleistung, Steuerung etc. – optimal ausgelegt ist. Bei Abweichungen von der Bestauslegung sowie bei falschem Nutzerverhalten (Luftwechsel, Raumtemperatur und Beheizungsumfang, Nachtabenkung) können deutlich schlechtere Nutzungsgrade auftreten. Dem wichtigen Aspekt der richtigen Dimensionierung ist ein eigenes Kapitel

mit dem Titel „Einsparmöglichkeiten bei der Gesamtanlage“ gewidmet, das sich mit dem Einfluss des Gesamtsystems auf das Verhalten einer Heizanlage beschäftigt.

Spezifische Kosten

Die spez. Investitionskosten (ohne Energiezufuhr und Speicher) sind für einen Leistungsbereich von 10 bis 80 kW in Tabelle 6.2-2 dargestellt. In der Ikarus-Datenbank werden diese aktuellen Kosten bis 2020 fortgeschrieben. Die Kosten liegen zwischen 10 und 60 % höher als die Kosten für NT-Kessel.

Tabelle 6.2-2: Anhaltswerte für die spezifischen Anlagekosten

	10 KW DM/kW	50 kW DM/kW	80 kW DM/kW
Ölzerstäubungsbrenner	935	330	224
Gasgebläsebrenner	827	326	261

Substitutionspotential durch den Einsatz von Brennwertkesseln

Die Brennwerttechnik ist inzwischen wirtschaftlich und hat einen wesentlichen Marktanteil. Während Gasbrennwertgeräte schon weitgehend eingeführt sind, ist der Markt für Ölbrennwertkessel derzeit noch gering. Langfristig kann man davon ausgehen, dass sich die sehr effizienten Brennwertgeräte gegenüber den weniger effizienten Niedertemperaturkesseln durchsetzen werden.

Für die Abschätzung der Potenziale wird unterstellt, dass langfristig nur noch Brennwertgeräte eingesetzt werden. Als Bezug für den mittleren Nutzungsgrad im Referenzjahr dient die Altersstruktur des derzeitigen Kesselbestandes (vgl. Tabelle 6.2.-3). Diese Struktur wird vom Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks jedes Jahr bundesweit erhoben (ZIV 1999).

Tabelle 6.2-3: Altersstruktur der Öl- und Gaskessel

	<1980 %	1980-1990 %	>1990 %
Ölkessel	30	22	48
Gaskessel	19	23	58

Der Nutzungsgrad der Kessel hängt deutlich von der Altersklasse ab, wie die folgende Tabelle 9 deutlich zeigt. Für die Abschätzung der Potenziale werden die über den Bestand gemittelten Nutzungsgrade der rechten Spalte in Tabelle 6.2.-4 zugrunde gelegt.

Tabelle 6.2.-4: Nutzungsgrade der Öl- und Gaskessel in Abhängigkeit vom Alter

	<1980 %	1980-1990 %	>1990 %	Mittel 1999 %
Ölkessel	78	87	91	86
Gaskessel	81	89	92	89

Für die Schätzung der Potenziale wird eine maximale Nutzungsgraddifferenz von 12 Prozentpunkten für Ölkessel und von 14 Prozentpunkten für Gaskessel unterstellt. Bei den Verlusten durch die Heizungsverteilung kann man davon ausgehen, dass diese durch eine erheblich verbesserte Wärmedämmung auch reduziert werden. Für diese Schätzung wurden sie jedoch konstant gehalten, um den Effekt der Verbesserung des Kesselnutzungsgrades deutlich zu machen.

Die Schätzung wird nur für 2020 vorgenommen. Bei einer Lebensdauer der Brennwertgeräte von 15 Jahren (für Wandgeräte) bis zu 20 Jahren (für Standgeräte) könnte von 1999 bis 2020 der gesamte Bestand ausgetauscht sein. Außerdem dürfte die Technik bis dahin so ausgereift sein, dass nach 2020 durch dann ausgetauschte Brennwertkessel keine weiteren Einsparungen mehr zu erzielen sind.

Für die Schätzung der Einsparpotenziale des Gesamtbestandes müssten die Gesamtverbräuche von Öl und Gas und die Marktanteile der KWK-Nutzung, der Brennstoffzellen und der regenerativen Energien ermittelt werden. Da dies jedoch eine Aufgabe der Szenarienanalysen ist, können hier nur grobe Vorabschätzungen angegeben werden. Es wird deshalb pauschal angesetzt, dass 30 % des Energiebedarfs nicht durch Brennwertkessel abgedeckt werden können, weil sie durch andere Technologien (z.B. BHKW, Fernwärme Biomasse etc.) bereit gestellt werden. Bezugswert für die Einsparung sind die Endenergieverbräuche im Altbaubereich (vor 1999 gebaute Gebäude).

Nach Tabelle 6.2.-5 ergibt sich bis 2020 ein Einsparpotenzial von 137 PJ für den Wohnbereich und von 46 PJ für den Nichtwohnbereich. Bezogen auf die jeweiligen Ausgangsverbräuche beträgt die Einsparrate 9 %.

Tabelle 6.2.-5: Einsparpotenziale durch Brennwertkessel bis 2020 im Altbaubestand

		1999 PJ	2020 PJ	2020 %
Wohngebäude (Altbau): Verbrauch Raumwärme	PJ	2082	1509	100
Nichtwohngebäude (Altbau): Verbrauch Raumwärme	PJ	756 ¹⁾	500	100
Wohngebäude: Einsparpotenzial	PJ	-	137	9
Nichtwohngebäude: Einsparpotenzial	PJ	-	46	9

1) nur für Heizung gerechnet (ohne Klimatisierung)

Umsetzung und Hemmnisse

Unter den gemachten Voraussetzungen werden für die breite Einführung der Brennwerttechnologie keine Hemmnisse gesehen.

6.3 Einsparmöglichkeiten durch Optimierung des Gesamtsystems

Bei der Analyse der Energieeinsparpotentiale müssen die Energie- bzw. Wärmeverluste in den einzelnen Bereichen, wie Transmissionsverluste beim Gebäude, Verluste bei der Wärmeerzeugung (Kessel und Speicher) und Verluste bei der Wärmeverteilung (Rohrnetz und Pumpen), ermittelt werden. Die Ausschöpfung dieser Einsparpotentiale erfolgt durch die Optimierung der einzelnen Teilbereiche. Bei einem optimalen Heizungssystem

- wird nicht mehr Wärme erzeugt als benötigt,
- gelangt die Wärme möglichst ohne Verluste zu den Heizkörpern,
- wird die Wärme möglichst verlustfrei an den Raum abgegeben,
- steht das Verhalten der Nutzer im Einklang mit dem Grundsatz der rationellen Energieverwendung.

So hängt der Brennstoffverbrauch einer Heizungsanlage nicht nur vom Wirkungsgrad des Kessels ab, sondern entscheidend von der Ausführung und Fahrweise des gesamten Heizungssystems. Dazu gehört die Verteilung mit Rohrleitungen, Ventilen, Umwälzpumpen und Heizkörpern, die den Volumenstrom des Heizwassers bestimmen, während die Regelung das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten nach den Einflüssen der Umgebung, Außentemperatur, Sonneneinstrahlung und den Bedürfnissen der Benutzer steuert. Ein Kessel, egal ob Brennwerttechnik oder nicht, arbeitet nur so effektiv, wie es das übrige System zulässt. D.h. auch bei neuesten Anlagen betragen die Unterschiede zwischen Brennstoffzufuhr (am Brenner) und Wärmeabnahme am Heizkörper 23% (Gall, 2000). Ein nicht unerheblicher Teil dieser sogenannten Verluste sind jedoch gar keine echten Verluste, sondern tragen auch zur Heizung des Gebäudes bei (Luther 1996).

In der Praxis herrscht oft der Brauch vor, die Komponenten einer Heizungsanlage nach „Gefühl“ zusammenzustellen. In der Regel unterbleibt die Einregulierung der Anlage auf den Wärmebedarf des Gebäudes und die speziellen Bedürfnisse des Nutzers. So werden z.B. Gasheizkessel auf der werksseitigen Einstellung der Nennheizleistung belassen. Allzu oft werden bei einem späteren Kesselaustausch die anderen Komponenten nicht beachtet. Weder wird geprüft ob der alte Kessel richtig dimensioniert war, noch ob der neue Kessel zu der alten Verteilung paßt.

Die Einsparpotenziale der im folgenden beschriebenen Effekte werden für den ganzen deutschen Bestand zusammenfassend auf 10 bis 20 % angenommen. Eine genauere Quantifizierung ist wegen der Unterschiedlichkeit der Einflüsse und der unzureichenden Datenlage im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

6.3.1 Dimensionierung des Kessels

Es herrscht eine Diskrepanz zwischen den von den Herstellern angegebenen Nutzungsgraden und den in der Praxis tatsächlich erreichten Gesamtnutzungsgraden der Heizungsanlage. Auf dem Prüfstand werden ideale Bedingungen eingestellt, das heißt die Komponenten einer Anlage sind optimal aufeinander abgestimmt, Wärmeleistung und Volumenstrom entsprechen sich. In der Praxis ist dies insbesondere bei der Altbausanierung nicht immer gegeben.

In der Praxis ist in vielen Fällen eine Überdimensionierung des Kessels üblich, weil die Wärmebedarfswerte oft sehr oberflächlich berechnet, wenn nicht sogar nur grob abgeschätzt werden. Des Weiteren sind die Kessel gerade im kleinen Bereich relativ gesehen grob abgestuft, so dass z.B. bei 12 kW Normwärmebedarf nicht ein Heizkessel mit 11 kW, sondern der nächst größere mit beispielsweise 18 kW eingesetzt werden muss. Ferner sind Zuschläge für Warmwasserbereitung in diesem kleinen Leistungsbereich unumgänglich. Darüber hinaus sind in der Wärmebedarfsberechnung Räume wie Hobbyräume, Gästezimmer und dergleichen enthalten, welche jedoch nur selten beheizt werden. Letztendlich wird bei Gebäuden, die durch bessere Dämmung einen niedrigeren Wärmebedarf auf-

weisen oder erst recht bei Niedrigenergiehäusern, die Vollbenutzungszeit der Heizung im Verhältnis zum Normwärmebedarf immer geringer.

Fehlende Leistungs- und Volumen Anpassung in der Praxis wirken sich besonders bei Kesseln mit kleinen Wasserinhalten negativ auf das Taktverhalten aus. Je öfter ein Brenner startet, um so höher ist sein Brennstoffverbrauch. Werden Kessel mit niedrigeren Wärmeleistungswerten als erforderlich eingesetzt, dann kann dies im Vergleich zu einem richtig dimensionierten Kessel zu höheren Energieverbräuchen führen, wenn es sich dabei um Kessel mit einer schlechten Verbrennung oder höheren Betriebsbereitschaftsverlusten handelt. So kann ein Kessel mit kleinerer Leistung fast dieselben absoluten Verluste aufweisen, wie ein größerer Kessel, da die wärmeabgebende Fläche des Kessels nicht proportional zu seiner Leistung ist.

6.3.2 Verteilung

Etwa doppelt so hohe Verluste im Vergleich zu den Abstrahlverlusten des Kessels weist ein nach der Heizungsanlagenverordnung gedämmtes Rohrnetz auf, bei welchem wie in der Praxis üblich, Flansche, Pumpen, Schieber, Thermometer, Verschraubungen und dergleichen nicht gedämmt sind.

Dem Potenzial zur Energieeinsparung bei der Wärmeverteilung wurde bisher nur geringe Beachtung geschenkt. Außer bei den bekannten Problemen mit Strömungsgeräuschen oder schlecht eingeregelteten Rohrnetzen wurde eigentlich erst mit der Entwicklung von drehzahlgeregelten Pumpen die Diskussion auf das Rohrnetz, den hydraulischen Abgleich und die Pumpe gelenkt.

6.3.3 Wartung und Instandhaltung der Heizungsanlage

Durch eine regelmäßige Wartung und Instandhaltung der Heizungsanlage können nach UBA 2000, Band 2 rund 5 bis 10 % des Verbrauchs eingespart werden. Die Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen umfassen insbesondere die Regelung und die feuerungstechnischen Einrichtungen.

6.3.4 Umwälzpumpen

Der Anteil der Umwälzpumpen für die Heizung und Warmwasserversorgung am Stromverbrauch im Haushalt gerade bei Niedrigenergiehäusern liegt bei rund 10 Prozent und kann bei Ein- und Zweifamilienhäusern bis auf 25% ansteigen (BdE, 1997). Nach einer Studie der Universität Stuttgart aus dem Jahr 1992 sind Heizungspumpen im Regelfall um den Faktor zwei bis drei überdimensioniert, weil die Auslegung mangels fehlender Daten nicht korrekt durchgeführt werden konnte. Sowohl die nicht angepaßte Leistung als auch der Dauerbetrieb der Pumpen von ca. 5500 Stunden im Jahr führt zu unnötigem Energieverbrauch (Bach, 1992).

Aufgrund längerer Rohrleitungen und der damit verbundenen höheren Heizwassermenge benötigen Fußbodenheizungen in der Regel eine höhere Pumpenleistung als Heizkörper.

Strom für Umwälzpumpen und dgl. wurde bisher häufig vernachlässigt bzw. nicht zur Kenntnis genommen. In bisher keinem Meßverfahren wurde der Stromverbrauch für Umwälzpumpen, Gebläse, Zündung, Regelung mit erfaßt, weder in DIN 4702 Teil 8 oder der Richtlinie für das europäische CE-Zeichen, noch bei der Vergabe des Umweltengels. Gerade bei Niedrigenergiehäusern ist der Brenn-

stoffverbrauch gegenüber dem Stromverbrauch für Umwälzpumpen und dgl. stark zurückgegangen. Ferner fällt der Stromverbrauch auch deshalb stärker ins Gewicht, weil bei vielen Brennwertgeräten stärkere Umwälzpumpen benötigt werden. In Extremfällen wie z.B. Niedrigenergie Mehrfamilienhäuser mit Etagenheizungen kann die elektrische Energie (auf Primärenergie bezogen) etwa die Hälfte des Brennstoffverbrauchs betragen.

Ist eine Pumpe defekt, muss die effektiv notwendige Pumpenleistung ermittelt werden, damit nicht einfach wieder die gleiche, zu große Pumpe eingebaut wird. Unter Umständen ist gleichzeitig ein hydraulischer Abgleich des Leitungssystems erforderlich, damit auch die kleinere Pumpe alle Stränge genügend versorgen kann. Meist benötigt die neue Umwälzpumpe nur noch 1/5 bis 1/2 der früheren Stromaufnahme, was einer Stromeinsparung von 50 - 80% entspricht. Die hohen Einsparungen werden durch Bestgeräte in neuer energiesparender Bauweise erreicht. In dem Kapitel „Ventilatoren, Pumpen und Motoren“ in dem Buch „Faktor Vier“ (Weizäcker, Lovins und Lovins 1997) wird von Pumpen berichtet, die bis zu 89 % weniger Strom verbrauchen als herkömmliche Pumpen.

Bei einem mittleren Stromverbrauch in einem Einfamilienhaus verbraucht eine unregulierte Heizungspumpe im Bestand rund 300 bis 400 kWh. Die maximal erreichbare Einsparung beträgt dann 240 bis 320 kWh pro Jahr oder 62 bis 83 DM pro Jahr. Die Hersteller geben an, dass sich die Mehrkosten für die hocheffizienten Pumpen in wenigen Jahren amortisiert haben.

Obwohl Pumpen mit kleiner Leistung und gutem Wirkungsgrad, d. h. >20 %, zur Zeit von den meisten Herstellern am Markt abgeboten werden, ist der Marktanteil noch nicht zufriedenstellend. Hier besteht beim Gebäudenutzer noch ein weiterer Aufklärungsbedarf.

Einsparung durch Pumpenregelung: Nach Untersuchungen des Schweizer RAVEL-Programms ist bei Umwälzpumpen ein Einsparpotential zwischen 40 und 60% vorhanden. Allein durch die Abschaltung in den Nachtstunden sowie durch das Rückschalten auf eine niedrigere Drehzahlstufe ist eine Einsparung von über 40% möglich. Der Ersatz einer Tag und Nacht auf einer konstant hohen Stufe laufenden 100 Watt Pumpe durch die sparsamste marktgängige, zwischen 20 und 50 Watt geregelte Pumpe führt zu einer Einsparung von bis zu 70%. Bezogen auf die Bundesrepublik ließe sich durch eine systematische Erschließung dieses Potentials eine Energiemenge von jährlich 6 bis 8 TWh Strom sparen.

Einsparung durch ein neues Motorkonzept: Von zwei Herstellern wurde inzwischen ein neuer Pumpentyp vorgestellt, der den Stromverbrauch im Vergleich zu herkömmlichen Heizungspumpen um bis zu 80 Prozent reduziert. Der Schlüssel liegt in der Motortechnologie, ein regulierbarer Drehstrom-Synchronmotor, der einen 3-mal höheren Wirkungsgrad aufweist als der in kleinen Umwälzpumpen bisher verwendete Asynchronmotor. Die elektrische Leistung bei diesem Pumpentyp liegt nur noch bei 5 bis 20 Watt.

Rund 20 Millionen Heizungspumpen sind in bundesdeutschen Haushalten im Einsatz und verbrauchen 10 bis 12 TWh jährlich – das entspricht rund einem Prozent des jährlichen Primärenergiebedarfs der BRD. Hier liegt ein nicht zu vernachlässigendes Einsparpotenzial vor (Wilo GmbH 2001)

Bei optimaler Hydraulik kann die elektrische Leistung der Umwälzpumpen mit 1 Promille der maximalen, effektiv notwendigen Heizleistung angesetzt werden - d.h. mit 1 Watt pro kW Heizleistung.

6.3.5 Mögliche Nutzungsgradminderungen bei nicht optimal betriebenen Brennwertgeräten

Bei den Gaskesseln werden in den letzten Jahren zunehmend Brennwertgeräte eingesetzt. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass nicht alle Brennwertgeräte gute Jahresnutzungsgrade ausweisen. So wurden Fälle genannt, in denen bei einem nicht gedämmten Brennwertgerät ein Nutzungsgrad von nur knapp über 70% gemessen wurde (Schrode 1, 2001). Es wurden Fälle bekannt, dass offenbar relativ gute Gasheizkessel gegen Gasbrennwertgeräte ausgetauscht wurden und keine Energieeinsparung aufgetreten ist, zum Teil sogar der Energieverbrauch noch gestiegen ist. Dies kann verschiedene Gründe haben, die im folgenden kurz dargestellt werden.

Höherer Stromverbrauch: Wegen der Verwendung einer stärkeren Pumpe und eines Gebläsebrenners kann der Stromverbrauch eines Brennwertkessels um bis zu 20% höher liegen als der eines Niedertemperaturkessels mit atmosphärischem Brenner. Hier muss das hydraulische System mit der Pumpenleistung sehr gut abgestimmt sein, um diesen unnötigen Nachteil zu vermeiden.

Zu hoher Luftüberschuß: Der Luftüberschuß, welcher durch den CO₂- Gehalt der Abgase ausgedrückt wird, ist für die Energieausnutzung eines Brennwertgerätes genau so wichtig wie niedrige Heizwassertemperaturen. Durch einen zu hohen Luftüberschuß werden die Abgase verdünnt, wodurch die relative Luftfeuchte in den Abgasen sinkt und die Kondensation erst bei niedrigeren Abgastemperaturen eintritt. Bei genügend hohem Luftüberschuß entsteht selbst bei sehr kalten Rücklauftemperaturen kein Kondensat mehr. Ein zu hoher Luftüberschuß kann deshalb zu einer Wirkungsgradeinbuße von 5% bis 10% Punkten führen. Auch dieser Nachteil lässt sich durch eine genauere Einstellung der feuerungstechnischen Komponenten vermeiden.

Unzureichend gedämmte Brennwertgeräte: Sind Brennwertgeräte schlecht gedämmt, so kann die Einsparung durch die Brennwertnutzung durch erhöhte Abstrahlung z.T. wieder zunichte gemacht werden. (Schrode 2, 2001). Wenn gut gedämmte Brennwertgeräte nach DIN 4702 Teil 6 bei einer Übertemperatur von 40 K ca. 0,3% Betriebsbereitschaftsverlust aufweisen, so kann dieser Wert bei nicht gedämmten Geräten auf bis 1% ansteigen.

Unzureichende Fußbodenheizung: Erfahrungen haben aber gezeigt, daß bei Fußbodenheizungen gerade in Niedrigenergiehäusern durch ihre Trägheit und erhöhten Wärmeverluste gegen Keller und Erdreich bis zu 30-50% höhere Verbrauchswerte zeigen (Schrode 1, 2001). Dadurch werden die Vorteile durch den Einsatz von Brennwertgeräten wieder zunichte gemacht. Natürlich lassen sich solche Probleme durch eine entsprechend ausgelegte Fußbodenheizung vermeiden.

Kleiner Wasserinhalt: Wenn Brennwertgeräte, sehr kleine Wasserinhalte haben, benötigen sie eine Mindestumlaufmenge. In den meisten Fällen muß dann der Überströmregler die Mindestumlaufmenge aufrechterhalten, was zu einer Rücklaufanhebung führt und die Kondensatausbeute reduzieren kann. Dies kann eine Wirkungsgradminderung von 5-10 % Punkten verursachen (Schrode 1, 2001).

Rücklauftemperaturenanhebung durch Mischer: Bei vielen Brennwertgeräten ist die Umwälzpumpe bereits im Gerät eingebaut. Hierbei ist besondere Sorgfalt geboten, wenn ein Mischer mit nachgeschalteter Pumpe eingesetzt wird. Wenn die Pumpe im Gerät einen höheren Wasserdurchsatz bewirkt als die Pumpe nach dem Mischer, kann es auch zu einer Rücklauftemperaturenanhebung kommen. Durch den geringen Wasserinhalt bedingt, takten solche Geräte sehr häufig. Die Ein- und Ausschaltvorgänge können bis zu 50.000 pro Jahr betragen, während Geräte mit größerem Wasserinhalt ohne Mindestumlaufmenge bei richtiger Einstellung der Schaltdifferenz oft weniger als 10.000 mal anspringen müssen. Die dadurch bedingten höheren Spülverluste (durch Lüften des Brenners vor und nach der Brennerlaufzeit) reduzieren den Jahresnutzungsgrad evtl. um bis zu einen Prozentpunkt. Durch entsprechende Planung und die Wahl eines geeigneten Kessels kann dieser Verlust vermieden werden (Schrode 1, 2001).

Insgesamt mögliche Wirkungsgradeinbuße: Treten alle die vorgenannten Effekte zusammen auf, dann können die Jahresnutzungsgrade von Brennwertgeräten bei nicht optimierten und schlecht betriebenen Einzelsystemen um bis zu 30 % Punkte unterschritten werden. Damit wird dann durch ein nicht optimiertes Gesamtsystem der Vorteil der Brennwerttechnik zum Teil oder ganz wieder zunichte gemacht. Eine Hochrechnung dieses Effektes auf den Bestand ist bei der unzureichenden Datenlage nicht möglich.

6.3.6 Einsparpotenziale durch optimale Regelung:

Eine moderne Regelung sollte flexibel und vorausschauend an die wechselnden Bedürfnisse der Gebäudenutzer und an den variablen äußeren Einflußparameter wie Umgebungstemperatur, Sonneneinstrahlung, Wind usw. angepaßt sein. Dabei muss die Regelung auch auf die Dynamik von Kessel und hydraulischer Verteilung abgestimmt sein und die thermische Trägheit des Gebäudekörpers mit berücksichtigen.

Eine moderne, computergesteuerte Regelungsanlage sollte möglichst durch folgende Funktionen und Merkmale gekennzeichnet sein:

- Automatische Nachtabenkung
- Einzelraumregelung
- Sensoren, um auf An- oder Abwesenheit des Nutzers zu reagieren
- Regelung der Lüftung über Fensterkontakte
- Erstellung individueller Wochenprogramme
- Selbstoptimierend im Hinblick auf Warmwasserbereitung, Pumpenbetrieb, Brennerstarts etc.
- Display für eine nachvollziehbare Kontrolle von Energieverbrauch und Energiekosten.

Riedel 1997 gibt an, dass mit einer automatisierten Raumtemperaturregelung an Einzelgebäuden Einsparungen von 20 bis 30 kWh/m² erreicht werden können. Bezogen auf den Verbrauch eines nach Wärmeschutzverordnung sanierten durchschnittlichen Gebäudes entspricht dies einer Einsparrate von 15 bis 35 %.

Literatur für Kapitel 6

Enquete (1995): Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.): Mehr Zukunft für die Erde – Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz, 1995 Economica Verlag GmbH, Bonn, ISBN 3-87081-464-0

IKARUS-DB (2000): IKARUS-Datenbank Retrievalsystem 3.2, entwickelt vom FIZ Karlsruhe, 2000

Luther G. (1996), Folgeschwerer Denkfehler in der Kleinf Feuerungsanlagen-Verordnung, Gesundheits Ingenieur, 117. Jahrgang 1996, Heft 3.

Prognos (1999): K. Eckerle et al. („Prognos“), M. Kreuzberg et al. („EWI“): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Basel, im September 1999

Riedel M., Bentscheff S. (1997): Automatisierung der Raumtemperaturregelung und Heizkostenverteilung sowie Komponenten ihrer Weiterentwicklung, in Energetische Verbesserung der Bausubstanz, Statusseminar 1997, Projektträger BEO, Forschungszentrum Jülich.

UBA (2000), Klimaschutz durch Minderung von Treibhausgasemissionen im Bereich Haushalte und Kleinverbrauch durch klimagerechtes Verhalten, Band 1 und 2 und Anlagenband zu Band 1, Forschungsbericht 204 01 120.

Weizäcker, Lovins und Lovins (1997), Faktor Vier, München 1997

Wilo GmbH (2001): Quantensprung in der Pumpentechnik, Presseartikel der Wilo GmbH Dortmund, unter www.wilo.de/w3a

ZIV (1999): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für Herausgeber: 1999, Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband, Sankt Augustin

Bach, H.; Eisenmann, G.; Neuscheler, K.: CO₂- Reduzierung durch Pumpensanierung. Endbericht Forschungsstudie, Juli 1992, Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH

Gall, S. Ganzheitliche Betrachtung von Heizungsanlagen unter: <http://gruppen.nordwest.net/aks/ganzheiz.htm>

BdE, Bund der Energieverbraucher eV. Heizungsanlagen: Rohrnetze als Stromgrab, unter <http://www.energiegedepesche.de>

Schrode 1, Brennwertgeräte und die zu erwartenden Nutzungsgrade unter: [http://www.ing-schrode.de/Fachaufsatze/Download/Brennwertger te.PDF](http://www.ing-schrode.de/Fachaufsatze/Download/Brennwertger_te.PDF)

Schrode 2, Die richtige Heizung für das Niedrigenergiehaus unter: <http://www.ing-schrode.de/Fachaufsatze/Download/Heizkessel.PDF>

7 Wärmepumpen, solartherm. Wandler, Biomasse- und Restenergienutzung

7.1 Wärmepumpen

7.1.1 Ausführungen der vorangegangenen Enquete Kommission

Den Wärmepumpen ist in (Enquete 1995) ein eigenes Kapitel gewidmet (6.2.6.4), in dem Elektro-, Gasmotor- und Absorptionswärmepumpen beschrieben werden. Die beiden letzteren sind auch heute noch nicht kommerziell für Wohngebäude verfügbar. Die damaligen Anteile der Wärmequellen (Luft, Grundwasser, Erdreich) werden ebenfalls genannt. Andere Wärmequellen (z. B. Kühlwasser) spielen nur bei den beiden letzteren Wärmepumpen eine Rolle. Zusammenfassend wird in (Enquete 1995) festgestellt, dass im Vergleich zu konventionellen Heizungssystemen Gasmotor-Wärmepumpen zur CO₂-Minderung beitragen können, während bei Elektro-Wärmepumpen die Stromquelle (Steinkohlekraftwerk, Kraftwerksmix oder erneuerbare Energien) das Ausmaß einer CO₂-Minderung bestimmt (von 0 % bis 40 % Absenkung). Ein Wert für den zukünftig erwarteten Beitrag ist nicht ausgewiesen.

7.1.2 Bisherige Marktentwicklung

Der Wärmepumpentechnik war bisher im Heizungsbereich kein großer Erfolg beschieden, wozu zum einen die relativ hohen Anlagekosten beitrugen und zum anderen die Tatsache, dass nicht überall die (für hohe Leistungsziffern um 4) günstigen Wärmequellen Grundwasser und Erdreich zur Verfügung stehen. Allerdings bietet sich zukünftig für Gebäude mit geringem Wärmebedarf die Kombination einer kontrollierten Wohnungslüftung mit einer Wärmepumpe an, die Wärme aus dem Abluftstrom auf die zugeführte Frischluft überträgt. Es wird erwartet, dass solche Anlagenkombinationen zukünftig bei Niedrigenergie- und Passivhäusern eine zunehmende Rolle spielen werden (Meier-Wiechert 2000).

Tabelle 7.1.2-1 zeigt, dass seit 1994 die Zahl der jährlichen Neuinstallationen bei den bisher dominierenden Elektro-Wärmepumpen deutlich ansteigt, obwohl der Gesamtbestand wegen der Stilllegung alter Anlagen bisher bei rund 50.000 stagniert (www.strom.de/arc_9963.htm, Kaltschmitt 2001).

Tabelle 7.1.2-1: Neuinstallationen und Bestand an Elektro-Wärmepumpen 1993 – 1998

	Neue Installationen	Gesamter Bestand
1993	520	50.220
1994	1.270	49.470
1995	1.940	48.220
1996	2.310	47.380
1997	3.150	49.080
1998	3.818	50.365

In den letzten Jahren hat Erdreich als Wärmequelle einen Anteil von 72 % (Göricke 2001). Für 1999 gibt dieser Autor die Installierung von 4.719 Wärmepumpen an (alle Typen) und nach (IWP 2001) wurden in 2000 ca. 5.800 Heizungs-Wärmepumpen und ca. 3.500 Warmwasser-Wärmepumpen neu aufgestellt. Insgesamt wurden Ende 2000 ca. 60.000 Wärmepumpen betrieben mit einer elektrischen Anschlussleistung von 370 MW (nur Heizwasser), die geschätzte 13 PJ/a (davon 6 PJ/a aus der Luft und 7 PJ/a aus dem Erdboden) zur Deckung der Nutzenergienachfrage beitragen (Kaltschmitt 2001).

7.1.3 Anlagekosten

Den Wärmepumpentypen (elektrisch, Sole–Wasser, Erdreichnutzung, entweder Sondenanlage oder Wärmetauscher bzw. Grabenkollektor) liegen nachstehende spezifische Gesamtinvestitionskosten zugrunde, wobei sich der Wärmeleistungsbereich von 5 bis 50 kW erstreckt und die Kostenwerte in DM₉₅ pro kW Heizleistung ausgedrückt werden und keine Mehrwertsteuer enthalten. Für die technische wie wirtschaftliche Lebensdauer werden 18 Jahre angesetzt. Die Werte gelten für die 2 Wärmepumpentypen in Abhängigkeit vom Herstellungsjahr (1995, 2005, 2020).

Tabelle 7.1.3: Spezifische Werte der gesamten Investitionskosten für Wärmepumpenanlagen in DM₉₅/ kW_{th} (IKARUS-DB)

		Heizleistungen		
		5 kW _{th}	10 kW _{th}	50 kW _{th}
1995	Sonde	3.022	2.069	1.148
1995	Wärmetauscher	5.018	3.234	1.565
2005	Sonde	3.532	2.331	1.222
2005	Wärmetauscher	5.528	3.496	1.639
2020	Sonde	3.267	2.155	1.130
2020	Wärmetauscher	5.262	3.320	1.546

Auch (BMU 1999) geht ausführlich auf die Wärmepumpe ein und stellt zunächst fest, dass ihr Marktanteil bei neu installierten Heizungssystemen auch heute noch deutlich unter 2 % liegt. Dies ist auf ihre relativ hohen Wärmekosten zurückzuführen, da die Aufwendungen für Wärmepumpe, Wärmequelle, Pufferspeicher und Fußbodenbeheizung im Vergleich zu alternativen Heizsystemen sehr fixkostenintensiv sind. Im Neubau liegen die Mehrinvestitionen relativ zu Gasbrennwertkesseln zwischen etwa 40 % (EFH-EnEV) und bis zu 80-100 % (EFH-WschVO95). In Bezug auf Ölheizkesseln ist von etwa halb so hohen Mehrinvestitionen auszugehen. Die Wärmekosten liegen zwischen 25 % (relativ zu Gasbrennwertkesseln) und 15 % (bezogen auf Ölheizungskesseln) höher.

Generell steigen die Mehrkosten mit steigender Effizienz (z. B. bei Grundwasser) der Wärmepumpenanlage. Fallweise Wirtschaftlichkeit liegt an z. T. gewährten Strom-Sondertarifen (8 – 13 Pf/kWh) und an zusätzlichen Investitionszuschüssen. Solche Sonderkonditionen lassen sich nur dann rechtfertigen, wenn ein positiver ökologischer Effekt vorliegt. Dies ist aber bisher im wesentlichen nur im Vergleich zu Ölheizkesseln möglich, wo ein CO₂-Minderungsbeitrag von mehr als 30 % eintreten kann (Grundwasser-Wärmepumpen).

7.1.4 Potenziale und Hemmnisse

In (Kaltschmitt 2001) werden folgende technischen Endenergiepotentiale (Nutzwärme aus der Umwelt ohne bzw. mit Berücksichtigung nachfrageseitiger Restriktionen) für Wärmepumpen angegeben:

- Technisches Endenergiepotenzial aus der Umgebungsluft ca. 1.755 PJ/a
- Technisches Endenergiepotenzial aus Erdwärme ca. 1.316 PJ/a

Das wirtschaftliche Potenzial ist nach Prognos 1999 derzeit gering, Wirtschaftlichkeit ist nur in Einzelfällen gegeben. Bis 2020 wird ein Anstieg des Beitrags der Umgebungswärme zum End-

energieaufkommen (Raumwärme + Warmwasser) von 4,7 PJ in 1997 auf 25 PJ in 2020 erwartet. Diese Werte sind die Netto-Nutzenergie, also die erzeugte thermische Energie minus Stromeinsatz und enthält auch den Beitrag der Geothermie.

(Enquete 1995) stellt explizit zu den Hemmnissen fest: Die hohen Investitionen im Zusammenhang mit dem niedrigen Preisniveau für flüssige und gasförmige fossile Energieträger bilden das Haupthindernis für eine weitere Verbreitung der Elektro-Wärmepumpen. Derzeit sind nennenswerte Kostendegressionen bei den Investitionen nicht absehbar, so dass sich bei unverändert bestehenden Rahmenbedingungen die Wirtschaftlichkeit der Elektro-Wärmepumpen nicht verbessern wird.

Auch in (BMU 1999) wird das Anwendungspotenzial elektrischer Wärmepumpen in Zielrichtung Klimaschutz als „eher begrenzt“ bezeichnet. Der Anwendungsbereich ist auf den Neubau von Ein- und Zweifamilienhäusern beschränkt, da der nachträgliche Einbau einer notwendigen Fußbodenheizung für den Altbau zu hohen finanziellen Aufwendungen führt und im Mehrfamilienhaus das Investor-/Mieter-Dilemma ein wesentliches Hemmnis sein dürfte. Interessante Einsatzgebiete sind Gebäude mit sehr geringem Wärmebedarf (z. B. Niedrigenergie- und Passivhäuser).

7.2 Solarthermische Wandler

7.2.1 Ausführungen der vorangegangenen Enquete Kommission

Dem Beitrag erneuerbarer Energien in Deutschland widmet die vorangegangene Enquete Kommission viel Aufmerksamkeit (Enquete 1995). Den Schwerpunkte der Betrachtung bilden die solar induzierten Energien wie direkte Solarenergie, Wind, Biomasse und Wasserkraft. Die Geothermie wird dagegen nur knapp behandelt. Die erstgenannten Energien werden in ihren nationalen und globalen Perspektiven geschildert, z. B. auch die solarthermischen Kraftwerke, für die es in Deutschland selbst keinen Einsatz gibt.

Zum Potenzial von Kollektoren und solarer Nahwärme zur Wärmebedarfsdeckung macht Enquete 1995 drei Angaben (Abb. 6.3-3):

- Beitrag 1991: etwa 0,5 PJ/a,
- Beitrag 2005: wirtschaftlich nutzbar 100 – 700 PJ/a,
- technisch möglich: 750 – 2000 PJ/a.

Der prognostizierte Beitrag für 2005 von 100 bis 700 PJ muss aus heutiger Sicht als erheblich überzogen angesehen werden. Die Hauptursache dafür, dass diese Beiträge nicht erreicht werden sind die zu hohen Kosten sein.

7.2.2 Status der Energie- und CO₂-Einsparung

Nach (Prognos 1999) sind Ende 1998 etwa 2,5 Mio. m² Kollektorfläche vorhanden, die einer Endenergieerzeugung von etwa 3,2 PJ/a entsprechen. Nach Kaltschmitt 2001 waren Ende 2000 schon nahezu 4 Mio. m² Kollektoren installiert, die eine Wärme von rund 5 PJ/a bereitstellten. Dies sind 2 % des Warmwasserbedarfs im Haushaltsbereich von ca. 250 PJ/a.

Zur CO₂-Einsparung wird angegeben, dass eine durchschnittliche Anlage von 5 m² Kollektorfläche im Vergleich zur Ölheizung rund eine Tonne CO₂ im Jahr vermeidet. Mit den heute installierten 4 Mio. m² werden rund 0,8 Mio. t CO₂ eingespart.

7.2.3 Kosten und Wirtschaftlichkeit

BMWi 1999 und BMU 1999 gehen von den in Tabelle 4.6.3-1 dargestellten Systemkosten für solarthermische Anlagen aus. Bei den Zahlen des BMWi beziehen sich die unteren Werte des Bereichs für Kleinanlagen auf Flachkollektoren und die oberen auf Vakuumkollektoren. Die entsprechende Zahl des BMU von 1.870 DM/m² ist als ein Mittelwert zu verstehen. Die Zahlen des BMU zeigen deutlich den Einfluss der Größendegression. So ist die zehn mal größere Anlage rund 40 % billiger.

Deshalb weist BMU 1999 auch auf solare Großanlagen und ihre Anbindung an Nahwärmesysteme hin. Diese Systeme sind, abgesehen von einer Reihe von Einzelprojekten, noch in der Erprobungsphase und sollen entweder mit Kurzzeit- oder saisonalen Langzeitwärmespeichern (letztere mit Wärmespeicherung vom Sommer bis in den Winter) angeboten werden. Im ersteren Fall erfolgt die Auslegung auf 10-20 % solaren Deckungsanteil für Heizung und Warmwasser, sonst auf mehr als 50 %.

Tabelle 4.6.3-1: Spezifische Anlagekosten solarthermischer Anlagen

	BMWi DM/m ²	BMU DM/m ²
Kleinanlagen (5 m ² Kollektorfläche)	1.000 – 3.900	1.870
Großanlagen (50 m ² Kollektorfläche)		1.100

BMU gibt für die in Tabelle 4.6.3-1 aufgeführten Wärmegestehungskosten von 0,50 bis 0,29 DM/kWh an. Die heutigen Privatkunden-Gesamtpreise für Erdgas liegen bei etwa 0,10 DM/kWh mit einer Bandbreite von 0,09 bis 0,15 DM/kWh (Stadtwerke 2001). Zu den aktuellen Heizölpreisen werden hier Angaben aus dem Handelsblatt vom 26.06.2001 zitiert (Lieferung von 3000 l/frei Haus, inkl. aller Nebenkosten wie 16 % Mehrwertsteuer): 0,07 – 0,08 DM/kWh. Bei einem Vergleich mit den solaren Wärmegestehungskosten ist noch ein Zuschlag für den Heizkessel von ca. 0,05 DM/kWh zu berücksichtigen. Trotzdem zeigt sich, dass die solare Kilowattstunde zwei bis dreimal teurer ist als die mit Öl oder Gas erzeugte Kilowattstunde. Für den Anlagenbetreiber kann sich die Solaranlage lohnen, wenn er entsprechende finanzielle Fördermittel einsetzen kann.

Langfristig werden die Kosten der solaren Wärmeerzeugung sinken. Die Studie von BMU 1999 gibt einen mittleren Lernfaktor (Reduktion der spez. Anlagekosten bei Verdoppelung der kumulierten Anlagenproduktion) von 0,88 – 0,90 an und erwartet (ab 1999) bis 2010 eine Kostenabsenkung auf 75 – 80 % bei Großanlagen, auf 50 – 60 % bei Kleinanlagen) und langfristig (>2020) auf 35 – 40 %.

7.2.4 Potenziale

BMU 1999 gibt für die solarthermische Nutzung auf Dach-, Siedlungs- und Freiflächen ein gesamtes technisches Potenzial von 1900 PJ/a an. Neuere Untersuchungen von Kaltschmitt 2001 schätzen das realistische technische Endenergiepotenzial der Solarthermie von Dach- und Freiflächen in Deutsch-

land mit insgesamt 1420 PJ/a deutlich niedriger ein. Beide Angaben beziehen sich auf Warmwasserbereitung und Raumwärmebereitstellung inkl. Nahwärme.

Aufgrund der wirtschaftlichen Probleme ist das Erwartungspotenzial jedoch wesentlich geringer als das technische Potenzial. Zukünftig wird mit einem kontinuierlichen Anstieg der jährlich installierten Kollektorfläche von etwa 400.000 m²/a in 1998 auf 600.000 m²/a in 2010 und auf 800.000 m²/a in 2020 gerechnet. In 2010 sind dann 7,7 Mio. m² und in 2020 ca. 15 Mio. m² Kollektorfläche vorhanden. Dies entspricht Jahresausbeuten an Nutzenergie (bei 350 kWh/m²·a Durchschnitt) von 10 PJ/a in 2010 und von 19 PJ/a in 2020.

Auch Kleemann et al. 2000 stellen fest, dass unter den Klimaverhältnissen Deutschlands die Warmwasserbereitung die Hauptanwendung der solarthermischen Anlagen in Zukunft bleiben wird. Der erwartete Beitrag zur Warmwasserversorgung in Haushalten im Jahr 2050 wird auf höchstens 80 PJ geschätzt. Dieser Wert entspricht etwa einem Drittel der heutigen Endenergie für Warmwasser. Bei einer solaren Deckungsrate von gut 50 % würden dann etwa 2/3 aller Haushalte eine Solaranlage haben. Ein entsprechend großer Anteil ist dann noch einmal für den Nichtwohnbereich anzusetzen. Mit diesem eher pessimistisch geschätzten langfristigen Erwartungspotenzial wären dann ca. 10 % des technischen Potenzials ausgeschöpft.

7.3 Biomassewandler

Biomasse umfasst alle biogenen Stoffe (Pflanzen- und Tiermaterie), zu denen sowohl Stoffe gehören, die nur zur energetischen Nutzung vorgesehen sind, als auch Stoffe, die zunächst anderweitig genutzt wurden (z. B. Baustoffe, Möbel, Nahrungsmittel) und entweder in ursprünglicher Form oder durch Gebrauch verändert (Abwässer, Rückstände der Nahrungsmittelherstellung, Getreidestroh, Gülle, Mist) schließlich auch energetisch genutzt werden können. Diese Reststoffe werden im nächsten Kapitel „Restenergienutzung“ nochmals bezüglich ihres technischen Potenzials kurz angesprochen. Im engeren Sinne wäre primäre energetische Biomasse nur bei Energiepflanzen gegeben, weil selbst Waldholz i. a. zuerst anderweitig genutzt wird und Holzabfall aus der Waldnutzung unter Restholz fällt.

7.3.1 Ausführungen der vorangegangnen Enquete Kommission

Enquete 1995 geht auch auf Biomassewandler etwas ausführlicher ein. Für den Raumwärmebereich ist insbesondere die Biomasse-Verbrennung interessant, wobei (mit Ausnahme der Holz- und Holzhackschnitzelverbrennung) festgestellt wird, dass die technische Marktreife dafür generell erreicht ist, aber zum Teil noch die Anwendungserprobung (vor allem bezüglich der Lebensdauer) aussteht und dass auch noch allgemein ein Entwicklungsbedarf besteht, z. B. für Strohöfen.

Für Holz- und Strohheizwerke wird (bei einer Auslastung von 5000 h/a) eine Bandbreite der Wärmegestehungskosten von 0,04 – 0,08 DM/kWh (Status 1992) bzw. 0,05 – 0,1 DM/kWh (Status Serie) angegeben. Für Biogasanlagen werden folgende Bandbreiten für die Gaskosten bei 4 % Verzinsung in DM/kWh zitiert: Einzelanlage 0,08 – 0,12 DM/kWh (Status 1992) und 0,04 – 0,064 DM/kWh (Status Serie) angegeben. Die entsprechenden Kosten für Großanlagen werden 10 bis 40 % niedriger angegeben.

Zum Potenzial der Biomasse (einschließlich Energiepflanzenanbau und Müllverbrennung) werden in (Enquete 1995) folgende Zahlen genannt:

- 1991 genutzt: 140 PJ/a
- 2005 wirtschaftlich: 300 – 400 PJ/a
- Technisch möglich: 600 – 850 PJ/a

Die für 2005 als wirtschaftlich geschätzten Potenziale dürften aus heutiger Sicht zu hoch sein.

7.3.2 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Biomasse-Heisanlagen sind u. a. als Holzdauerbrandöfen für Einzelwohnungen geeignet. BMU 1999 beschreibt dagegen nur Biomasse-Großanlagen (> 30 MW_{th}, Holzkessel, Holz- und Strohheizwerke, Heizkraftwerke), die über Fern- oder Nahwärmnetze zur Gebäudeversorgung beitragen können.

Für Holzdauerbrandöfen mit einer kleinen thermischen Leistung von 2 – 8 kW liegen die Effizienzwerte für Nennlast bei 73 bis 74 %. Die spezifischen Investitionskosten betragen 338 DM₉₅/kW für eine thermische Leistung von 4,5 kW und 274 DM₉₅/kW bei 8 kW Leistung (IKARUS-DB).

In BMU 1999 werden die in Tabelle 7.3.2-1 gezeigten Wärmegestehungskosten (Pf/kWh, Stand 1999) für kleine bis mittlere Biomasse-Heisanlagen, Nutzungsdauer 20 Jahre angegeben. Die ausgewiesenen Werte zeigen, dass die Anlagen wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Tabelle 7.3.2-2 zeigt aus der gleichen Quelle die entsprechenden Werte für Heizkraftanlagen.

BMU 1999 gibt einen mittleren Lernfaktor (= Reduktion der spezifischen Anlagekosten bei Verdoppelung der kumulierten Anlagenproduktion) von 0,95 (bestenfalls 0,90) an und erwartet (ab 1999) bis zum Jahr 2010 eine Kostenabsenkung auf 85 – 90 % und langfristig (>2020) auf 80 – 85 %.

Tabelle 7.3.2-1: Wärmegestehungskosten (Pf/kWh, Stand 1999) für Biomasse-Heisanlagen unterschiedlicher Technik und Leistungsgröße

	<i>Stückholzkessel</i>	<i>Hackschnitzel</i>
Feuerungsleistung (kW _{th})	30	40
Investitionskosten (DM/kW)	835	1.500
Brennstoffkosten (Pf/kWh)	0 / 1,3 / 3,5	0 / 1,3 / 3,5
Wärmekosten (Pf/kWh)	8,6 / 10,5 / 13,6	20,3 / 21,9 / 24,7
	<i>Holzheizwerk klein</i>	<i>Holzheizwerk groß</i>
Feuerungsleistung (kW _{th})	300	10.000
Investitionskosten (DM/kW)	1.100	550
Brennstoffkosten (Pf/kWh)	0 / 1,3 / 3,5	0 / 1,3 / 3,5
Wärmekosten (Pf/kWh)	4,3 / 5,9 / 8,5	1,8 / 3,3 / 5,9
	<i>Strohheizwerk klein</i>	<i>Strohheizwerk groß</i>
Feuerungsleistung (kW _{th})	1.200	4.000
Investitionskosten (DM/kW)	1.500	1.400
Brennstoffkosten (Pf/kWh)	0 / 3,0 / 5,5	0 / 3,0 / 5,5
Wärmekosten (Pf/kWh)	4,8 / 8,5 / 11,7	3,7 / 7,3 / 10,2

Tabelle 7.3.2-2: Wärmegestehungskosten (Pf/kWh, Stand 1999) für Biomasse-Heizkraftanlagen (BMU 1999)

	<i>Kleines Holz- Heizkraftwerk</i>	<i>Großes Holz- Heizkraftwerk</i>
Feuerungsleistung (kW _{th})	5.000	20.000
Nennleistung (kW _{el})	500	2.000
Investitionskosten (DM/kW _{el})	14.000	8.500
Brennstoffkosten (Pf/kWh)	1,3 / 3,5	1,3 / 3,5
Wärmekosten mit Stromvergütung von 15 Pf/kW _{el} (Pf/kWh)	4,0 / 7,1	2,1 / 5,0
	<i>Holzgas-BHKW klein</i>	<i>Holzgas-BHKW groß</i>
Nennleistung (kW _{th})	180	2.632
Nennleistung (kW _{el})	100	2.000
Investitionskosten (DM/kW _{el})	10.740	4.660
Brennstoffkosten (Pf/kWh)	0 / 1,3 / 3,5	0 / 1,3 / 3,5
Wärmekosten mit Stromvergütung von 15 Pf/kW _{el} (Pf/kWh)	7,0 / 10,3 / 15,8	-2,8 / 0,9 / 7,2
	<i>Biogasanlage klein</i>	<i>Biogasanlage groß</i>
Reaktorvolumen (m ³)	100	1.200
BHKW-Leistung (kW _{el} /kW _{th})	24 / 48	279 / 531
Investitionskosten (DM/kW _{el})	8.375	14.600
Stromkosten (Pf/kWh)	29,8	22,5
Wärmekosten (Pf/kWh)	12,0	16,7

Negative Wärmekosten bedeuten, dass die Stromerlöse den Aufwand zur Wärmebereitstellung überkompensieren.

Nachstehend werden aktuelle Bandbreiten für Biomasse-Brennstoffpreise für das Jahr 2000 in Pf/kWh_{th} angegeben (Daten aus BIZ 2000). Bei Stückholz sind die Preise abhängig von der Aufbereitung (von der Länge – von ungesägt bis 33 cm – und ob gespalten oder nicht, zusätzlich auch ob zu Briketts oder Pellets verarbeitet) und von der Art der Bereitstellung (Verkauf ab Wald, Lager, Sägewerk oder Anlieferung frei Haus):

- Für Haushalte: 0 – 10 Pf/kWh_{th}
- Für industrielle Abnehmer:
 - Holzverarbeitungsreste, z. B. Rinde, Späne, Hackgut, Anlieferung, mit praxisüblichen Wassergehalten: 1,4 – 5,0 Pf/kWh_{th}
 - Halmgut (Stroh- und Getreideganzpflanzenballen, Pellets aus Getreideganzpflanzen): 2,0 – 4,0 Pf/kWh_{th}

Zu vergleichen sind diese Angaben mit heutigen Privatkunden-Gesamtpreisen für Erdgas von etwa 10 Pf/kWh_{th} (Stadtwerke 2001) mit einer Bandbreite von 9 – 15 Pf/kWh_{th} und einem industriellen und gewerblichen Erdgaspreis von 6,1 – 6,7 Pf/kWh_{th} je nach Abnehmergröße, berechnet aus vom 1. April bis zum 30. Juni 2001 begrenzten Referenzwerten des Heizölpreises (VIK 2001). Zu den aktuellen Heizölpreisen werden hier Angaben aus dem Handelsblatt vom 26.06.2001 zitiert (Lieferung von 3000 l/frei Haus, inkl. aller Nebenkosten wie 16 % Mehrwertsteuer): 7,2 – 8,1 Pf/kWh. Die Biomassepreise liegen z.T. deutlich unter den Werten von Öl und Gas.

7.3.3 Potenzialangaben

Zum technischen Potenzial (Heizwert) werden in (BMU 1999) folgende Referenzwert-Angaben aufgrund einer Auswertung verschiedener Studien gemacht:

- Gesamtes Restholz: 220 PJ/a
- Reststroh (~ 15-20 % des Aufkommens): 100 PJ/a
- Energiepflanzen: 285 – 1050 PJ/a (1,5 – 5 Mio ha)

Zusammen genommen entspricht das technische Gesamtpotenzial einem Wertebereich von 605 bis 1370 PJ/a an fester Biomasse. Bei einem Primärenergieverbrauch im Jahre 1999 von rund 14.200 PJ liegt der relative Anteil bei 4 bis 10 %. Kaltschmitt 2001 gibt technische Endenergiepotenziale von 1485 – 1750 PJ/a an.

Es erscheint sinnvoll, die technischen Potenzialzahlen für Biomasse wie folgt einzuordnen:

- Mittelfristig (bis 2020): 605 - 1370 PJ/a feste Biomasse nach BMU 1999.
- Langfristig (bis 2050): ~ 1485 - 1750 PJ/a biogene Stoffe nach Kaltschmitt 2001.

7.3.4 Hemmnisse

Allerdings ist nach BMU 1999 davon auszugehen, dass die Energiegewinnung aus Energiepflanzen in naher Zukunft voraussichtlich keinen wesentlichen Beitrag leisten wird, da die Brennstoffbereitstellung derzeit noch mit zu hohen Kosten verbunden ist. Auch Prognos 1999 stellt dazu fest, dass hinsichtlich der Kosten auch zukünftig nicht von signifikanten Reduktionen ausgegangen werden kann, weil die Produktionsverfahren des Festpflanzenanbaus seit Jahren Stand der Technik sind und keine nennenswerten Innovationen zu erwarten sind. Die bisherigen Anreize durch Flächenstilllegungsprämien und das Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG) reichen für eine Erschließung eines merkbaren Teils der Potenziale nicht aus. Dazu müssten zusätzliche Förderungen angeboten werden.

7.4 Restenergienutzung

In Enquete 1995 werden folgende Stoffe unter „Rest- und Abfallstoffverwertung“ aufgezählt: Müll-, Klär- und Deponiegas, Restholz, Stroh und Gülle aus der Viehhaltung und es werden auch Potenziale (Wärme und Strom) für die Jahre 2010 und 2040 von 94 bzw. 161 PJ/a zitiert. Die Nutzungsmöglichkeiten umfassen Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse und Fermentation.

BMU 1999 gibt folgende technischen Potenziale für (energetisch nutzbare) feste und feuchte Reststoffe (ausgedrückt als Biogas-Ertrag) an:

- Feste Reststoffe 184 – 502 PJ/a
- Feuchte Reststoffe 65 – 149 PJ/a
- Summe 249 – 651 PJ/a

Literatur für Kapitel 7

BIZ (2000): Biomasse-Info-Zentrum c/o Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Januar 2000: www.biomasse-info.net

Böhmer (1999): T. Böhmer: Marktsituation der elektrischen Wärmepumpe in Deutschland, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 98 (1999), Heft 20, 18-24

BMU (1999): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien, Studie im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes, UFOPLAN-Vorhaben 298 97 340, 31. Oktober 1999

BMWi (1999), Erneuerbare Energien nutzen, Druckschrift des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.

Enquete (1995): Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.): Mehr Zukunft für die Erde – Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz, 1995 Economica Verlag GmbH, Bonn, ISBN 3-87081-464-0

Görlicke (2001): Stand der Elektro-Wärmepumpe zur Raumheizung, IWP e.V. – Initiativkreis Wärmepumpe, 2000

IKARUS-DB (2001): IKARUS-Datenbank Retrievalsystem 3.2, entwickelt vom FIZ Karlsruhe, 2000

Kaltschmitt M. (2001): Regenerative Energien, BWK Bd.53 (2001) Nr. 4, 69-75

Kleemann M. et al. (1999): CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das CO₂-Minderungsprogramm der KfW, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 17.

Meier-Wiechert (2000): Das Heizsystem der Zukunft, HLH Bd. 51 (2000) Nr. 9 – September, 26-33

Prognos (1999): K. Eckerle et al. („Prognos“), M. Kreuzberg et al. („EWI“): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Basel, im September 1999

Stadtwerke (2001): Stadtwerke Jülich: Private Mitteilung, 20.06.2001

VIK (2001): VIK-Mitteilungen 3-2001: Erdgaspreise ab April 2001 – Begrenzung der Heizölpreis-Referenzwerte, S. 68

www.strom.de/arc_9963.htm, 10.05.2001

8 Energieträgerwechsel

Ausführungen der vorhergehenden Enquete Kommission: Diesem Thema widmet Enquete 1995 ein eigenes Kapitel (6.4). Dabei wird insbesondere die Raumwärme- und Warmwasserversorgung der Haushalte explizit ausgewiesen, aber nur für die alten Bundesländer. Schwerpunkt ist dabei naturgemäß der verstärkte oder ausschließliche Einsatz von Erdgas anstelle der anderen fossilen Energieträger. In die Abschätzungen nicht einbezogen wird die Substitution von Strom durch Erdgas. Die Bereitstellung von Strom durch nichtfossile Energieträger könnte die unten genannten Potenziale in etwa verdoppeln, bezogen auf den Primärenergiemix der Stromerzeugung im Zeitraum um 1993. Danach liegt das CO₂-Minderungspotenzial für die Raumwärme- und Warmwasserversorgung der Haushalte in den alten Bundesländern 2005 durch verstärkten Erdgaseinsatz bei ca. 14 Mio. t CO₂. Im Sinne eines technischen Potenzials kann dieser Wert aus heutiger Sicht bestätigt werden

Schätzung der CO₂-Einsparpotenziale durch Energieträgerwechsel: Tabelle 8.1-1 zeigt in der zweiten und dritten Spalte die Endenergieträgerstruktur für die Raumwärmebereitstellung im Wohngebäudebereich. Für die Schätzung wird unterstellt, dass Öl, Strom und Kohle zu 2/3 durch Gas ersetzt werden könnten. Dabei wird pauschal unterstellt, dass ca. 1/3 aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht an das Gasnetz angeschlossen werden kann. Außerdem soll dieser Abschlag die besseren Wirkungsgrade der Gaskessel mit berücksichtigen.

Wird das Substitutionspotenzial durch die Differenz der CO₂-Koeffizienten in CO₂-Einsparpotenzial umgerechnet, dann ergeben sich die Zahlen in der letzten Spalten von Tabelle 8.1-1. Das Gesamtpotenzial von 25,2 Mio. t entfällt mit 10,6 Mio. t auf die Substitution von Strom und mit 14,6 Mio. t auf die Substitution der Brennstoffe Öl und Kohle. Da sich diese Potenziale am Energiemarkt nicht umsetzen lassen, sind die Zahlen eher im Sinne eines technischen Potenzials anzusehen. Darüber hinaus löst die Substitution durch Erdgas das Problem langfristig nicht. Vielmehr sind Massnahmen vorrangig, die den Energieverbrauch senken, wie die Gebäudesanierung und der Einsatz effizienter Umwandlungstechnologien.

Tabelle 8.1-1: Erdgassubstitutionspotenzial und CO₂-Einsparpotenzial für die Raumwärmebereitstellung im Wohngebäudebereich (1999)

	Verbrauch 1999		Substitutionspotenziale PJ	CO ₂ -Einsparpotenzial PJ
	%	PJ		
ÖL	40,2	839	558	11,9
Gas	43,0	895	0	0
Strom	5,4	113	75	10,6
Fernwärme	6,6	138	0	0
Kohle + Sonstige	4,7	98	65	2,7
Summe	100	2082	698	25,2

Durch konsequente Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle, wie in Kap. 1.2 beschrieben, und durch eine stetige Verbesserung des Nutzungsgrades, wie in Kap. 6 ausgeführt, verringert sich der Energieverbrauch zur Raumwärmebereitstellung im Wohngebäudebereich bis 2020 um rund 1/3 und

Bis 2050 um rund 2/3. Entsprechend verringern sich die Substitutionspotenziale. Nach der gleichen Methode wurden die CO₂-Einsparpotenziale im Nichtwohngebäudebereich geschätzt. Tabelle 8.1-2 zeigt die geschätzten Anhaltswerte.

Tabelle 8.1-2: CO₂-Substitutionsüpotenzial für die Raumwärmebereitstellung im Gebäudebereich

	1999 Mio. t	2020 Mio. t	2050 Mio. t
Wohngebäudebereich	25,2	17	8,4
Nichtwohngebäudebereich	9,2	6,1	3,0
Gesamter Gebäudebereich	34,4	23	11,4

Literatur für Kapitel 8

Enquete (1995): Enquete Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.), Mehr Zukunft für die Erde – Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz, Economica Verlag GmbH, Bonn, ISBN 3-87081-464-0

Prognos (1999): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, Untersuchung für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Berlin, Basel.

9 Energieeinsparpotenziale bei Lüftung und Klimatisierung

Kapitel 9 ist eine vom Forschungszentrum Jülich überarbeitete Kurzfassung einer unveröffentlichten Untersuchung von K. Leubner, RM Consult Berlin von Juli 2001 mit dem Titel: „Energieeinsparpotenziale bei Lüftung und Klimatisierung für den Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude“.

9.1 Defizitanalyse der Vorarbeiten der vorhergehenden Enquete-Kommission

Der Bereich Lüftungs- und Klimatisierungssysteme wurde im Bericht der vorangehenden Enquete-Kommission nur marginal behandelt. Es fehlt weitgehend eine Darstellung und Charakterisierung unterschiedlicher Lüftungstechnologien (Stand der Technik), der auf Sektor- und Gebäudeklassen bezogenen Energieverbräuche sowie eine umfassende Darstellung von Einsparmaßnahmen und Einsparpotenzialen. Die wachsende Bedeutung der Klimatisierungs- und Lüftungstechniken als typische Querschnittstechnologie soll deshalb in den folgenden Kapiteln ausführlicher analysiert werden.

9.2 Stand der Lüftungs- und Klimatisierungstechnik

Der Bereich der Lüftung und Klimatisierung ist als Raumluftechnik neben der Prozesslufttechnik ein Teilbereich der Lufttechnik. Die Prozesslufttechnik behandelt die Anwendung von Luft bei Prozessen z.B. zur Trocknung, Späneabsaugung oder pneumatischer Förderung.

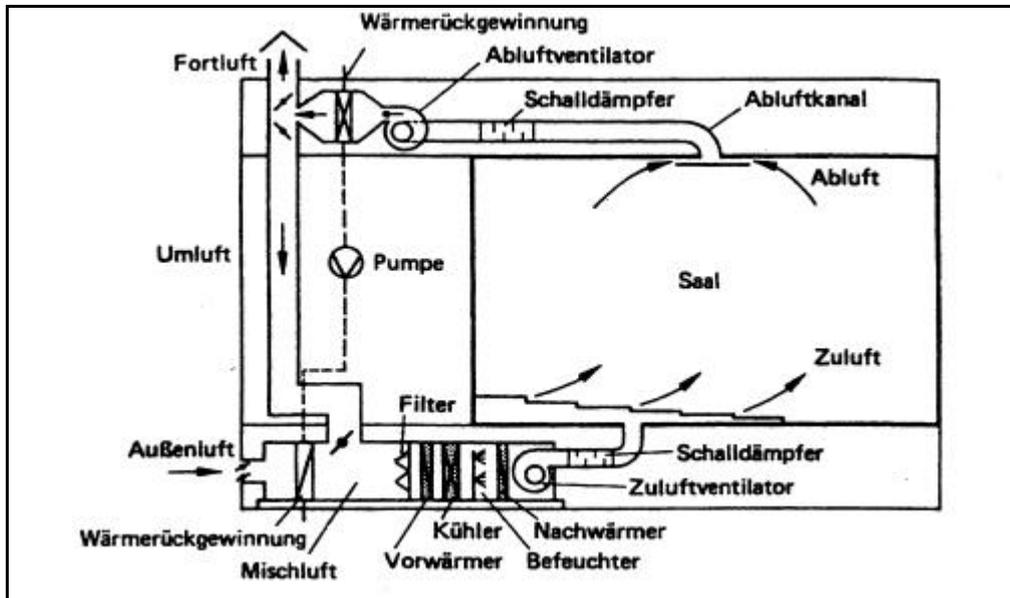
Die Raumluftechnik teilt sich in die *freie Lüftung*, die ihrerseits Außenhaut-, Fenster-, Schacht- und Dachaufsatzlüftung beinhaltet, und in die *raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen)*. Letztere untergliedern sich nach Anzahl der thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten in Lüftungsanlagen (eine Funktion), Teilklimaanlagen (zwei bis drei Funktionen) und Klimaanlagen (alle Funktionen). Weitere Unterscheidungskriterien sind das Kühlmedium (Luft oder Luft-Wasser), die Bauart (Einkanal, Zweikanal, Zweileiter, Vierleiter, Induktion) und die Medienregelung (konstanter oder variabler Volumenstrom).

Grundsätzlich haben alle raumluftechnischen Anlagen die Aufgabe, Temperatur, Feuchte und Luftverunreinigungen in bestimmten Grenzen zu halten. Zu diesem Zweck weisen RLT-Anlagen je nach Menge der Luftbehandlungsfunktionen eine Reihe von Bestandteilen auf: Zuluftventilatoren saugen Außenluft, die eventuell in einer Mischkammer mit Raumluft vermengt wird, über Luftkanäle an und fördern diese zur Luftreinigung über einen Filter. Zur Einhaltung vorgegebener Temperatur und Feuchte wird die Luft durch Wärmeübertrager erwärmt oder gekühlt und be- oder entfeuchtet. Mit Hilfe von Wärmerückgewinnungssystemen kann die kalte Zuluft über Wärmeübertrager (regenerativ, rekuperativ) von der Abluft erwärmt werden. Zur Reduzierung von Geräuschemissionen werden Schalldämpfer eingesetzt. Abluftventilatoren transportieren die Luft schließlich ins Freie. Das Funktionsprinzip einer RLT-Anlage ist in Bild 3.1 skizziert.

RLT-Anlagen werden üblicherweise in Räumen eingesetzt, die durch besonders hohe innere Wärmelasten und Verunreinigungen gekennzeichnet sind. Solche Lasten können durch hohe Perso-

nenzahlen, technische Ausstattungen wie Beleuchtung, Bürogeräte und Maschinen sowie aufgrund von Geruchs- und Partikelemissionen bei Produktionsprozessen entstehen. Dies sind die Gründe, warum solche Anlagen derzeit überwiegend im Nichtwohnbereich eingesetzt werden.

Abbildung 9.2-1: Schematischer Aufbau einer Klimaanlage (Recknagel (81/82), S. 862)



9.3 Analyse der Energieverbräuche

9.3.1 Methodik zur Ermittlung der Energieverbräuche

Für den Bereich der Lüftung und Klimatisierung sind Energieverbräuche statistisch nicht separat erfasst, sondern unter Raumwärme verbucht. Zur Berechnung des Energieverbrauches raumluftechnischer Anlagen werden hier flächenspezifische Energiekennzahlen herangezogen. Solche Größen sind in anderen Untersuchungen aufgestellt worden, teilweise jedoch auf unterschiedliche Flächen (Bruttogesamt- oder Nutzfläche) bezogen (Müller, 1998; IKARUS, 1995; Knissel, 1999). In dieser Arbeit ist die Bezugsfläche die jeweilige Nutzfläche.

Der Energiebedarf einer Klimaanlage setzt sich aus der elektrischen Energie des Ventilators für den Lufttransport sowie gegebenenfalls für Pumpen und weitere Hilfsaggregate und der thermischen Energie zum Erwärmen oder Kühlen der Luft zusammen. Der Jahresenergiebedarf ist die Summe aus:

- jährlichem Wärmebedarf,
- jährlichem Kältebedarf und
- jährlichem Elektroenergiebedarf.

Umgerechnet nach Leubner 2001 wird im folgenden der Anteil des Stroms im Mittel auf knapp 20 % des gesamten jährlichen Endenergieverbrauchs festgelegt.

Es gibt folgende grundsätzliche Möglichkeiten bei Klimaanlage zur Energieoptimierung:

- Ein geringst möglicher Volumenstrom ist anzustreben, ohne jedoch die erforderliche Mindestluftmenge zu unterschreiten: eine 20%-ige Volumenstromabsenkung induziert eine 49%-ige Energieminderung (Haibel, 2001).
- Durch die Reduzierung der Ventilator Drehzahl verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit und damit der Energieverbrauch.
- Mit Verbesserung der Strömungszustände, z.B. durch Erhöhung der Kanalquerschnitte lässt sich weitere Energie sparen: Eine 20%-ige Querschnittserweiterung hat 36% Energieeinsparung zur Folge (Haibel, 2001).
- Systeme mit Wärmerückgewinnung bieten Einsparpotenziale von 50 bis 70 % (Haibel, 2001).

Wohngebäude

Der Anteil der mechanisch belüfteten Wohnungen betrug 1990 rund 10,1%, davon 98% durch Abluft- und 2% durch Zu- und Abluftanlagen (Heinz, 1991). Über die Klimatisierung von Wohngebäuden liegen kaum aktuelle Daten vor. Auch bezüglich der zukünftigen Entwicklung ist die Datenlage für den Wohngebäudebereich offensichtlich unzureichend. Deshalb wird der Wohngebäudebereich hier nicht weiter berücksichtigt. Im folgenden werden die Einsparpotenziale im Nichtwohnbereich behandelt, weil dort diese Technologien überwiegend eingesetzt werden.

Nichtwohnbauten

Nach verschiedenen Quellen ergibt sich 1999 für die gesamten Nichtwohngebäude eine Nutzfläche von ca. 1 Mrd. m² (Prognos 1999, Kleemann et al. 2000). In den statistischen Jahrbüchern werden die Nichtwohnbauten in weitere Gebäudearten wie beispielsweise Anstaltsgebäude, Fabrik- und Werkstattgebäude, Hotels und Gaststätten unterteilt. Da für diese Gebäudetypen im einzelnen keine Angaben über die Anteile der durch RLT-Anlagen konditionierten Flächen verfügbar sind, werden die Nichtwohngebäude (NWG) im folgenden lediglich in Büro- und Verwaltungsgebäude (BV) sowie Nichtwohnbauten ohne Büro- und Verwaltungsbauten aufgegliedert.

Büro- und Verwaltungsgebäude: Der größte Teil heutiger RLT-Anlagen ist in Büro- und Verwaltungsgebäuden installiert. Der wachsende Anteil an Glasfassaden, Personenbelegungen und technischen Büroausstattungen ließ bisher die inneren Wärmelasten ansteigen, welche vermehrt durch Raumlufttechnik abgeführt werden (IKARUS, 1995, S.26).

1999 entfallen auf die Büro- und Verwaltungsgebäude etwa 128 Mio. m². womit deren Flächenanteil am gesamten Nichtwohngebäude-Bestand knapp 12 % beträgt. Der Anteil der von RLT-Anlagen klimatisierten Nutzfläche bei Büro- und Verwaltungsgebäuden wird mit 75% angenommen (Fitzner, 2000, S.52). Dies ergibt eine konditionierte Fläche von etwa 96 Mio. m². Hierzu wird ein gesamter Endenergieverbrauch von 90 PJ errechnet (vgl. Tabellen 9.3.2-1 und 9.3.2-2).

Um die Flächenbestände der Jahre 2010 und 2020 ermitteln zu können, wird auf die Daten von (Prognos, 1999) zurückgegriffen. Hieraus lassen sich allerdings nicht die Bestände für Büro/Verwaltung direkt ablesen, sondern müssen anteilig berechnet werden. Dazu wird von den 12 % in 1999 ausgehend ein leicht gestiegener Anteil von 13% in 2010 und 2020 geschätzt.

Für das Jahr 2010 gilt außerdem die Annahme, dass jeder bis dahin errichtete Neubau mit einem RLT-System ausgestattet ist, was zu einem Anteil der raumluftkonditionierten Büro- und Verwaltungsgebäude von 85% führt. Durch Maßnahmen wie Reduzierung des Luftwechsels (Richter, 2001), Niedrigenergiebauweise mit RLT-Wärmerückgewinnungssystem oder Redimensionierung und Leistungsreduktion der Anlage (Energieagentur NRW, 2000, S. 353-355) werden etwa 40% Energie eingespart, wodurch die Energiekennzahlen sinken (vgl. Tabelle 9.3.2-1). Mit den noch in Betrieb befindlichen älteren Systemen betragen die Verbräuche dann 84 PJ.

Der ohnehin hohe Anteil mechanisch belüfteter Büro- und Verwaltungsflächen wächst von 2010 bis 2020 nur mehr gering auf 90%, was 145 Mio. m² entspricht. Der verstärkte Einsatz hocheffektiver Wärmerückgewinnungssysteme lässt den flächenbezogenen Energiekennwert um weitere 35% fallen (Richter, 2001). Für den Bestand der in 2020 betriebenen Anlagen ergibt sich dann ein Endenergieverbrauch von 74 PJ.

Im Verlauf der betrachteten Zeiträume ist ein permanenter Rückgang der Energieverbräuche von 90 PJ auf 74 PJ zu verzeichnen. Das erklärt sich aus der energieeffizienteren Technik in Verbindung mit dem schwachen Anwachsen der anteilig konditionierten Flächen.

Nichtwohnbauten ohne Büro-/Verwaltung: Unter dieser Gebäudekategorie sind sehr verschiedenartige Bauten zusammengefasst, so dass ein geeigneter Energiekennwert aus den einzelnen gebäudespezifischen Werten ermittelt werden muss. Dazu werden die jeweiligen Typgebäude, der Kategorisierung in (IKARUS, 1995) entsprechend, erfasst und ihnen ein Durchschnitt aus den in (IKARUS, 1995) ermittelten Werten mit Energierückgewinnung zugeordnet. Diese Werte wiederum werden zu einem Kennwert zusammengefasst und damit der Energieverbrauch der Nichtwohnbauten ohne Büro und Verwaltung berechnet (vgl. Tabelle 9.3.1-1). Die Vorgehensweise stellt lediglich ein Grobverfahren dar und kann nur einer Abschätzung der Energieverbräuche dienen.

Der Bestand für 1999 kann analog zu den Büro/Verwaltungsgebäuden erfasst werden und ergibt eine Nutzfläche von 0,9 Mrd. m². Der Anteil der klimatisierten Fläche wird hier mit 35% angenommen (Fitzner, 2000, S.52). Die Anlagentechnik wird in allen Szenarien mit der für die Bürobauten unterstellten gleichgesetzt. Für 1999 errechnet sich ein Endenergieverbrauch von 408 PJ.

Für 2010 wird ein Anteil an RLT-Anlagen von 40% angenommen, woraus sich unter Berücksichtigung der angestiegenen Bestandsfläche ein Endenergiebetrag von 384 PJ ergibt. Für 2020 werden durch RLT-Anlagen 45% der Flächen belüftet, wobei ein Verbrauch von 342 PJ auftritt. Diese rückläufige Entwicklung ist analog zu den Büro/Verwaltungsbauten mit den Energieeinsparungen bei den Neubauten erklärbar.

9.3.2 Energieverbräuche von Wohn- und Nichtwohngebäuden

Tabelle 9.3.2-1 zeigt die zugrunde gelegten Anteile der ausgerüsteten Gebäudeflächen und die Endenergie-Kennzahlen für die Entwicklung von 1999 bis 2020. Der Anteil des Stroms beträgt an den Endenergie-Kennzahlen knapp 20 %.

Tabelle 9.3.2-1 Anteile und Kennzahlen der ausgerüsteten Nichtwohngebäude

			1999	2010	2020
Ausgerüstete Gebäudefläche	NWG ¹⁾ nur B/V ²⁾	Mio. m ²	96	127	145
Ausgerüstete Gebäudefläche	NWG ohne B/V	Mio. m ²	318	415	473
Anteil der ausgerüsteten Fläche	NWG nur B/V	%	75	85	90
Anteil der ausgerüsteten Fläche	NWG ohne B/V	%	35	40	45
Spez. Endenergieverbräuche	NWG nur B/V	kWh/m ²	260	184	141
Spez. Endenergieverbräuche	NWG ohne B/V	kWh/m ²	357	257	202

1) NWG = Nichtwohngebäude (ohne Büro- und Verwaltungsgebäude)

2) B/V = Büro- und Verwaltungsgebäude

In der Tabelle 9.3.2-2 sind die mit den ermittelten Gebäudeflächen und den Energiekennzahlen berechneten Endenergieverbräuche zusammengestellt. Die Endenergieverbräuche für den Bereich Lüftung und Klimatisierung im Nichtwohngebäudebereich betragen in 1999 insgesamt 498 PJ, in 2010 ca. 468 PJ und 2020 ca. 416 PJ.

Tabelle 9.3.2-2 Endenergieverbrauch durch Klimatisierung/Lüftung

	1999	2010	2020
	PJ	PJ	PJ
Büro/Verwaltung B/V)	90	84	74
Nichtwohngebäude ohne B/V	408	384	342
Gesamt	498	468	416

Die Tabelle 9.3.2-3 stellt die CO₂-Emissionen der einzelnen Jahre und Bereiche zusammen. Die Emissions-Minderungen ergeben sich aus den Brennstoff- und Stromeinsparungen wurden. Beim Strom wurde der deutsche Strommix nach GEMIS4 zugrunde gelegt. Die Emissionen von CO₂ zeigen ähnliche Tendenzen wie die Endenergieverbräuche. Im Jahre 1999 betragen die CO₂-Emissionen 46,4 Mio. t, in 2010 ca. 41,9 Mio. t und 2020 ca. 35,4 Mio. t.

Tabelle 9.3.2-3 Emissionen durch Klimatisierung und Lüftung in Gebäuden

	1999	2010	2020
	Mio. t	Mio. t	Mio. t
Büro/Verwaltung (B/V)	8,4	7,7	6,9
Nichtwohngebäude ohne B/V	38,0	34,2	28,5
Gesamt	50	50	48

9.4 Energieeinsparpotenziale

9.4.1 Energieeinsparpotenziale und Entwicklungstrends zum Einsatz von RLT-Anlagen im Nichtwohnneubau

Mit einer Sättigung der gewerblichen Immobilienmärkte und neuen Anforderungen wie hoher Nutzungsflexibilität und hohem Nutzungskomfort sowie dem Einsatz moderner Kommunikationstechniken rücken die Nutzerakzeptanz und die Nutzerzufriedenheit in Nichtwohngebäuden in den Vorder-

grund. Es kommt weniger darauf an, zentral vorgegebene Luftzustände präzise einzuregeln, als individuelle Eingriffe durch den Nutzer zu ermöglichen, wie z.B. das Öffnen der Fenster. Die Betriebskosten von RLT-Anlagen gewinnen im Rahmen der sogenannten "Zweiten Miete" (stärker steigend als Grundmiete), verstärkt an Bedeutung.

Diehl und Schiller 1997 verweisen auf erhebliche Einsparpotenziale im Bestand und im Neubaubereich von RLT-Anlagen, betonen jedoch, dass gesetzliche Grundlagen und Anreize zur Erschließung bisher weitgehend fehlten. Schritte zur Erschließung bilden die Entwicklung von integrierten Simulations- und Planungsinstrumenten, die bereits in der Gebäudeentwurfsphase eingesetzt werden sollten. Auch die integrierte Planung und die Energiebilanzierung des Gebäudes unter Einbeziehung aller energierelevanten Anlagen, die grundsätzliche Möglichkeit gestalterische, bauphysikalische und anlagentechnische Energiesparmaßnahmen gegeneinander aufzurechnen, weisen den Weg.

Hohe Relevanz für den Einsatz der RLT haben architektonische Elemente und Konzepte wie z. B. der Einsatz von Glas oder Glasverbundkonstruktionen, wodurch ein höherer Kühlbedarf entsteht. Auch Doppelfassaden erfordern entsprechende mechanische Kühl- und Lüftungssysteme, jedoch werden hier verstärkt auch natürliche Kühl- und Lüftungskonzepte Anwendung finden. Die inneren Wärmelasten werden künftig eher konstant bleiben, trotz steigender Geräteausstattung, da energieeffizientere Geräte eingesetzt werden. Bedeutung gewinnen neue Konzepte zur Zuluftkonditionierung (Winter-Vorwärmung, Sommer –Kühlen) über Erdwärmetauscher (Bine 2/2000), kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung gegenüber Fensterlüftung, Verdunstungsbefeuchter zur Kühlung, Konditionierung mit Sorptionsregeneratoren (Desiccant Cooling) ohne konv. Kälteanlagen unter Einbeziehung von BHKW oder Solarwärme. Diese sind bereits wirtschaftlich einsetzbar (Diehl, Schiller, 1997).

Auch eine verstärkte Umluftnutzung durch eine bessere Aufbereitung (Reduktion der Keimzahl, Abbau von Kohlenwasserstoffen) der Abluft mit Luftionisation (Lehmann, 2001) oder UV-Bestrahlung ermöglichen eine Reduzierung der zu konditionierenden Frischluftmengen im Nichtwohnbereich.

Bezüglich der Raumklimatisierung haben sich bei den Nur-Luft-Systemen die Variabel-Volumenstromanlagen durchgesetzt. Mit Beginn der 90-iger Jahre fanden Kühldecken eine breite Anwendung und gegenwärtig vor allem Wasser-Luft-Induktionsanlagen. Energetisch günstig findet das Temperieren und Lüften somit in getrennten Systemen und mit geringen Volumina bei Wasser als Wärme- bzw. Kälteüberträgermedium bedarfsgerecht statt. Platzprobleme oder andere wirtschaftliche Probleme werden mit schwach induzierenden Decken- und Wandauslässen und Quell-/Mischlüftungsansätzen gelöst. Hiermit lassen sich Kompromisse zwischen Wirtschaftlichkeit, Raumluftqualität und thermischer Behaglichkeit finden (Diehl, Schiller, 1997). RLT werden zunehmend mit anderen Funktionen kombiniert (Beleuchtung, Steuer- und Regeltechnik, u.a.).

Auch die EnEV wird ihre Wirkung vor allem bei künftigen Verwaltungsgebäuden entfalten. (Knissel, 1999) geht davon aus, dass für ein klimatisiertes Standardbürogebäude im Mittel insgesamt 235 kWh/m²_{BGF} aufgebracht werden müssen, davon entfallen 31 kWh/m²_{BGF} auf Außenluftförderung sowie -konditionierung (RLT). Der Aufwand für Beheizung und Beleuchtung ist wesentlich höher. Der Auf-

wand für RLT sinkt künftig für klimatisierte Niedrigenergiebürogebäude auf 28 kWh/m², für klimatisierte Passivbürogebäude auf 20 kWh/m² und für Passivbürogebäude auf 11 kWh/m².

9.4.2 Energieeinsparpotenziale und Optimierungsmaßnahmen für bestehende RLT-Anlagen im Nichtwohnbereich

Für Nichtwohngebäude werden im Impulsprogramm NRW folgende allgemeine Maßnahmen zur Umsetzung effizienter Lüftungs- und Klimatisierungskonzepte aufgeführt:

- Bauliche, betriebliche und organisatorische Voraussetzungen schaffen zur Ermöglichung eines geringen Energieverbrauchs von Anlagen.
- Grundsätzliche Prüfung der Notwendigkeit der vorgesehenen Anwendung.
- Dimensionierungskriterien bedarfsgerecht festlegen, Verzicht auf unnötige Funktionen, überdimensionierte Anlagen und Komponenten, Wirkungsgradoptimierung von Komponenten.
- Bedarfsgerechte Regelung und Betrieb von Anlagen.
- Regelmäßige Messung der Betriebsparameter und Energieverbräuche durch Energiecontrolling.
- Regelmäßige Anlagenwartung, da die kumulierten Betriebskosten die Investition überschreiten.
- Beim Systemscheid grundsätzlich Gesamtkostenbetrachtungen vornehmen (VDI 2067).

Trotz aller Energieeinsparbemühungen darf nicht vergessen werden, dass insbesondere beim optimalen Einsatz der Lüftungs- und Klimatechnik das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen im Vordergrund jeglicher Maßnahmen steht.

Die größten Kostenfaktoren stellen nach (Diehl, Schiller, 1997) die Ventilatoren dar. In der Praxis treten verbreitet hohe Druck- und entsprechende Energieverluste durch minimierte Geräte- und Kanalquerschnitte und deren strömungstechnisch ungünstige Konstruktion infolge Platzmangel auf. Natürlichen Lüftungseinrichtungen wird demgegenüber ein großzügiges Bauvolumen zugestanden.

Weitere spezifische Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs von RLT-Anlagen vor allem im Bestand der Nichtwohngebäude sind (vgl. Energieagentur NRW, 2000):

- Entkopplung von Lufttransport (für notwendigen Luftwechsel und –qualität) und thermischer Konditionierung (Heizen, Kühlen über statische Systeme) entsprechend des personenbezogenen Luftbedarfs zur optimalen Anpassung des Luftvolumenstroms.
- Vermeidung von Schadstoffquellen und quellnahe Absaugung sowie Zuführung der Luft in Personennähe (Quelllüftung).
- Reduzierung der zu überwindenden Druckverluste (kleine Luftgeschwindigkeiten, Kanalform, Kanalquerschnitte, Disposition der Kanäle, keine unnötigen Prozessstufen, saubere Filter).
- Drehzahlvariable Steuerung der Ventilatoren und Antriebe (EC-Motoren für kleine Leistungen, Frequenz-Umrichter-geregelte Direktantriebe, Flachriemenantrieb bei konstanter Drehzahl).
- Einsatz von Hochleistungs-Radialventilatoren (rückwärtsgekrümmte Schaufeln, meist noch besserer Wirkungsgrad gegenüber Axialventilatoren).
- Filtertechnik und Abluftrecycling (Rezirkulation) sowie Umluftbeimischung, wenn möglich.

- Bedarfsgerechte Regelung der Lüftung/Klimatisierung der Räume entsprechend der Luftqualität (z.B. CO₂) und thermischen Behaglichkeit (Luftgeschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchte, Strahlungsanteil – vgl. DIN 1946/2) über entsprechende Sensoren.
- Bedarfsgerechte Konditionierung der Zuluft (Be- und Entfeuchtung, Reinigung, Erwärmen oder Kühlen) und Wärmerückgewinnung/Kälterückgewinnung.
- Anlagen mit Volumenströmen >2.000 m³/h sollten bedarfsabhängig betrieben werden.

9.4.3 Ausgesuchte branchenspezifische Einsparpotenziale für RLT in Nichtwohngebäuden

Im vorigen Kapitel wurden die Einsparmaßnahmen und –potenziale im Mittel aller Nichtwohngebäude mit dem Fokus auf Verwaltungsgebäuden abgebildet. In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen ausgesuchte branchenspezifische Werte für Nichtwohngebäude darzustellen.

In (Energieagentur NRW, 2000) werden Erfahrungswerte für technisch-wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale für bestehende Anlagen dargestellt, die durch verschiedene Fallstudien bestätigt werden können (Befragung von Ingenieurbüros, eigene Untersuchungen):

- Restaurants 30 bis 50 %
- Hörsäle 20 bis 50 %
- Großraumbüros
40 % der Personen im Mittel anwesend 20 bis 30 %
90 % der Personen im Mittel anwesend 3 bis 5 %
- Foyers, Schalter- und Kassenhallen,
Abfertigungsbereiche z.B.: Flughäfen 20 bis 60 %
Messehallen, Sporthallen 40 bis 70 %
- Versammlungsstätten, Konferenzräume,
Theater, Kinos 20 bis 60 %

Die Daten zeigen eine hohe Streubreite innerhalb der Branchen und Unterschiede im Branchenvergleich. Die Einspar- und Sanierungspotenziale liegen mit zunehmendem Baualter der Gebäude und RLT-Anlagen höher (vgl. Fitzner, 2000).

9.4.4 Zusammenfassung und Systematisierung der Potenziale

Zusammenfassung der Energie- und Emissionseinsparpotenziale für die Klimatisierung und Lüftung von Nichtwohngebäuden

Im folgenden werden die Energieeinsparpotenziale von RLT auf der Basis der vorangegangenen Kapitel tabellarisch zusammengefasst. Das wirtschaftlich erschließbare Potenzial liegt derzeit in einer Bandbreite von 50 bis 70% je nach Sektor und Gebäudetyp oder Einzelanwendung (vgl. Tabelle 9.4.4-1). Die Streubreite bezogen auf einzelne Anwendungen ist in diesen Fällen sehr groß. Insbesondere im Gewerbebereich aber auch beispielsweise bei Sporthallen, Messehallen sind hohe Potenziale vorhanden. Weiterhin weist der Bestand der Verwaltungsgebäude hohe wirtschaftlich erschließbare Einsparpotenziale auf. Der Investitionsaufwand hierfür ist jedoch erheblich und in Anbetracht der Immobilienmarktsituation sowie fehlender Haushaltsmittel der öffentlichen Hand ist ein län-

gerer Zeithorizont zu erwarten. Mittel- bis längerfristig werden die Potenziale für den Bestand geringer, weil die dazu kommenden Neuanlagen mit besserer Technik arbeiten als die Altanlagen. So verändert sich der Bereich bis 2020 auf 30 bis 50 %. Die Prozentzahlen sind auf den jeweiligen Gesamtbedarf für die Raumheizung bzw. Raumkonditionierung bezogen.

Das wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial beträgt 1999 rund 249 bis 349 PJ pro Jahr. Das Erwartungspotenzial bis 2010 beläuft sich auf 140 bis 234 PJ und bis 2020 auf insgesamt 125 bis 208 PJ. Dieser Rückgang resultiert maßgeblich aus der höheren Effizienz der Endenergieerzeugung (Strom, Wärme) und dem Einsatz effizienterer Lüftungs- und Klimatisierungstechnologien im Neubaubereich.

Das wirtschaftlich erschließbare CO₂-Minderungspotenzial auf der Basis der Verbrauchsstruktur von 1999 beträgt 23 bis 32 Mio. 2 CO₂ pro Jahr. Das Erwartungspotenzial bis 2010 beträgt 17 bis 25 Mio. t und bis 2020 insgesamt 11 bis 18 Mio. t. Dieser Rückgang resultiert maßgeblich aus der höheren Effizienz der Endenergieerzeugung (Strom, Wärme) und dem steigenden Anteil CO₂-neutraler regenerativer Energien an der Endenergieerzeugung (Strom, Wärme).

Tabelle 9.4.4-1: Zusammenfassung der Einsparpotenziale

		1999	2010	2020
Relatives Einsparpotenzial	%	50 - 70	40 - 60	30 - 50
Büro/Verwaltung (B/V)	PJ	45 - 63	34 - 50	22 - 37
Nichtwohngebäude ohne B/V	PJ	204 - 286	154 - 230	103 - 171
Gesamt	PJ	249 - 349	187 - 280	125 - 208
Büro/Verwaltung (B/V)	Mio. t	4 - 5	3 - 5	2 - 3
Nichtwohngebäude ohne B/V	Mio. t	19 - 27	14 - 21	9 - 14
Gesamt	Mio. t	23 - 32	17 - 25	11 - 18

Schätzung der derzeitigen Kosten und der Kostenentwicklungen der Einsparoptionen

Eine Anzahl von Maßnahmen (z.B. Reduzierung der Druckverluste, Luftvolumina, bedarfsgerechte Regelung, Drehzahlsteuerung der Antriebe) weist Amortisationszeiten von unter einem Jahr auf. Die Mehrzahl ist jedoch mit einer Amortisationszeit bis 5 Jahre realisierbar und sollte damit wirtschaftlich attraktiv sein. Die hohen wirtschaftlich realisierbaren Potenziale sind alle während der Nutzungsdauer einer Anlage von 10 bis 15 Jahren erschließbar. Viele Anlagen im Bestand weisen heute eine höhere Nutzungsdauer auf und verdeutlichen das hohe Sanierungspotenzial (Fitzner, 2000).

Hemmnisse und deren Beseitigung für die Erschließung der Einsparpotenziale

Grundsätzlich ist zunächst die Vermeidung von Klimatisierungs- und Lüftungsbedarf im Einzelfall zu prüfen. Große Potenziale sind im Gebäudebestand bei der Verringerung und optimalen Anpassung des Klimatisierungs- und Lüftungsbedarfs (erforderlicher Luftwechsel, Frischluftanteil u.a.) bei einzelnen Anlagen vorhanden. Ebenso sollte dem Nutzer die Funktions- und Betriebsweise seiner Anlage gründlich vermittelt werden. Dann erst sollten technische Optimierungsmaßnahmen bei bestehenden Anlagen ansetzen. Im Falle von Neuinstallationen ist das optimale technische Verfahren entsprechend Kosten/Nutzen für den Bedarf auszulegen. Bisher traten hierbei folgende Hemmnisse auf:

- Komplexität der Auswahl und Entscheidungen bzgl. Verfahrensauswahl.
- Investor/Nutzer Dilemma – verbreitet wird an den Investitionskosten für RLT gespart, was die Betriebskosten für die Nutzer später erhöht, RLT-Planer bisher vor allem an Investoren orientiert.
- Integration sowie optimale Bedarfsanpassung von RLT erfolgten zu spät im Bauplanungsprozess.
- Energieverbräuche und Betriebskosten für RLT waren bisher oft nicht transparent und sind nur schwierig zu erfassen (Strombedarf für Ventilatoren, Kälteanlage, u.a.; Wärmebedarf für Luftkonditionierung, Abgrenzung statische Heizung), daher geringe Erschließung der Potenziale.
- Spezifische Investitionskosten der Anlagentechnik insbesondere auch für WRG sind noch hoch, Energiekosten noch verhältnismäßig niedrig.
- Transaktionskosten für die Lösung der Intransparenzprobleme und Potenzialerschließung hoch, Informationsdefizite in Deutschland vorhanden.
- Unterschiedliche Sichtweisen und Kommunikationsdefizite bei Bau- und Betriebsprozessen
- Mangelnde Ausführungsqualitäten und schlechtes Image der "Klimaanlagen" (SBS – Sick Building Syndrom-Gesundheitsbeeinträchtigungen durch nicht optimale Betriebsweise und Auslegung von RLT, pauschale Energiesparversuche in Zeiten der Ölkrise).
- Überdimensionierung und konservative Planung von Anlagen vor allem im Bestand
- Mangelnde Ausnutzung natürlicher Energiepotenziale (z.B. Umwelt- und Erdwärme)

Mögliche Lösungsansätze für die Beseitigung der aufgeführten Hemmnisse sind:

- Spezialisierte Dienstleister für die Optimierung bestehender RLT Anlagen müssen sich noch stärker auf den Kundennutzen (Verdeutlichung der attraktiven Amortisationszeiten, Einsparpotenziale) fokussieren und auf die Erschließung der Einsparpotenziale konzentrieren - künftig "Behaglichkeits"-Contracting oder spezielle Dienstleistung im Rahmen Facility Management.
- Bedarfsgerechte Auslegung von RLT unter Nutzung modernster Simulations- und Optimierungsinstrumente und integrierter Planung.
- Konsequente Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien bei der Neuplanung und dem Betrieb.
- Verbesserung des Qualitätsmanagements für Neubau und Betrieb von Anlagen.
- Senkung von Transaktionskosten und Beseitigung von Intransparenzen durch staatliche Anreize und weitere Forschung im Bereich RLT im Sinne von Klimaschutz.
- Weitere Senkung der Investitionskosten für Neuanlagen und Komponenten bei gleichzeitig höherer Effizienz und Weiterentwicklung der Anlagentechnik.
- Verbesserung der Gebäudedichtheit und des Heizwärmebedarfs erfordert optimale Lüftungskonzepte, Umsetzung und Vollzugskontrolle.
- Aufstellung und Verschärfung der Energieeffizienzstandards für RLT (zulässige Luftgeschwindigkeiten, Druckverluste, u.a. – Orientierung an der Schweiz und Dänemark).

Literaturverzeichnis für Kapitel 9

Bine 2/2000; Informationsdienst 2/2000; Raumluftkonditionierung mit Erdwärmetauschern, Bonn

Diehl, J.; Schiller, H. (1997); Entwicklungsstand, neue Systeme, Trends in der RLT; HLH 48 Nr. 11

Energieagentur NRW (Herausgeber) (2000); Energieverschwendung – Handbuch zum rationellen Einsatz von elektrischer Energie; Essen 2000

Fitzner, K. (2000): Forschungsvorhaben Sanirev, Teilbericht TU-Berlin, Forschungszentrum Jülich
Haibel, M. (2001); Fachhochschule Biberach für Bauwesen und Wirtschaft, Tagungsreferat Raumlufttechnik und Energieeinsparung; Berlin 06/2001

GEMIS4: Gesamtemissionsmodell integrierte Systeme, www.oeko.de/servicegemis

Heinz, E. (1991): Stand der kontrollierten Wohnungslüftung in der Bundesrepublik Deutschland und zukünftige Entwicklung, Untersuchung im Auftrag Technomar GmbH, München

IKARUS (1995), Kolmetz, Ostermeier, Rouvel; Der Energiebedarf raumluftechnischer Anlagen in Nichtwohngebäuden, IKARUS-Projektbericht, Teilprojekt 5, Jülich

Impulsprogramm NRW; Leitfaden Industrie & Gewerbe; <http://www.ea-nrw.de/ravel/doc/index.htm>

Kleemann M. (2001): Die Entwicklung des Wärmemarkts in Deutschland bis 2050; Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 23; Jülich

Knissel J (1999); Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Bestellnr. 10/99,

Lehmann, J. (2001); LWH Helmstedt; Ionisation verbessert die Luftqualität – moderne Verfahren zur Luftreinigung und Energieeinsparung für Raum- und Abluft, Tagungsreferat Raumlufttechnik und Energieeinsparung; Berlin 06/2001

Leubner K. (2001): Energieeinsparpotenziale bei Lüftung und Klimatisierung für den Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude, im Auftrag des Forschungszentrums Jülich, RM Consult, Berlin

Müller C. (1998); Diplomarbeit Nr. 277, HRI für Heizung- und Klimatechnik, TU-Berlin, Berlin

Prognos (1999); Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt, im Auftrag des BMWT, Berlin, Basel

Recknagel H. Sprenger E. Schramek E.-R. (Herausgeber) (2000): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Ausgaben 81/82 und 2000, Verlag Oldenbourg, München

Richter, W. (2001): Energieeinsparung – Anforderungen aus EnEV; TU Dresden; Tagungsreferat Raumlufttechnik und Energieeinsparung; Berlin 06/2001

Richter, W. (2000); Die ESVO 2000 und ihre Konsequenzen für die Heiz- und Lüftungstechnik, erschienen in Haustechnik 2000, Bd. 18, Verlag Vulkan, Essen

10 Zusammenfassung der Potenziale

Bei der Potenzialermittlung wurde versucht, die gegenseitigen Abhängigkeiten soweit wie möglich zu berücksichtigen, so dass die ermittelten Einzelpotenziale zu einem Gesamtpotenzial addiert werden können. Dies setzt voraus, dass die Einzelpotenziale mit Prioritäten belegt werden, damit klar wird welches Potenzial zugunsten eines andern Potenzials verringert wird. Bezüglich der Reihenfolge der umzusetzenden Potenziale wurden folgende Prioritäten gesetzt:

- An erster Stelle stehen die Potenziale durch Verbesserung der Gebäudehülle (Zeilen 1, 2 und 3 in Tabelle 10-1). Es wurde unterstellt, dass diese Potenziale mit Priorität umgesetzt werden, weil sie am ehesten wirtschaftlich sind, weil sie am größten sind und weil sie direkt an der treibenden Größe, dem Nutzwärmededarf ansetzen und nicht am Endenergiebedarf wie die folgenden Technologien.
- Im zweiten Schritt werden dann die Einsparpotenziale der Technologien berücksichtigt (Zeilen 4 bis 9 in Tabelle 10-1). Dabei wurde darauf geachtet, dass es bei den Technologiepotenzialen möglichst zu keinen Überschneidungen kommt. So wurde z.B. bei den Brennwertkesseln angenommen, dass sie bestenfalls 70 % der Versorgung abdecken können. Der Rest wird durch andere Technologien wie z.B. BHKW, Biomassewandler etc. abgedeckt. Die Einsparpotenziale der Technologien sinken mit der Zeit, weil sich der Gesamtverbrauch aufgrund der Sanierungen verringert.
- Im dritten Schritt werden die Potenziale der regenerativen Energien geschätzt (Zeilen 11 und 12). Hier verringern sich die Erwartungspotenziale einerseits aufgrund der unterstellten Sanierungen und andererseits durch die konventionellen Technologien, wie z.B. Brennwertkessel, die wirtschaftlich überlegen sind.

Die in den vorstehenden Kapiteln geschätzten Potenziale sind in Tabelle 10-1 zusammengefasst. Es handelt sich um Endenergiepotenziale, die Brennstoff- und z.T. auch Stromanteile enthalten. Im Fall von Potenzialbereichen ist in Tabelle 10-1 immer der Mittelwert eingesetzt worden. Spalte A bezieht sich auf den Zeitraum bis 2020, B auf den Zeitabschnitt von 2020 bis 2050 und C gilt schließlich für den gesamten Zeithorizont von 1999 bis 2050. Die Zahlenwerte geben die jährlichen Einsparungen in PJ an. Sie beziehen sich immer auf das letzte Jahr der jeweiligen Periode. Die Werte in Spalte C sind die Summe der Werte in den Spalten A und B.

Aufgrund der unterstellten Sanierungstätigkeit im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich verringern sich die Potenziale einiger Maßnahmen bis 2050. Dies ist dann an den negativen Werten in Spalte B zu erkennen. Dies betrifft die Maßnahmen in den Zeilen 4 (BHKW), 11 (Verhaltensänderungen) und 12 (Optimierung Gesamtsystem). Für die Brennwertkessel (Zeilen 5 und 6) wurde angenommen, dass der Bestand in den nächsten 20 ausgetauscht ist und dass die Nutzungsgrade der Anlagen nach 2020 dann praktisch nicht mehr steigen. Deshalb ist das Einsparpotenzial in der Spalte B Null. Das Gleiche wird für die Lüftung und Klimatisierung in den Zeilen 8 und 9 angenommen.

Die beiden ersten Zeilen in Tabelle 10-1 zeigen, dass die Verbesserung der Gebäudehülle an Wohn- und Nichtwohngebäuden den weitaus größten Anteil an Einsparungen als Einzelmaßnahme hat. Bis 2020 sind es knapp 40 % und bis 2050 rund 70 %, bezogen auf die Summe in Zeile 13 ohne regenerative Energien.

Die Summe der Potenziale in Zeile 13 beträgt für 2020 1636 PJ und für 2050 2343 PJ. Bezogen auf den Gesamtverbrauch für Raumwärmebereitstellung, Lüftung und Klimatisierung in Wohn- und Nichtwohngebäuden von 3024 PJ betragen die Einsparraten 54 und 77 %.

Werden für die regenerativen Energien die in Kapitel 7 genannten Schätzungen in die Zeilen 14 und 15 als ein Erwartungspotenzial für den überschaubaren Zeitraum bis 2020 eingetragen, dann steigt die Einsparrate für 2020 auf 64 % an (Zeile 18). Die Erwartungspotenziale für die Solarthermie in Zeile 14 sind viermal höher als der heutige Beitrag dieser Technologie und im Fall von Biomasse in Zeile 15 ist der Beitrag rund 50 % höher als heute. Da ein Erwartungswert für regenerative Energien bis 2050 schwer zu schätzen ist, wurden in Tabelle 10-1 keine weiteren Werte eingetragen. Dabei ist unbestritten dass der Anteil regenerativen Energien weiter steigen wird, allerdings ist fraglich ob die hohen technischen Potenziale auch nur näherungsweise ausgeschöpft werden können.

Tabelle 10-1: Zusammenfassung der Entwicklung der Endenergiepotenziale

		A 1999-2020	B 2020-2050	C 1999-2050
1. Wärmetechn. Verbesserung der Hülle von Wohngebäuden	PJ	448	805	1253
2. Verbesserung der Hülle von Nichtwohngebäuden	PJ	165	232	397
3. Optimierung der Baugeometrie	PJ	2	1	3
4. BHKW zur Gebäudeversorgung	PJ	283	-121	163
5. Brennwärtekessel Wohngebäude	PJ	137	0	137
6. Brennwärtekessel Nichtwohngebäude	PJ	46	0	46
7. Energieträgerwechsel	PJ	0	0	0
8. Lüftung Klimatisierung Wohngebäude	PJ	30	0	30
9. Lüftung Klimatisierung Nichtwohngebäude	PJ	167	0	167
10. Zwischensumme	PJ	1277	918	2195
11. Verhaltensänderungen in Wohn- + Nichtwohngebäuden (8%)	PJ	125	-73	51
12. Optimierung Gesamtsystem (15 %)	PJ	234	-138	97
13. Summe (ohne regenerative Energien)	PJ	1636	706	2343
14. Einsparung bezogen auf Verbrauch von 1999	%	54	23	77
15. Wärmepumpen und solarthermische Wandler	PJ	19	?	?
16. Biomassewandler, Restenergienutzung	PJ	280	?	?
17. Summe (mit regenerative Energien)	PJ	1935	?	?
18. Relative Einsparung bezogen auf Verbrauch 1999	%	64	?	?
19. Erwartungspotenzial (Trendszenario nach Kleemann et al.)	%	15	18	33
20. Erwartungspotenzial (Reduktionszenario, Kleemann et al.)	%	28	32	60

Eine eindeutige Einordnung in die Kategorien „technisches Potenzial“, „wirtschaftliches Potenzial“ und „Erwartungspotenzial“ ist kaum möglich, weil die Abgrenzungen fließend sind und von zusätzlichen Bedingungen abhängen. Nach den Definitionen des Analyserasters ist das wirtschaftliche Potenzial eine Untermenge des technischen Potenzials. Das Erwartungspotenzial ist wegen der Wirkung von Hemmnissen in der Regel kleiner als die beiden vorgenannten Potenzialtypen.

In die Obermenge des technischen Potenzials passen die Angaben in Tabelle 10-1 auf jeden Fall. Bei einer betriebswirtschaftlichen bzw. einzelwirtschaftlichen Betrachtung ist der überwiegende Anteil dieser Potenziale aber als nicht wirtschaftlich einzustufen. Wird die Wirtschaftlichkeit unter volkswirt-

schaftlichen Kriterien bewertet, dann dürfte der überwiegende Teil der geschätzten Potenziale wirtschaftlich sein. Demnach handelt es sich um technisch-volkswirtschaftliche Potenziale.

Untersuchungen in Kleemann et al. 2000 zeigen, dass die in Tabelle 10-1 zusammengestellten Potenziale nur schwer umzusetzen sind. Werden die heutigen Trends ohne weiter verschärfte Klimaschutzanstrengungen fortgeschrieben, d.h. es erfolgt kein verbesserter Vollzug der Wärmeschutzverordnungen im Alt- und Neubaubereich, dann sind bis 2020 nur 15 % an Einsparung zu erwarten und bis 2050 nur ca. 33 % (Trendszenario in Zeile 19 von Tabelle 10-1). Einsparraten von 28 % bis 2020 und von 60 % bis 2050 (Zeile 20 in Tabelle 10-1) sind nur unter einer verschärften Klimaschutzpolitik zu erwarten, wobei u.a. Sanierungseffizienzen von 100 % umgesetzt werden und ein vollständiger Vollzug der Verordnungen ab sofort praktiziert wird. Dies ist eine der wesentlichsten Voraussetzung für das Erreichen der Klimaschutzziele.

Literatur für Kapitel 10

Kleemann M. (2001): Die Entwicklung des Wärmemarkts in Deutschland bis 2050; Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 23; Jülich

Anhang für Kapitel 4

Teil 1: Potenziale der vorhergehenden Enquete Kommission

Schulz, W., Traube, K., Salmen, H.-U.: Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausgas-minderung durch Kraft-Wärme-Kopplung zur Fern- und Nahwärmeversorgung (ABL und NBL) im Bereich Sied-lungs-KWK, Studienprogramm Hrsg. von der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Band 3 Energie, Teilband I, Economica Verlag 1995, S. 56 -63		
	2005	2020
Potentiale für Siedlungs-KWK ¹⁾ (ABL)	136 TWh _{th} 96 TWh _{el}	266 TWh _{th} (~ 51 % des gesamten Nutz-energiebedarfs) 214 TWh _{el}
Zusätzliches Potential für Siedlungs-KWK (ABL)	80 TWh _{th} 73 TWh _{el}	203 TWh _{th} 183 TWh _{el}
Potentiale für Siedlungs-KWK (NBL)	52 TWh _{th} 32 TWh _{el}	60 TWh _{th} (~ 44 % des gesamten Nutz-energiebedarfs) 45 TWh _{el}
Zusätzliches Potential für Siedlungs-KWK (NBL)	22 TWh _{th} 19 TWh _{el}	32 TWh _{th} 22 TWh _{el}
Potentiale für Siedlungs-KWK (Deutschland gesamt)	188 TWh _{th} 169 TWh _{el}	326 TWh _{th} 249 TWh _{el}
Zusätzliches Potential für Siedlungs-KWK (Deutschland gesamt)	102 TWh _{th} 91 TWh _{el}	235 TWh _{th} 205 TWh _{el}

1) Potentiale erfordern ein Abschalten noch nicht abgeschriebener Anlagen sowie die Erfüllung weiterer Randbedingungen (z.B. Verdrängung der Gasfeinverteilung). Bei Nichtvorliegen könnten 25% des Potentials bis zum Jahr 2020 verfügbar gemacht werden.

Bemerkungen:

Potentiale wurden auf Basis der Einteilung nach Siedlungstypen, Ortsklassen, Altersklassen etc. erhoben. Nähere Infos finden sich im Anhang der Studie. Unter Siedlungs-KWK werden Anwendungen in den Sektoren Haushalte und Kleinverbrauch zusammengefasst. Die Potentiale werden als volkswirtschaftlich kostenneutral ausschöpfbare Potentiale angesehen, sie sind somit sowohl technisches und wirtschaftliches Potential zugleich. /vgl. hierzu Lux, Thöne 1996/. Keine gesonderten BHKW-Angaben. Methodik kann nach Angaben des Autors (pers. Mitteilung 16.5.01) nicht auf BHKW übertragen werden.

Teil 2: Vergleich verschiedener Studien

Studie:	Starrmann, F.: Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in liberalisierten Energiemärkten. (Diss.) Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts Band 56, Oldenbourg Industrieverlag, München 2001
Motivation der Studie:	KWK im liberalisierten Markt, z.B. Verdopplung des KWK-Stromanteils, Förderung KWK notwendig ?
Zielsetzung:	Systematische Untersuchung der KWK im Zeichen der Liberalisierung, Möglichkeiten der Verdopplung des KWK-Stromanteils
Methodik:	Abbildung des Strommarktes bzw. des Kraftwerksparks (Deutschland und EU) mit Hilfe eines dynamischen linearen Optimierungsmodells
<i>Zeithorizont</i>	1998 (Ist), bis 2025 in Fünf-Jahresschritten
<i>Potentialerhebungen</i>	Exogene Vorgaben von Strom- und Wärmebedarf; Wärmebedarf wird nach Industrie, Siedlungs-KWK-Wärmebedarf und Objektversorgung unterschieden. KWK-Stromerzeugung wird unter Berücksichtigung des gesamten Kraftwerksparks unter kostenminimalen Kriterien berechnet. Ökologische Bewertung der KWK-Wärme geschieht mit Hilfe exogener Vorgaben nach Restwertmethode
<i>Wesentliche Ergebnisse</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition verschiedener Szenarien ▪ KWK-Stromerzeugung wird zukünftig mittel- bis langfristig zulegen ohne Förderung durch den Ersatz veralteter KWK-Anlagen durch GUD-KWK auf Basis von Erdgas ▪ Objektversorgung wird mittel- und langfristig keine Rolle spielen
<i>Bemerkungen</i>	Objektversorgung und Siedlungs-KWK sind nicht zentraler Punkt der Analyse. Schwerpunkt der Studie: Groß-KWK und Kraftwerkspark. Potentialangaben sind nicht hinreichend aufgelöst.

Studie:	Gailfuß, M.: CO ₂ -Minderungspotentiale durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland, Peter Lang GmbH, Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt a. M. 1998
Motivation der Studie:	BHKW als CO ₂ -Minderungsmöglichkeit
Zielsetzung:	Systematische Untersuchung des Einsatzes von BHKW sehr detailliert differenziert nach Industriebranchen und Anwendungen
Methodik:	Auswertung vieler Studien, daran aufbauend eigene Einschätzungen und Hochrechnungen
Zeithorizont	1995 (Ist), Potentiale für 2010
Potentialerhebungen	Sehr detaillierte Potentialangaben für jeweilige Anwendungsfälle, Abschätzungen zum Nahwärmebereich für Deutschland basieren auf Studie von /Nitsch 1994/, die für Baden-Württemberg angefertigt und vom Autor auf Deutschland hochgerechnet wurde. Über die Methodik und Annahmen werden keine Aussagen gemacht.
Wesentliche Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Größtes Potential bei der kommunalen Versorgung liegt im Nahwärm ebereich
Bemerkungen	Nach heutiger Einschätzung des Autors sind die Nahwärmepotentiale überschätzt (persönl. Mitteilung vom 16.5.2001)

BHKW-Potential bei der Nahwärmeversorgung für 2010 , S. 162				
Objekte	Ausschöpfungsrate	Anlageleistung In kWel	Anlagenzahl	Gesamtleistung In MWel
Nahwärmeinsel Wohngebäude	30%	150	1500	225
Neubaugebiet	50%	300	1650	495
Altbauquartier	50%	400	2350	940
Altbauquartiere/ Gewerbegebiete	10%	400	300-350	120-140
Nahwärmeinsel Stadtzentrum	80%	1200	7000 - 7100	3430-3480
Gewerbegebiet	80%	400		
Nahwärmeinsel Wohngebäude	80%	192		
Gesamt			12800 – 12950	5210 - 5280

Studie:	Altner, G., Dürr, H.-P., Michelsen, G.: Zukünftige Energiepolitik Phase II, Studie im Auftrag der Niedersächsischen Energieagentur, November 1998
Motivation der Studie:	Verdopplung des KWK-Stromanteils
Zielsetzung:	Erarbeitung eines Sofortprogramms für den Vorrang von rationeller Energienutzung und regenerative Energiequellen.
Methodik:	Keine Modellbetrachtung, keine Szenarien. Ausgehend von Zielwerten werden diese auf die Technologien bzw. Maßnahmen projiziert und entsprechende Förderkonzepte vorgeschlagen.
Zeithorizont	2010
Potentialerhebungen	Literaturlauswertung, keine originäre Erarbeitung von Nahwärmepotentialen, keine differenzierte wärmeseitige Betrachtung, lediglich Angabe von Stromerzeugungspotentialen
Wesentliche Ergebnisse	<p>Bis zum Jahr 2010:</p> <p>Theoretisch technisches Potential für BHKW: 40 - 64TWh_{el}</p> <p>Technisches/ wirtschaftliches Potential für Siedlungs-KWK: 21,6 - 36 TWh_{el}</p> <p>Bei Verbesserung der Einspeisevergütung: 35,2 - 60TWh_{el}</p> <p>Aus der Studie geht nicht hervor, ob die Angaben lediglich Nahwärmepotentiale (Wohngebäudebereich) oder auch Objektversorgungen beinhalten.</p>
Bemerkungen	Potentialzahlen wurden auf der Basis verschiedener älterer Studien geschätzt. Teilweise handelt es sich hierbei um bundeslandspezifische Betrachtungen, die für die gesamte Bundesrepublik Deutschland hochgerechnet wurden. Zur Art und Weise der Hochrechnung werden keine Angaben gemacht

Nitsch, J., Langniß, O.: Erneuerbare Energien – Potentiale und Perspektiven. Beitrag im Rahmen der Konferenz „Energiewende jetzt!“ Bundestagsfraktion Bündnis 90/die Grünen, Berlin, 30./31.10. 1999 Berlin S. 3	
	2010
Gesamten KWK-Strompotential	200 TWh _{el}
Davon entfallen auf	
Industrie	80 TWh _{el}
Große öffentl. KWK	55 TWh _{el}
Öffentl. u. private KWK	65 TWh _{el}

Bemerkungen: Strompotentiale basieren auf wärmeseitige Potentialangaben. Diese wiederum wurden basierend auf einer Studie für Baden-Württemberg /Nitsch 1994/ auf die Bundesrepublik hochgerechnet. Über die Art und Methodik der Hochrechnung werden keine Angaben getroffen. Keine Angabe von Wärmepotentialen.

Studie:	Müsgens, F.; Schulz, W.; Starrmann, F.: Kurzexpertise zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung. Kurzexpertise im Auftrag des BMWi, Januar 2000
Motivation der Studie:	Verdopplung des KWK-Stromanteils
Zielsetzung:	Ökonomischer und ökologische Bewertung von KWK-Optionen im Systemzusammenhang des gesamten Kraftwerksparks
Methodik:	Modellrechnungen mit Hilfe eines linearen Optimierungsmodells
Zeithorizont	1998 bis 2020
Potentialerhebungen	Stromseitige Bounds, daraus ermittelt wird die Wärmeproduktion, die dann mit einem bundesweiten Wärmepotenzial verglichen wird, das auf der Basis der Nitsch-Studie von 1994 erhoben wurde.
Wesentliche Ergebnisse	Gerechnet wurde ein Basisszenario und zwei KWK-Ausbauszenarien, in denen eine Verdopplung der KWK-Stromerzeugung vorgegeben wird. Während im ersten Ausbauszenario die Verdopplung sowohl durch Groß- und Klein-KWK-Anlagen möglich ist, berücksichtigt das zweite Ausbauszenario lediglich den Ausbau von Klein-KWK-Anlagen
Bemerkungen	Rahmendaten stammen aus Prognos/EWI 1999-Gutachten

<i>Ergebnisse bezüglich Nahwärme (Szenario II)</i>	Wärmepotential ¹⁾ BRD gesamt bis 2020	Ausgeschöpftes Wärmepotential Basisszenario 2020	Ausgeschöpftes Wärmepotential Zubauszenario I 2020	Ausgeschöpftes Wärmepotential Zubauszenario II 2020
BHKW I	163.1 TWh	2.15 TWh	7.2 TWh	34.55 TWh
BHKW II	13.9 TWh	2.8 TWh	9 TWh	9 TWh
BHKW III	74.2 TWh	3.92 TWh	17.7 TWh	44.5 TWh
Summe	251.2 TWh	8.87 TWh	33.9 TWh	88.05 TWh
Äquiv. BHKW-Stromprod.		17.4 TWh _{el}	17.4 TWh _{el} 5% BHKW I 9% BHKW II 21 % BHKW III	50.7 TWh _{el} 30% BHKW I 9% BHKW II 61% BHKW III
BHKW I: Objektversorgungen: Mehrfamilienhaus und Bürogebäude				
BHKW II: Objektversorgungen größerer Einheiten: Hallenbad/ Krankenhaus/Schulzentrum				
BHKW III: Aufbau einer Nahwärmeversorgung				

- 1) Wärmepotentiale wurden auf der Basis der von /Nitsch et al. 1994/ für Baden-Württemberg durchgeführten Studie erhoben, indem auf die Bundesrepublik Deutschland hochgerechnet wurde. Über die Methodik und Einzelannahmen werden keine Angaben gemacht.

Studie:	Dienhart, H.; Langniß, O.: Perspektiven des BHKW-Einsatzes im Wohngebäudebereich – eine wirtschaftliche und energetische Bewertung. Langfassung des Beitrages für „Die Wohnungswirtschaft“, Nov./Dez. 1997, www.dlr.de
Motivation der Studie:	CO ₂ -Minderung durch BHKW-Einsatz im Nahwärmebereich, Hemmnisse, Betreibermodelle
Zielsetzung:	Ökonomischer und ökologische Bewertung von KWK
Methodik:	Setzen von Verteilungsschlüsseln, grobe Überschlagsrechnung, Annahme: Verstärkte Wärmedämmung, die zu einer Reduktion des Wärmebedarfs um 20% gegenüber der /Prognos 1996 /– Entwicklung führt. 70% der Mehrfamilienhäuser (außerhalb der FW-Versorgung) und 70% der Neubauten von EFH/ZFH in geschlossenen Neubaugebieten werden mit BHKW versorgt. Hieraus resultiert ein technisch-strukturelles BHKW-Wärmepotential von 94 TWh Nutzwärme. (MFH ca. 70 TWh, EFH/ZFH ca. 24 TWh) Ausgehend von drei BHKW-Systemvarianten wird über Verteilungsschlüssel und den entsprechenden technischen Daten auf die Stromerzeugung zurück gerechnet.
Zeithorizont	2020
Potentialerhebungen	Techn. strukturelles Potential: 94 TWh Nutzwärme, 36.6 TWh Elektrizität, 151.4 TWh Brennstoffverbrauch
Wesentliche Ergebnisse	Techn. strukturelles Potential
Bemerkungen	Rahmendaten gemäß /Prognos 1996/: Wohnflächenentwicklung, Brennstoffverbrauch etc.

Technologie	Anteil an Nutzwärme	Nutzwärme (TWh)	Elektrizität (TWh)	BHKW Leistung (MWel)
1 x 12 kWel großes MFH	20%	18.8	4.7	2256
3 x 50 kWel Nahwärme	50%	47	18.8	3525
2 x 400 kWel Nahwärme	30%	28.2	13.2	2256
Summe	100 %	94	36.6	8037