

Forschungsbericht

**Ökonomische und
ökologische
Bewertung der
elektrischen
Wärmepumpe im
Vergleich zu anderen
Heizungssystemen**

B. Leven, J. Neubarth, C. Weber

Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen

Projekt gefördert von der
Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg

B. Leven, J. Neubarth, C. Weber

Mai 2001

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Voß

ISSN 0938-1228

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Verzeichnis der Abkürzungen und Indizes.....	VII
Kurzfassung.....	XI
Abstract.....	XII
1 Einleitung.....	1
2 Technologie.....	3
2.1 Wärmepumpe	3
2.1.1 Kompressionswärmepumpen	3
2.1.2 Sorptionswärmepumpen.....	6
2.2 Wärmequelle.....	8
2.2.1 Erdreich	8
2.2.2 Grundwasser.....	10
2.2.3 Außenluft.....	11
2.3 Betriebsweise.....	12
3 Marktsituation	15
3.1 Wärmepumpenmarkt in Deutschland, Österreich und der Schweiz.....	15
3.1.1 Neuinstallationen und Bestand von Heizungswärmepumpen.....	15
3.1.2 Verwendete Wärmequellen von Heizungswärmepumpen	18
3.1.3 Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen.....	19
3.2 Angebot an Wärmepumpen	21
3.2.1 Methodik der Herstellerbefragung	21
3.2.2 Allgemeine Ergebnisse.....	21
3.2.3 Wärmequelle Luft	23
3.2.4 Wärmequelle Erdreich mit Solekreislauf.....	24
3.2.5 Wärmequelle Erdreich mit Direktverdampfung.....	25
3.2.6 Wärmequelle Wasser	26
4 Versorgungsaufgaben und Versorgungssysteme.....	29
4.1 Definition der Versorgungsaufgaben.....	29
4.1.1 Auswahl der Gebäude	29
4.1.2 Normheizlast und Heizwärmebedarf der Gebäude	36
4.1.3 Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung.....	40
4.2 Definition der Versorgungssysteme.....	42
4.2.1 Auswahl der Versorgungssysteme	42
4.2.2 Aufwandszahlen der Raumwärmebereitstellung.....	45

4.2.3	Aufwandszahlen der Trinkwassererwärmung	48
4.2.4	Hilfsenergiebedarf der Versorgungssysteme	49
5	Ökologische Analyse	51
5.1	Methodik der Ökobilanzierung	51
5.1.1	Vorgehensweise nach EN ISO 14040	51
5.1.2	Betrachtete Wirkungskategorien	53
5.1.3	Ermittlung der Sachbilanzgrößen	56
5.2	Ergebnisse	60
5.2.1	Endenergiebedarf	60
5.2.2	Bedarf an erschöpflichen Energieträgern	61
5.2.3	Beitrag zum Treibhauseffekt – CO ₂ -Äquivalent-Emissionen	67
5.2.4	Versauerungspotenzial - SO ₂ -Äquivalent-Emissionen	70
5.3	Zusammenfassung der ökologischen Analyse	73
6	Ökonomische Analyse	75
6.1	Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung	75
6.2	Kapitalgebundene Kosten	76
6.2.1	Investitionskosten	76
6.2.2	Annuität der kapitalgebundenen Kosten	80
6.3	Bedarfsgebundene Kosten	80
6.3.1	Energiepreise	81
6.3.2	Jährliche bedarfsgebundene Kosten	83
6.4	Betriebsgebundene Kosten	83
6.5	Vollkostenvergleich	84
6.5.1	Gesamtannuität aller Kosten	84
6.5.2	Wärmegestehungskosten	87
6.6	Zusammenfassung der ökonomischen Analyse	89
7	Schlussbetrachtung	91
	Literaturverzeichnis	95
	Anhang A: Fragebogen für die Herstellerbefragung	103
	Anhang B: Nutzungsgrade und Arbeitszahlen von Heizungssystemen	109
	Anhang C: Endenergiebedarf der Gebäude	111
	Anhang D: Daten zur ökologischen Analyse	117
	Anhang E: Daten zur ökonomischen Analyse	121
	Anhang F: Liste der Hersteller und Bohrunternehmen	141

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Schema einer Kompressionswärmepumpe	4
Abb. 2-2:	Wärmepumpenprozess einer Absorptionswärmepumpe	7
Abb. 2-3:	Verlegemuster horizontaler Wärmetauscher	9
Abb. 2-4:	Prinzipschema einer Grundwasser-Wärmepumpenanlage	11
Abb. 3-1:	Neuinstallationen von Heizungswärmepumpen in Deutschland, Österreich und der Schweiz.....	16
Abb. 3-2:	Wärmepumpen-Heizungen mit Wärmeleistungen unter 20 kW in Einfamilienhaus-Neubauten in der Schweiz.....	17
Abb. 3-3:	Art der Beheizung von Neubauten (1998) und im Gebäudebestand (1993) in Deutschland	17
Abb. 3-4:	Anteil der genutzten Wärmequellen von neuinstallierten Wärmepumpen-Heizungsanlagen in Deutschland, Österreich und der Schweiz	18
Abb. 3-5:	Anteile verschiedener Kraftwerkstypen an der Stromerzeugung in Deutschland, Österreich und der Schweiz (ohne Außenhandel)	20
Abb. 3-6:	Leistungszahlen von Luft-Wasser-Wärmepumpen.....	23
Abb. 3-7:	Leistungszahlen von Sole-Wasser-Wärmepumpen	25
Abb. 3-8:	Leistungszahlen von Erdreich-Direktverdampfungs-Wärmepumpen	26
Abb. 3-9:	Leistungszahlen von Wasser-Wasser-Wärmepumpen.....	27
Abb. 4-1:	Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes EFH 95	31
Abb. 4-2:	Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes MFH 95	33
Abb. 4-3:	Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes EFH 80	34
Abb. 4-4:	Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes MFH 80	35
Abb. 5-1:	Aufbau einer Ökobilanz nach EN ISO 14040	52
Abb. 5-2:	Aufbau einer Prozesskettenanalyse	57
Abb. 5-3:	Energieträgeranteile am Kraftwerksmix Deutschland - Bereitstellung elektrischer Energie (öffentliche Versorgung) 1997 und 1998	60
Abb. 5-4 :	Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das EFH 95	62
Abb. 5-5:	Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das MFH 95	62
Abb. 5-6:	Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das EFH 80	63
Abb. 5-7:	Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das MFH 80.....	63
Abb. 5-8:	Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das EFH 95	65
Abb. 5-9:	Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das MFH 95.....	65
Abb. 5-10:	Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das EFH 80	66
Abb. 5-11:	Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das MFH 80	66
Abb. 5-12:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 95.....	68
Abb. 5-13:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 95	69
Abb. 5-14:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 80.....	69
Abb. 5-15:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 80	70
Abb. 5-16:	SO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 95	71

Abb. 5-17:	SO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 95	71
Abb. 5-18:	SO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 80	72
Abb. 5-19:	SO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 80	72
Abb. 6-1:	Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das EFH 95 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)	78
Abb. 6-2:	Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das MFH 95 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)	78
Abb. 6-3:	Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das EFH 80 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)	79
Abb. 6-4:	Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das MFH 80 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)	79
Abb. 6-5:	Entwicklung der Preise von Gas und flüssigen Brennstoffen für Haushalte in Deutschland.....	81
Abb. 6-6:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das EFH 95	84
Abb. 6-7:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das MFH 95	85
Abb. 6-8:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das EFH 80	85
Abb. 6-9:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das MFH 80	86
Abb. 6-10:	Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das EFH 95	87
Abb. 6-11:	Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das MFH 95.....	88
Abb. 6-12:	Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das EFH 80.....	88
Abb. 6-13:	Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das MFH 80.....	89
Abb. 7-1:	Ökologische/ökonomische Analyse der Wärmegestehungskosten und der CO ₂ - Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 95	92
Abb. 7-2:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme in Abhängigkeit des Strommix am Beispiel des EFH 95.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht über Kältemittel /LGA 2000a/ und /VDI 4640-1 1998/.....	5
Tabelle 4-1:	Auswahl der Versorgungsaufgaben.....	30
Tabelle 4-2:	Wärmetechnische Daten des Gebäudes EFH 95	31
Tabelle 4-3:	Wärmetechnische Daten des Gebäudes MFH 95	33
Tabelle 4-4:	Wärmetechnische Daten des Gebäudes EFH 80	34
Tabelle 4-5:	Wärmetechnische Daten des Gebäudes MFH 80	35
Tabelle 4-6:	Normheizlast der zu untersuchenden Gebäude.....	36
Tabelle 4-7:	Unterschiede zwischen den Rechenverfahren nach WSV 95 und DIN EN 832	37
Tabelle 4-8:	Wesentliche Eingabegrößen zur Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs	38
Tabelle 4-9:	Eingabegrößen für die Lüftungssysteme des Gebäudes MFH 95	39
Tabelle 4-10:	Jahresheizwärmebedarf der betrachteten Gebäude	40
Tabelle 4-11:	Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung der Versorgungsaufgaben.....	42
Tabelle 4-12:	Übersicht über die untersuchten Versorgungssysteme für die Versorgungsaufgaben EFH 95 und MFH 95	46
Tabelle 4-13:	Übersicht über die untersuchten Versorgungssysteme der Versorgungsaufgaben EFH 80 und MFH 80	46
Tabelle 4-14:	Aufwandszahlen für die Wärmeübergabe	47
Tabelle 4-15:	Aufwandszahlen für die Verteilung der Systeme	47
Tabelle 4-16:	Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl sowie Aufwandszahlen der Wärmeerzeuger für Raumwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung	49
Tabelle 5-1:	Gewichtungsfaktoren zur Berechnung des Treibhauseffektes in CO ₂ - Äquivalent-Emissionen.....	55
Tabelle 5-2:	Gewichtungsfaktoren zur Berechnung der Versauerung in SO ₂ -Äquivalent- Emissionen.....	55
Tabelle 6-1:	Systemkomponenten der Versorgungssysteme.....	76
Tabelle 6-2:	Entwicklung der Öko- und Mehrwertsteuer in Deutschland (Stand: März 2000).....	81
Tabelle 6-3:	Energiepreise für die Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten.....	82
Tabelle B-1:	Nutzungsgrade bzw. Jahresarbeitszahlen von Heizsystemen.....	109
Tabelle C-1:	Endenergiebedarf des EFH 95	112
Tabelle C-2:	Endenergiebedarf des MFH 95	113
Tabelle C-3:	Endenergiebedarf des EFH 80	114
Tabelle C-4:	Endenergiebedarf des MFH 80.....	115
Tabelle D-1:	Bedarf an erschöpflichen Energieträgern	117
Tabelle D-2:	CO ₂ -Äquivalent-Emissionen.....	118
Tabelle D-3:	SO ₂ -Äquivalent-Emissionen	119
Tabelle E-1:	Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 95	121
Tabelle E-2:	Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 95	126
Tabelle E-3:	Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 80	131
Tabelle E-4:	Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 80.....	133

Tabelle E-5:	Stromtarif für die Versorgung von Wärmepumpen	135
Tabelle E-6:	Kosten für Wartung und Reinigung der Versorgungssysteme	137
Tabelle E-7:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme des EFH 95	138
Tabelle E-8:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme des MFH 95	138
Tabelle E-9:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme des EFH 80	139
Tabelle E-10:	Gesamtannuität der Versorgungssysteme des MFH 80	139
Tabelle E-11:	Wärmegestehungskosten der Versorgungssysteme	139
Tabelle F-1:	Hersteller von Heizungswärmepumpen in Deutschland	141
Tabelle F-2:	Bohrunternehmen in Deutschland	142

Verzeichnis der Abkürzungen und Indizes

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
λ	Luftwechsel	h^{-1}
A	Wärmeübertragende Umfassungsfläche	m^2
a	Annuitätsfaktor	-
A/V	Verhältnis der wärmeübertragenden Umfassungsfläche A zum hiervon eingeschlossenen Bauwerksvolumen V	m^{-1}
A/W	Luft-Wasser (air/water)	
A_0	Investitionskosten	DM
$A_{1,2,\dots}$	Barwert der ersten, zweiten, ... Ersatzbeschaffung	DM
$A_{B,K}$	Annuität der betriebsgebundenen Kosten	DM/a
A_N	Gesamtannuität	DM/a
$A_{N,K}$	Annuität der kapitalgebundenen Kosten	DM/a
$A_{V,K}$	Annuität der bedarfsgebundenen Kosten	DM/a
B/W	Sole-Wasser (brine/water)	
ba_B	Preisdynamischer Annuitätsfaktor der betriebsgebundenen Kosten	-
ba_{IN}	Preisdynamischer Annuitätsfaktor der Instandsetzungszahlungen	-
ba_V	Preisdynamischer Annuitätsfaktor der bedarfsgebundenen Kosten	-
b_B	Barwertfaktor für betriebsgebundene Kosten	-
b_{IN}	Barwertfaktor für Instandsetzungszahlungen	-
b_K	Barwertfaktor für kapitalgebundene Kosten	-
b_K	Preisdynamischer Annuitätsfaktor der kapitalgebundenen Kosten	-
b_V	Barwertfaktor für bedarfsgebundene Kosten	-
BWK	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Kollektor	
BWS	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Sonde	
E	Aufwandszahl	-
e_1	Aufwandszahl für Wärmeübergabe	-
$e_{1,TW}$	Aufwandszahl für Verteilung (TWE)	-
e_2	Aufwandszahl für Verteilung	-
$e_{2,TW}$	Aufwandszahl für Erzeugung (TWE)	-

Formel- zeichen	Bedeutung	Einheit
e_3	Aufwandszahl für Erzeugung	-
EFH	Einfamilienhaus	
e_{TW}	Aufwandszahl Trinkwassererwärmung (TWE)	-
FBH	Fußbodenheizung	
f_K	Faktor für Instandsetzung	%
G	Gas	
G-BW	Gas-Brennwert	
GDP	(Global Warming Potential), Treibhauspotenzial bei einem Zeithorizont von 100 Jahren, Referenz CO ₂ mit dem GWP-Wert von 1	
G-NT	Gas-Niedertemperatur	
HP	Holzpellet	
IWU	Institut Wohnen und Umwelt (Darstadt)	
MA	Massivabsorber	
MFH	Mehrfamilienhaus	
n	Anzahl der Ersatzbeschaffungen	-
n_p	Statistische Belegungszahl	-
ODP	(Ozone Depletion Potential), Ozonabbaupotenzial, Referenz: R 11 mit dem ODP-Wert von 1	
P_B	Brennstoffpreis	DM/kWh
PHK	Plattenheizkörper	
P_S	Strompreis	DM/kWh
q	Aufzinsungsfaktor	%
Q_0	Wärmezufuhr	kWh/a
$Q_{ED,R}$	Endenergiebedarf zur Raumwärmebereitstellung	kWh/a
$Q_{ED,TW}$	Endenergiebedarf zur Trinkwassererwärmung	kWh/a
Q_H	Heizwärmebedarf	kWh/a
Q_{H^*}	Heizwärmebedarf bezogen auf die Gebäudenutzfläche	kWh/(m ² a)
$Q_{N,a}$	Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung	kWh/a
$q_{N,Ges,a}$	Personenbezogener Gesamt-Nutzenergiebedarf für die TWE	kWh/a

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
Q_S	Hilfsenergie	kWh/a
r_B	Preisänderungsfaktor der betriebsgebundenen Kosten	-
r_{IN}	Preisänderungsfaktor der Instandsetzungszahlungen	-
r_K	Preisänderungsfaktor der kapitalgebundenen Kosten	-
r_V	Preisänderungsfaktor der bedarfsgebundenen Kosten	-
R_w	Restwert	DM
T	Betrachtungszeitraum	a
T	Temperatur	°C
T_N	Rechnerische Nutzungsdauer	a
TRY	Testreferenzjahr	
TWE	Trinkwassererwärmung	
u	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
V	Bauwerksvolumen	m ³
W/W	Wasser-Wasser (water/water)	
Wp	Wärmepumpe	
WPZ	Wärmepumpen Test- und Ausbildungszentrum (Töss)	
WSVO	Wärmeschutzverordnung	

Kurzfassung

In dieser Studie werden unterschiedliche Wärmepumpen-Heizungsanlagen im Vergleich zu anderen Heizungssystemen anhand ökologischer und ökonomischer Kenngrößen bewertet. Einleitend erfolgt eine Beschreibung wesentlicher technologischer Merkmale von Wärmepumpenanlagen sowie eine Analyse des aktuellen Wärmepumpenmarktes und des Stands der Technik.

Die Marktrecherchen zeigen als wesentliches Ergebnis, dass in Deutschland derzeit nur etwa 2 % der Neubauten mit Wärmepumpenheizungen ausgestattet sind. Vergleicht man dies mit anderen Ländern wie der Schweiz, wo 35 % der neugebauten Einfamilienhäuser mit Wärmepumpen ausgestattet werden, so lässt sich ein sehr großes Marktpotenzial für Wärmepumpen-Heizungsanlagen in Deutschland ableiten. Die zur Ermittlung des Stands der Technik von Wärmepumpenanlagen durchgeführte Herstellerbefragung zeigt, dass ein breites Angebot an Wärmepumpen in Deutschland vorhanden ist, das kontinuierlich weiterentwickelt wird. Die technische Weiterentwicklung wird u. a. in einer höheren Effizienz von Wärmepumpenanlagen und im Ausstieg aus der Anwendung von umweltschädigenden chlorierten Kältemitteln sichtbar.

Der ökologische und ökonomische Vergleich von Wärmepumpen-Heizungsanlagen mit anderen Systemen zur Raumwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung wird für vier ausgewählte Versorgungsaufgaben im Neu- und Altbereich durchgeführt. Als Versorgungssysteme werden hierbei Wärmepumpenanlagen mit den Wärmequellen Erdreich, Grundwasser und Außenluft sowie konventionelle öl- und gasbefeuerte Anlagen und Holzpellet-Systeme betrachtet. Die ökologische Betrachtung der untersuchten Versorgungssysteme erfolgt anhand von Lebenswegbilanzen für den Endenergiebedarf, den Bedarf an erschöpflichen Energieträgern sowie für die CO₂- und SO₂-Äquivalent-Emissionen. Die ökonomische Analyse wird anhand der Annuitäten bzw. jährlichen Kosten sowie der Wärmegestehungskosten der einzelnen Versorgungssysteme durchgeführt.

Bei dieser ökologischen und ökonomischen Analyse zeigt sich, dass Wärmepumpen-Systeme niedrigere CO₂-Äquivalent-Emissionen als ölbefeuerte Systeme aufweisen. Wird als Wärmequelle das Erdreich oder Wasser verwendet, so sind die CO₂-Äquivalent-Emissionen der Wärmepumpenanlagen auch niedriger als bei gasbefeuerten Anlagen. Hinsichtlich der SO₂-Äquivalent-Emissionen liegen die Wärmepumpen-Systeme geringfügig über den gasbeheizten Systemen, jedoch deutlich unter denen der Ölheizung und Holzpelletsysteme, die die höchsten SO₂-Äquivalent-Emissionen aufweisen. Die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen-Systeme liegen etwa im Bereich der ölbefeuerten Anlagen. Im Vergleich zu gasbefeuerten Systemen sind sie jedoch tendenziell höher. Holzpellet-Systeme weisen zwar die mit Abstand niedrigsten CO₂-Äquivalent-Emissionen auf, jedoch sind ihre Wärmegestehungskosten deutlich höher als bei den anderen untersuchten Systemen.

Abstract

In this study the ecological and economic characteristics of different heat pump systems are compared with other heating systems. The report starts with a description of substantial technological heat pump features followed by an analysis of the current heat pump market and the state of the art of heat pumps in Germany.

One substantial result of the conducted market research shows that in Germany at present only about 2 % of newly built single family houses are equipped with heat pump systems. Compared to other countries, e. g. Switzerland, where 35 % of the newly built single family houses are equipped with heat pumps, a very large market potential for heating systems based on heat pumps in Germany can be deduced. To evaluate the state of the art of heat pump systems a survey has been carried out at manufacturers. The results indicate that a variety of heat pumps are available on the German market which are in a continuous process of technical development. Among others these technical advancements are shown in a higher efficiency of heat pump systems and in the substitution of chlorinated refrigerants by environmentally friendly refrigerants.

The ecological and economic comparison of heating systems is carried out for four selected supply tasks (two newly erected and two old buildings). The following supply systems have been considered: Heat pump systems with soil, groundwater and air as heat sources and heating systems based on the fuels oil, natural gas and wood pellets. The ecological analysis of the examined supply systems is carried out on the basis of an life cycle assessment (LCA). The results of this assessment are exemplarily shown with the final energy consumption, the consumption of non-renewable fossil fuels and the CO₂- and SO₂-equivalent-emissions. The economic analysis is executed on the basis of annuities and heat production costs of the selected supply systems.

Heat pump systems show lower CO₂-equivalent-emissions - as a measure for the contribution to the greenhouse effect - than fuel oil systems and comparable CO₂-equivalent-emissions as gas-fired systems. In comparison, the SO₂-equivalent-emissions of heat pump systems are slightly higher than gas-fired systems but significantly lower than oil-fired and wood pellet systems which show the highest SO₂-equivalent-emissions. Heat pump and oil-fired systems have about the same heat production costs but compared with gas-fired systems they are generally higher. Wood pellet systems show the lowest CO₂-equivalent-emissions but the heat production costs are significantly higher than those of the other examined systems.

1 Einleitung

Knapp 80 % des Energieverbrauchs deutscher Haushalte entfällt auf die Bereitstellung von Raumwärme und die Trinkwassererwärmung. Neben der Reduktion von Wärmeverlusten des Gebäudes kann dabei die Wahl des Heizungssystems einen erheblichen Beitrag zur Energieeinsparung und Emissionsminderung leisten. Insbesondere die Wärmepumpe stellt in diesem Zusammenhang eine interessante, aber häufig wenig beachtete Alternative dar.

Wärmepumpen sind in Deutschland bereits Ende der siebziger und Anfang der achtziger Jahre in nennenswertem Umfang installiert worden. Mit dem Sinken der Ölpreise und aufgrund von „Kinderkrankheiten“ ging die Nachfrage in den achtziger Jahren allerdings stark zurück. Seit 1993 ist jedoch wieder ein Anstieg an neu installierten Wärmepumpenanlagen zu verzeichnen. Dennoch sind die Installationszahlen niedrig, wenn man die Situation mit der Schweiz vergleicht. Dort werden inzwischen in über einem Drittel der neugebauten Einfamilienhäuser Heizungswärmepumpen eingesetzt. Dies verdeutlicht das Marktpotenzial der Wärmepumpentechnologie und legt eine vertiefte Untersuchung der Einsatzbedingungen und -möglichkeiten in Deutschland nahe.

Daher soll im folgenden die Wärmepumpe hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Kriterien mit anderen Technologien zur Raumwärmebereitstellung wie Gasbrennwertkessel und Ölzentralheizung verglichen werden. Zunächst werden in Kapitel 2 dazu die technischen Grundlagen von Wärmepumpenanlagen skizziert. In Kapitel 3 wird das Angebot an Wärmepumpen und der Einsatz von Wärmepumpen im deutschsprachigen Raum dargestellt. Um die Wärmepumpe mit anderen Heizungstechnologien vergleichen zu können, werden sodann in Kapitel 4 sogenannte Versorgungsfälle definiert und aus der Vielzahl möglicher Heizungssysteme Versorgungssysteme für den Vergleich ausgewählt. Bei den Versorgungsfällen handelt es sich um typische Gebäude, in denen eine Wärmepumpe zum Einsatz kommen könnte. Dabei werden sowohl Einfamilien- als auch Mehrfamilienhäuser betrachtet und es wird zwischen Neubau und Gebäudebestand unterschieden, um unterschiedliche Einsatzbedingungen zu berücksichtigen. In Kapitel 5 werden Methodik und Ergebnisse der ökologischen Analyse der ausgewählten Versorgungsaufgaben und Versorgungssysteme dargestellt. Dabei werden nicht nur der Endenergiebedarf und die direkten Emissionen der betrachteten Systeme ermittelt, sondern es werden im Sinn einer Lebenszyklusanalyse auch die Energieverbräuche und Emissionen vorgelagerter Prozesse betrachtet. Kapitel 6 befasst sich mit der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Heizungssysteme, wobei sowohl Investitionskosten als auch laufende Kosten betrachtet werden. Die erzielten Ergebnisse zu ökologischen und ökonomischen Aspekten werden in der Schlußbetrachtung in Kapitel 7 zusammengeführt, um eine ganzheitliche Bewertung zu ermöglichen.

2 Technologie

Über eine Wärmepumpe kann durch Energiezufuhr von außen die auf einem relativ niederen Temperaturniveau verfügbare Wärmeenergie bodennaher Luftschichten, oberflächennaher Erdschichten sowie von Grund- und Oberflächenwasser auf ein für die Wärmenutzung geeignetes Temperaturniveau angehoben werden. Diese Umgebungswärme stellt dabei zum überwiegenden Teil eine indirekte Form der Sonnenenergie dar. Ein geringer Teil der oberflächennahen Erdwärme - als Teil der Umgebungswärme - kann aber auch aus der im tiefen Untergrund gespeicherten Energie stammen /Kaltschmitt et al. 1999/.

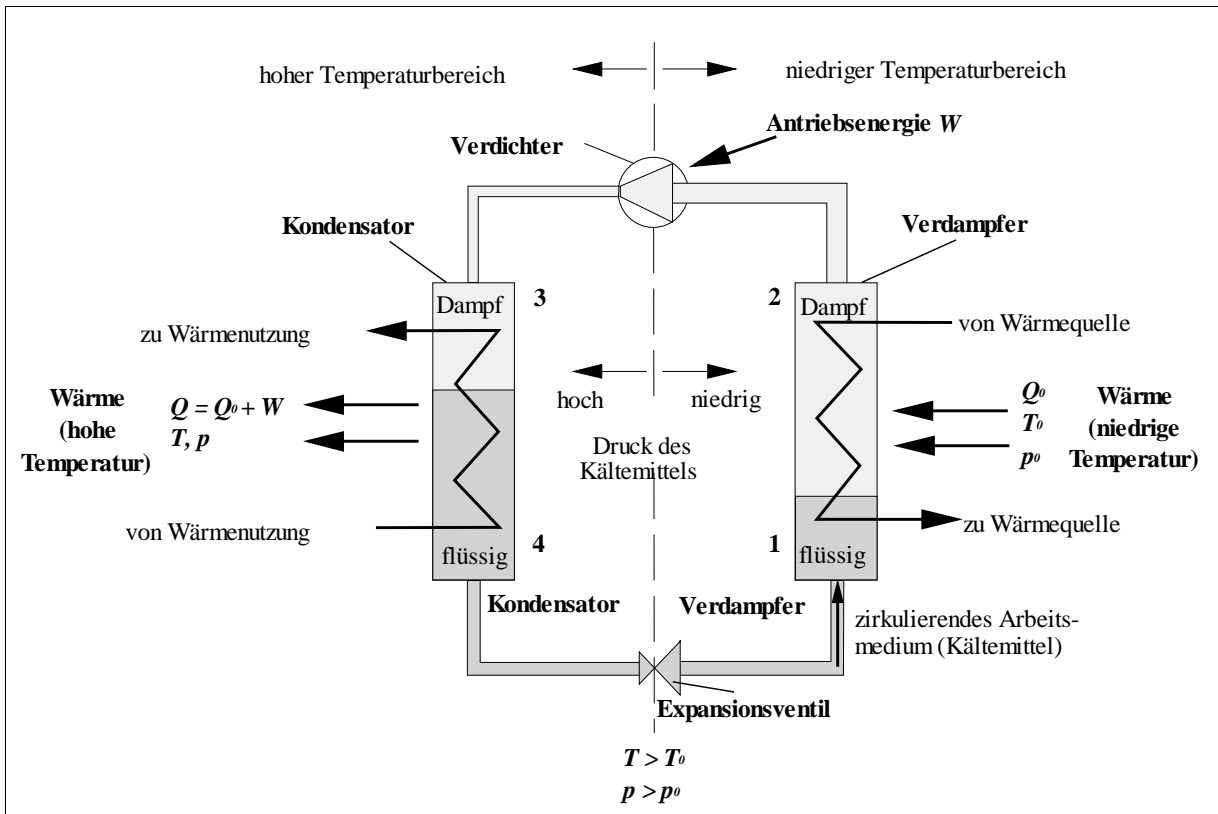
Um die Umgebungswärme nutzbar zu machen, ist eine *Wärmepumpenanlage* einzusetzen. Dieses System umfasst in der Regel die Systemelemente *Wärmequellenanlage* zum Entzug der Energie aus der Umgebung und *Wärmepumpe* zur Erhöhung des Temperaturniveaus.

2.1 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist ein Aggregat, welches einen Wärmestrom auf einem niedrigen Temperaturniveau aufnimmt (kalte Seite; Wärmequelle) und diesen durch Zufuhr exergetisch höherwertiger Energie gemeinsam mit der zugeführten Energie auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgibt (warme Seite; Wärmenutzung) /DIN EN 255 1989/. Die notwendige Antriebsenergie kann einer Wärmepumpe je nach Funktionsprinzip in Form von mechanischer Energie oder Wärme zugeführt werden. Entsprechend wird zwischen Kompressions- und Sorptionswärmepumpen unterschieden.

2.1.1 Kompressionswärmepumpen

In Kompressionswärmepumpen findet ein Kaltdampfprozess statt, ein sogenannter linksläufiger Carnot-Prozess, der im wesentlichen aus den vier Schritten Verdampfung, Verdichtung, Kondensation und Expansion in einem geschlossenen Kreislauf besteht. Der Wärmepumpenprozess ist in Abb. 2-1 schematisch dargestellt. Im Verdampfer wird das im Wärmepumpenkreislauf zirkulierende Arbeitsmittel bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur (bis weit unter 0 °C) durch die Wärmezufuhr Q_0 verdampft. Durch die folgende Druckerhöhung im Verdichter wird die Temperatur des Arbeitsmittels erhöht, so dass nun die Temperatur über der Vorlauftemperatur der Wärmenutzungsanlage (z. B. Gebäudeheizung) liegt. Im Kondensator wird das Arbeitsmittel bei der hohen Temperatur verflüssigt und gibt dabei Wärme an die Wärmenutzungsanlage ab. Anschließend tritt es durch das Expansionsventil in den Niederdruckteil über; wo der Kreislauf wieder von vorn beginnt. Die insgesamt als Nutzwärme zur Verfügung stehende Wärme ist demnach die Summe aus der Umgebungswärme Q_0 und der nutzbaren Verdichterarbeit W , vermindert um die auftretenden Verluste.



nach /Halozan, Holzapfel 1987/

Abb. 2-1: Schema einer Kompressionswärmepumpe

Arbeitsmittel von Wärmepumpen

Das Arbeits- bzw. Kältemittel ist ein Stoff mit niedrigem Siedepunkt. In der Vergangenheit wurden für Kompressionswärmepumpen vorwiegend voll- und teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW bzw. HFCKW) eingesetzt (vgl. Tabelle 2-1). Aufgrund ihres teilweise hohen Beitrag zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht (Ozone Depletion Potential, ODP) dürfen sie allerdings nach den Bestimmungen der FCKW-Halon-Verbotsverordnung (s. /BGBl. IA. 1090 1994/ und /DIN 7003/) nicht mehr als Kältemittel in Neuanlagen verwendet werden. Das als Übergangslösung verwendete teilhalogenierte R22 ist seit dem 1.1.2000 für Neuanlagen ebenfalls nicht mehr zugelassen.

Mögliche Ersatzkältemittel sind FKW (Fluorkohlenwasserstoffe), CO₂ (Kohlenstoffdioxid) und Ammoniak sowie Kohlenwasserstoffe wie Propan (R290) und Propen (R1270).

Die Fluorkohlenwasserstoffe R134a, R407C und R410A bestehen aus chlorfreien teilfluorierten Kohlenwasserstoffen und haben somit keine negative Wirkung auf die Ozonschicht. Zwar haben sie aufgrund der Molekülgröße ein Treibhauspotenzial, allerdings sind sie nicht toxisch und nicht brennbar. In neuen Wärmepumpen wird insbesondere R407C als Kältemittel eingesetzt.

Tabelle 2-1: Übersicht über Kältemittel /LGA 2000a/ und /VDI 4640-1 1998/

Bezeichnung	ODP ^a	GWP ^b	Bemerkung
Frühere Kältemittel			
R11 (Trichlorfluormethan)	1	4000	seit 1.1.1995 in Neuanlagen verboten
R12 (Dichlortrifluormethan)	1	8500	seit 1.1.1995 in Neuanlagen verboten
R502(Kältemittelmischung)	0,33	5591	seit 1.1.1995 in Neuanlagen verboten
R22 (Chloridfluormethan)	0,055	1700	seit 1.1.2000 in Neuanlagen verboten
Heutige Kältemittel			
R134a (Tetrafluorethan)	0	1300	Ersatz für R22 und R12
R407C (Kältemittelmischung)	0	1526	Ersatz für R22 und R502
R410A (Kältemittelmischung)	0	1890	hoher Arbeitsdruck erforderlich
R290 (Propan)	0	3	Ersatz für R22 und R502, leicht entflammbar
R1270 (Propen)	0	3	Ersatz für R22 und R502, leicht entflammbar
R744 (Kohlendioxid)	0	1	sehr gute Umweltverträglichkeit, hoher Arbeitsdruck in Wärmepumpe erforderlich

^a ODP: (Ozone Depletion Potential), Ozonabbaupotenzial, Referenz: R 11 mit dem ODP-Wert von 1;

^b GWP: (Global Warming Potential), Treibhauspotenzial bei einem Zeithorizont von 100 Jahren, Referenz CO₂ mit dem GWP-Wert von 1

Darüber hinaus finden auch Propan und Propen in Neuanlagen Anwendung. Diese Kältemittel besitzen ebenfalls kein Ozonabbaupotenzial und haben nur ein geringes Treibhauspotenzial; sie sind allerdings brennbar. Bei der Innenraumaufstellung einer Wärmepumpe mit brennbarem Arbeitsmittel ist daher ggf. eine mechanische Belüftung notwendig (vgl. /DIN 7003/). Aufgrund der unklaren Rechtssituation auf europäischer Ebene im Umgang mit brennbaren Kältemitteln werden allerdings weitere Alternativen entwickelt. Beispielsweise befinden sich Anlagen mit natürlichen Kältemitteln wie CO₂ und Wasser in der Erprobungsphase. Aufgrund der erforderlichen Betriebsdrücke sind in diesem Fall jedoch Konstruktionsänderungen an den Anlagen erforderlich.

Effizienz von elektromotorisch betriebenen Kompressionswärmepumpen

Die energetische Effizienz elektromotorisch betriebener Kompressionswärmepumpen wird durch folgende Kennzahlen beschrieben.

- Die *Leistungszahl* (COP, coefficient of performance) von Elektromotorwärmepumpen ist das Verhältnis der abgegebenen Nutzwärmeleistung zur aufgenommenen elektrischen Energie des Antriebsmotors des Kompressors. Die Leistungszahl wird wesent-

lich beeinflusst durch die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizungsanlage, durch das eingesetzte Kältemittel sowie die Bauweise der Wärmepumpe.

Mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizungsanlage sinkt die Leistungszahl der Wärmepumpe. Um hohe Leistungszahlen und damit eine hohe Effizienz zu erreichen, sollte die Wärmequellentemperatur möglichst hoch und die Vorlauftemperatur der Wärmenutzungsanlage (Wärmesenke) möglichst niedrig liegen.

Die vom Hersteller angegebenen Leistungszahlen beziehen sich immer auf bestimmte Betriebsbedingungen (Wärmequellen- und -senktemperatur). Unter optimalen Bedingungen können dabei etwa 40 bis 65 % der durch einen verlustfreien Carnot-Prozess gegebenen Leistungszahlen erreicht werden /Hackensellner, Dünnwald 1996/.

- Die Effizienz von Elektrowärmepumpen über einen längeren Zeitraum wird durch die Arbeitszahl beschrieben. Sie gibt das Verhältnis der abgegebenen Nutzarbeit zur aufgewendeten Antriebsarbeit während eines bestimmten Zeitraums (i. d. R. ein Jahr) an. Zusätzlich zur Antriebsarbeit des Kompressors geht dabei auch der Energieverbrauch weiterer Komponenten, z. B. der Steuerung oder der Solepumpe, ein. Während die Leistungszahl unter vorgegebenen Betriebsbedingungen ermittelt wird, ergibt sich die Arbeitszahl durch den praktischen Betrieb des Systems. Die Arbeitszahl ist daher eine aussagekräftigere Beschreibung der Effizienz von Anlagen zur Nutzung der Umgebungswärme.

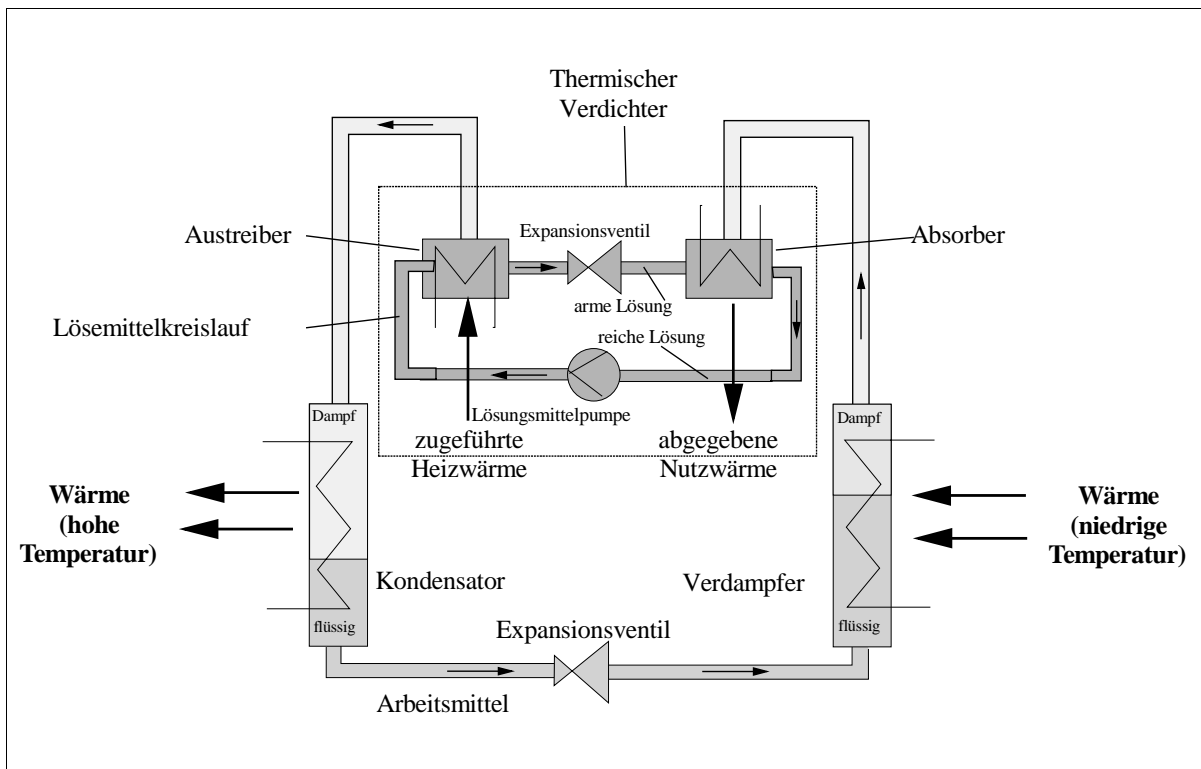
Einen Überblick über die energetische Effizienz am Markt erhältlicher Geräte wird in Kapitel 3.4 gegeben.

2.1.2 Sorptionswärmepumpen

Bei Sorptionswärmepumpen wird als Antriebsenergie anstelle von mechanischer Energie Wärme verwendet. Diese kann entweder durch die Verbrennung von Gas oder Öl oder in Form von Abwärme oder Umweltwärme bereitgestellt werden. Sorptionswärmepumpen können in Absorptions- und Resorptionsanlagen unterteilt werden, wobei Resorptionswärmepumpen für die hier diskutierten Anwendungsfälle kaum Bedeutung haben und nicht weiter diskutiert werden.

Abb. 2-2 zeigt das Schema einer einstufigen Absorptionswärmepumpe. Im Lösungsmittelkreislauf zirkuliert dabei ein Zweistoffgemisch (sog. Arbeitsstoffpaar), dessen eine Komponente (Arbeitsmittel) ein hohes Lösungsvermögen in der zweiten Komponente (Lösungsmittel) aufweist. Klassische Kombinationen von Zweistoffgemischen sind Wasser/Lithiumbromid und Ammoniak/Wasser. Im Absorber wird das vom Verdampfer kommende gasförmige Arbeitsmittel im abgereicherten Lösungsmittel unter Wärmeabgabe absorbiert. Die angereicherte Lösung wird anschließend unter Druckerhöhung durch die Lösungs-

mittelpumpe in den Austreiber gepumpt. Dort wird aus dem Zweistoffgemisch der Arbeitsstoff (z. B. Ammoniak) durch Wärmezufuhr von außen (Antriebsenergie) ausgetrieben. Dadurch verringert sich die Konzentration des Arbeitsstoffes im Lösungsmittel. Über die Lösungsmittelpumpe muss daher kontinuierlich "reiche Lösung" zugeführt werden, während gleichzeitig "arme Lösung" über das Expansionsventil zum Absorber zurückströmt, um dort wieder den gasförmigen Arbeitsstoff absorbieren zu können. Die Absorber/Austreiber-Kombination wirkt dabei druckerhöhend ("thermischer Verdichter"). Der Arbeitsstoff gelangt mit erhöhtem Druck aus dem Austreiber zum Verflüssiger und gibt dort unter Verflüssigung Wärme ab. Das Arbeitsmittel durchläuft nunmehr die gleichen Schritte mit Expansionsventil und Verdampfer wie bei Kompressionswärmepumpen. Es erreicht gasförmig wieder den Absorber.



nach /Kirn 1983/

Abb. 2-2: Wärmepumpenprozess einer Absorptionswärmepumpe

Nutzwärme entsteht somit im Absorber und Verflüssiger. Zusammengenommen wird damit die Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (z. B. Erdwärme) im Verdampfer aufgenommen. Antriebsenergie muss im Austreiber und in der Lösungsmittelpumpe eingesetzt werden.

Die Effizienz von Absorptionswärmepumpen wird über die Heizzahl als Verhältnis der Nutzenergie zum Energieinhalt der eingesetzten fossilen Energieträger über einen bestimmten Zeitraum angegeben. Typische Werte liegen, je nach Wärmepumpentechnik, zwischen 1,1 und 1,6.

Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von Absorptionswärmepumpen im relevanten Leistungsbereich für die Beheizung von Wohngebäuden beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf Heizungssysteme mit elektromotorisch betriebenen Kompressionswärmepumpen.

2.2 Wärmequelle

Als Wärmequellen zur Nutzung der Umgebungswärme kommen bei Heizungs-Wärmepumpen für Wohngebäude in der Regel das oberflächennahe Erdreich, das Grundwasser und die Außenluft in Frage. Die Charakteristika dieser Wärmequellen und der jeweils verwendeten Wärmeübertrager sollen im folgenden kurz diskutiert werden

2.2.1 Erdreich

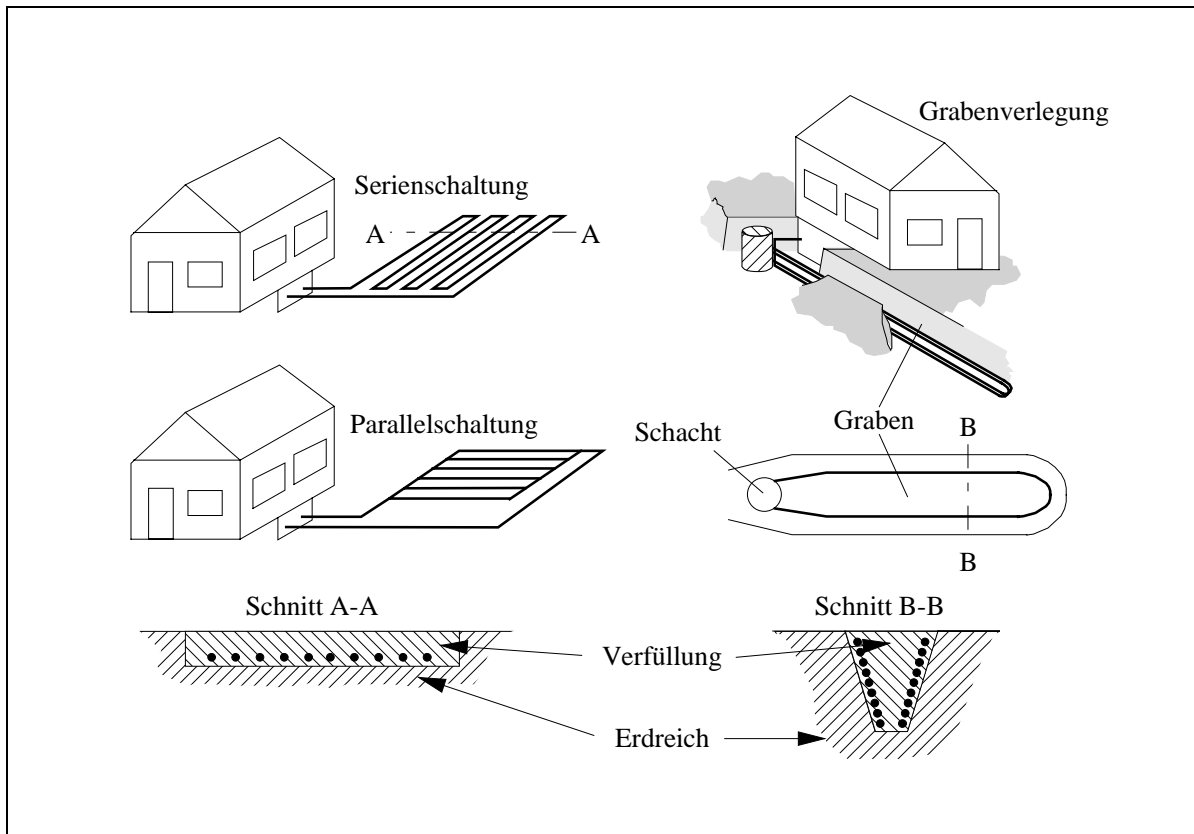
Bei der Nutzung oberflächennaher Bodenschichten als Wärmequelle wird nach der Art der verwendeten Wärmeübertrager zwischen horizontal und vertikal verlegten Erdreich-Wärmeübertragern (Erdreichwärmetauschern) unterschieden /Kaltschmitt et al. 1999/.

Horizontal verlegte Erdreich-Wärmeübertrager

Zwei in Europa gebräuchliche Verlegemuster horizontaler Wärmeübertrager (Erdkollektoren) in Form von Rohrregistern sind in Abb. 2-3 links dargestellt. Die aus Metall oder Kunststoff bestehenden Rohre werden in einer Tiefe zwischen 1,0 und 1,5 m in das Erdreich eingebracht, wobei der Abstand der einzelnen Rohre etwa 0,5 bis 1,0 m betragen soll. Um Beschädigungen der Rohrleitungen zu vermeiden, werden diese oftmals in eine Sandschicht eingebettet. Die genutzte Erdfläche sollte etwa das 1,5- bis 2-fache der zu beheizenden Fläche betragen, um auch bei längeren Kälteperioden dem Erdreich noch genügend Wärme entziehen zu können. Je nach Bodenbeschaffenheit schwanken die entzogenen Wärmeleistungen zwischen 10 und 35 W/m². Aus einem Quadratmeter Erdreich lassen sich während der Heizperiode etwa 100 kWh Wärme gewinnen.

Eine deutliche Verringerung des Flächenbedarfs kann durch das in Abb. 2-3 rechts dargestellte Verlegemuster eines Grabenkollektors erreicht werden. Bei diesem Konzept werden die Wärmetauscherrohre an den Seitenwänden eines ca. 2,5 m tiefen und 3,0 m breiten Grabens verlegt. Die erforderliche Grabenlänge hängt von der Bodenbeschaffenheit und der Heizleistung der Wärmepumpe ab. Als Richtwert kann eine spezifische Grabenlänge von etwa 2 m pro kW Heizleistung angesehen werden /Gerbert 1991/.

Für den Wärmeentzug aus dem Erdreich und den Wärmetransport von der Wärmequelle zur Wärmepumpe existieren zwei Möglichkeiten.



nach /Sanner 1992/

Abb. 2-3: Verlegungsmuster horizontaler Wärmetauscher

- Der Wärmeentzug und -transport erfolgt mittels „Direktverdampfung“. Dabei zirkuliert in den Rohren des Erdreich-Wärmeübertragers direkt das Arbeitsmittel der Wärmepumpe und entzieht dem Erdreich bei seiner Verdampfung Wärme. Für den im Erdreich liegenden Verdampfer werden Kupferrohre verwendet, die mit einer Kunststoffhülle vor Korrosion geschützt werden.
- Die zweite Möglichkeit stellt ein Zwischenkreislauf mit einem Wärmeträgermedium („Sole“) dar, das im Erdreich Wärme aufnimmt und an den Verdampfer der Wärmepumpe abgibt. Als Wärmeträger wird meist eine Mischung von Wasser und Frostschutzmittel (z. B. Monoethylen- oder Monopropylenglykol) eingesetzt. Als Erdreichwärmetauscher werden Schläuche aus Polyethylen oder Polybutylen verwendet. Diese Materialien weisen eine ausreichende Alters- und Korrosionsbeständigkeit auf und sind bei den auftretenden Temperaturen elastisch und chemisch stabil.

Der Vorteil der Direktverdampfung liegt in dem geringeren apparativen Aufwand und einer im Vergleich zum Solekreislauf um 10 bis 15 % höheren Arbeitszahl. Allerdings bedarf es einer kältetechnisch genau angepassten Anlagenausführung. Weiterhin sind die Füllmengen des Arbeitsmittels wesentlich höher als bei Anlagen mit Zwischenkreislauf.

Vertikal verlegte Erdreich-Wärmeübertrager

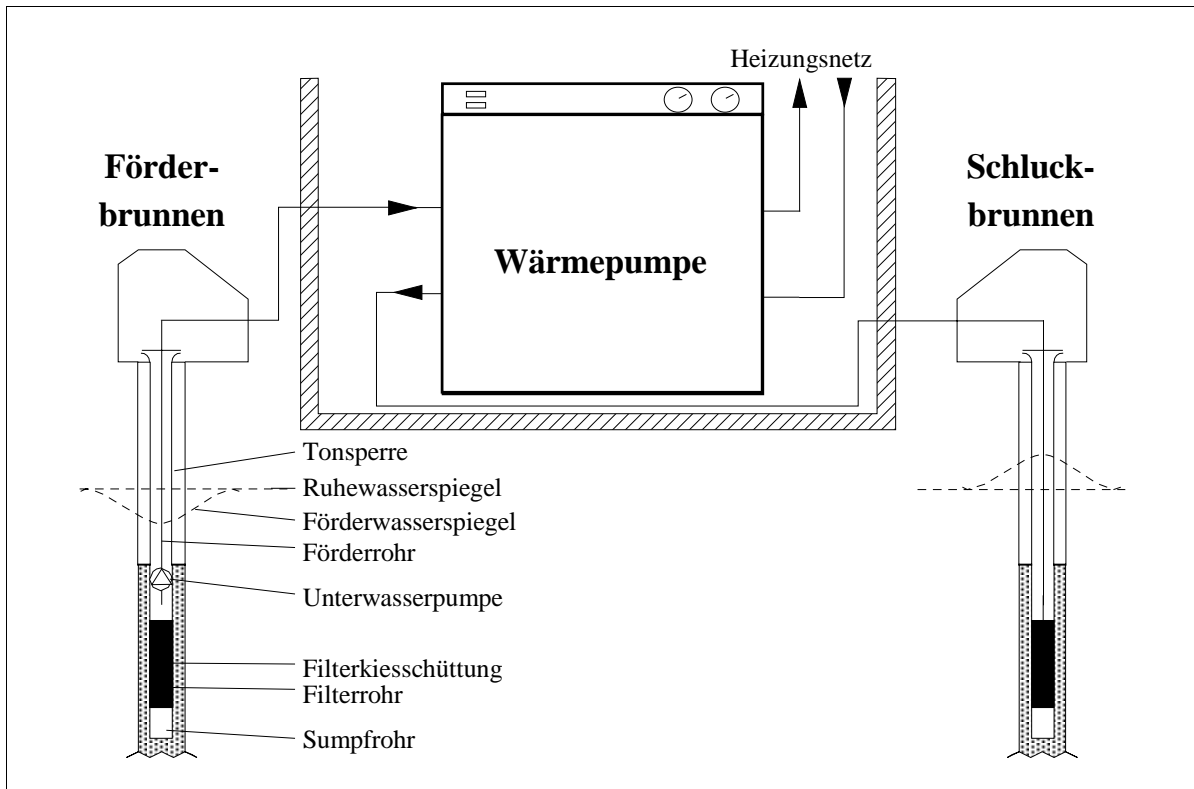
Vertikale Erdreich-Wärmeübertrager (Erdwärmesonden) weisen gegenüber den horizontalen Wärmeübertragern einen wesentlich geringeren Flächenbedarf auf und werden deshalb bevorzugt bei kleinen Grundstücken eingesetzt. Der Wärmeentzug erfolgt über einen Solezwischenkreislauf durch Wärmeleitung vom Erdreich zum Wärmeträgermedium, das sich in einem geschlossenen Kreislauf befindet und die Wärme zur Wärmepumpe transportiert. Erdwärmesonden werden in vertikale, bis über 100 m tiefe Bohrungen eingebracht. Um einen guten Wärmeübergang zwischen Erdreich und Sonde zu gewährleisten, werden die Erdwärmesonden hinterfüllt. Hierbei hat sich eine Verpressung mit einer Bentonit-Zement-Suspension bewährt.

Wie bei horizontalen Erdreichwärmetauschern besteht auch bei Erdwärmesonden die Gefahr, dass durch Unterdimensionierung und einen entsprechend zu großen Wärmeentzug das Erdreich stark abkühlt und aufgrund der tieferen Temperaturen des Wärmeträgermediums sich die Effizienz der Wärmepumpe verringert. Anders als bei horizontalen Wärmetauschern, die sich in der heizfreien Zeit durch die solare Einstrahlung regenerieren, ist eine Regeneration des Erdreiches in tieferen Schichten nur bedingt möglich. Um auch langfristig den Gleichgewichtszustand zu halten, darf abhängig von den jeweiligen Untergrundeigenschaften, eine jährliche entzogene Wärmemenge zwischen 50 und 180 kWh/(m·a) nicht überschritten werden /Sanner, Knoblich 1991/.

2.2.2 Grundwasser

Grundwasser ist infolge des relativ konstanten Temperaturniveaus von 8 bis 12 °C prinzipiell sehr gut als Wärmequelle für Wärmepumpen geeignet. Einschränkungen hinsichtlich einer Nutzbarkeit ergeben sich allerdings aus den in nicht allen Regionen Deutschlands vorhandenen bzw. erschließbaren Grundwasserleitern sowie aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen. Besteht aufgrund der chemischen Eigenschaften des Grundwassers die Gefahr von Ausfällungen und damit von Verstopfungen der Fördereinrichtung, ist eine technische Nutzung ebenfalls nur eingeschränkt möglich.

Die Wärmequellenanlage zur Grundwassernutzung besteht aus einem Förderbrunnen, aus dem das Grundwasser entnommen wird, und einem Schluckbrunnen, durch den das abgekühlte Grundwasser wieder den grundwasserführenden Schichten zugeführt wird (Abb. 2-4). Diese können - in Abhängigkeit von den Untergrundeigenschaften - entweder gebohrt (Bohrbrunnen) oder geschlagen (Schlagbrunnen) werden. Förder- und Schluckbrunnen müssen ausreichend weit voneinander entfernt niedergebracht werden, um einen sogenannten thermisch-hydraulischen Kurzschluss zu vermeiden. Der Förderbrunnen sollte sich außerdem nicht in der Kältefahne des Schluckbrunnens befinden, da sonst die Effizienz der Wärmepumpenanlage sinkt.



nach /Günther-Pomhoff et al. 1995/

Abb. 2-4: Prinzipschema einer Grundwasser-Wärmepumpenanlage

Vor der Brunnenauslegung sind durch hydrogeologische Voruntersuchungen die chemische Zusammensetzung des Grundwassers, die wasserführenden und wasserundurchlässigen Schichten, die Grundwasserspiegelhöhe und die Durchlässigkeit der wasserführenden Schichten zu bestimmen. Die dafür ggf. notwendige Probebohrung kann in weiterer Folge als Brunnen genutzt werden.

2.2.3 Außenluft

Luft steht überall und uneingeschränkt als Wärmequelle zur Verfügung. Sie besitzt allerdings im Vergleich zu Wasser eine wesentlich geringere Dichte, so dass große Luftmengen mit Hilfe von Ventilatoren bewegt werden müssen. Ein wesentlicher Nachteil von Außenluft als Wärmequelle ist auch die starke tages- und jahreszeitliche Schwankung von Lufttemperatur und -feuchtigkeit. Die gegenläufige Charakteristik von jahreszeitlichem Temperaturgang und Raumwärmebedarf führt zu Zeiten eines hohen Wärmebedarfs im Winter zu einer großen Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle Außenluft und dem dem Heizungsvorlauf und dadurch zu einer entsprechend niedrigen Arbeitszahl der Wärmepumpe. Außenluftwärmepumpen werden daher oft bivalent betrieben (s. Kapitel 2.3)

In Niedrigenergiegebäuden mit kontrollierter Wohnraumbelüftung kann mit einer Außenluftwärmepumpe zusätzlich die Abluftwärme aus dem zu beheizenden Gebäude über eine Wärmerückgewinnungsanlage genutzt werden.

Um den Nachteil der relativ starken Temperaturschwankungen der Außenluft auszugleichen, werden auch sogenannte Massivabsorber aus Beton, die die Umgebungsenergie über kürzere Zeiträume speichern können, eingesetzt. Neben der Erwärmung über die Außenluft wird ein Massivabsorber dabei auch über die Sonneneinstrahlung sowie über den Regen und das Erdreich erwärmt. Die im Massivabsorber gespeicherte Wärme wird wie bei Erdkollektoren bzw. -sonden über einen Solekreislauf zur Wärmepumpe transportiert. Die Massivabsorbertechnik nutzt dabei das hohe Wärmespeichervermögen und die gute Wärmeleitung von Beton. Neben Mauern, Balkonen und Fassadenplatten etc. werden auch eigens zur Energienutzung errichtete Bauteile (insbesondere sogenannte Energiegaragen oder Energiesterne) als Massivabsorber eingesetzt /Primus 1997/.

2.3 Betriebsweise

Bei der Betriebsweise von Wärmepumpenanlagen wird eine Wärmebereitstellung alleine durch die Wärmepumpe (monovalent) sowie durch die Wärmepumpe mit einer Zusatzheizung in Alternativ-, Parallel- und Mischbetrieb (bivalent) unterschieden.

- Wird die Wärmepumpe monovalent betrieben, deckt diese die Wärmenachfrage ohne zusätzlichen Wärmeerzeuger. Voraussetzung dafür ist eine Wärmequelle mit einer im Jahresverlauf möglichst geringen Temperaturschwankung.
- Bivalent arbeitende Wärmepumpen stellen zusammen mit anderen Wärmeerzeugern die benötigte Wärme bereit. Man unterscheidet zwischen bivalent-alternativem und bivalent-parallelem Betrieb sowie einer Mischform aus diesen beiden Betriebsarten.
- Beim bivalent-alternativen Betrieb deckt die Wärmepumpe bis zu einem bestimmten Umschaltzeitpunkt die Wärmenachfrage; anschließend übernimmt eine Zusatzheizung die Wärmelieferung. Die Wärmepumpenanlage wird dabei nur auf einen bestimmten Prozentsatz der maximalen Wärmeleistung ausgelegt, die Zusatzheizung muss 100 % der Wärmeleistung decken können.
- Beim bivalent-parallelen Betrieb wird ab einer bestimmten Temperatur die Wärmenachfrage gleichzeitig durch die Wärmepumpe und ein Zusatzheizsystem gedeckt.

Betriebsweise und Auslegung einer Wärmepumpenanlage haben maßgeblichen Einfluss auf deren Wirtschaftlichkeit. Wärmepumpen mit Erdreich oder Grundwasser als Wärmequelle werden in der Regel monovalent betrieben. Dies ist möglich, da diese Wärmequellen nur geringe jahreszeitliche Temperaturschwankungen aufweisen und damit im Verlauf des gesamten Jahres verfügbar sind. Der bivalent-alternative Betrieb ist nur bei Anlagen mit nicht angepasstem Heizsystem (Hochtemperatur) sinnvoll. Beim bivalent-parallelen Betrieb kann

z. B. der Vorlauf der Wärmepumpe in den Kesselrücklauf eingespeist werden, wo das Heizungswasser weiter erwärmt wird. Gerade bei größeren Anlagen mit ausgeprägten Nachfragespitzen kann diese Betriebsweise wirtschaftlich sinnvoll sein. Auch bei der Nutzung von Außenluft ohne Vorwärmung kann über einen bivalenten Betrieb eine entsprechende Versorgungssicherheit gewährleistet werden.

3 Marktsituation

Im folgenden wird auf die Situation auf dem Markt für elektrische Kompressionswärmepumpen eingegangen. Zunächst wird die Marktentwicklung in den deutschsprachigen Ländern in den letzten zwei Jahrzehnten skizziert (Kapitel 3.1). Daran anschließend wird auf die derzeit angebotenen Wärmepumpen für die Gebäudeheizung und deren technische Charakteristika eingegangen (Kapitel 3.2). Des weiteren wird die Entwicklung des Einsatzes von Wärmepumpen betrachtet.

3.1 Wärmepumpenmarkt in Deutschland, Österreich und der Schweiz

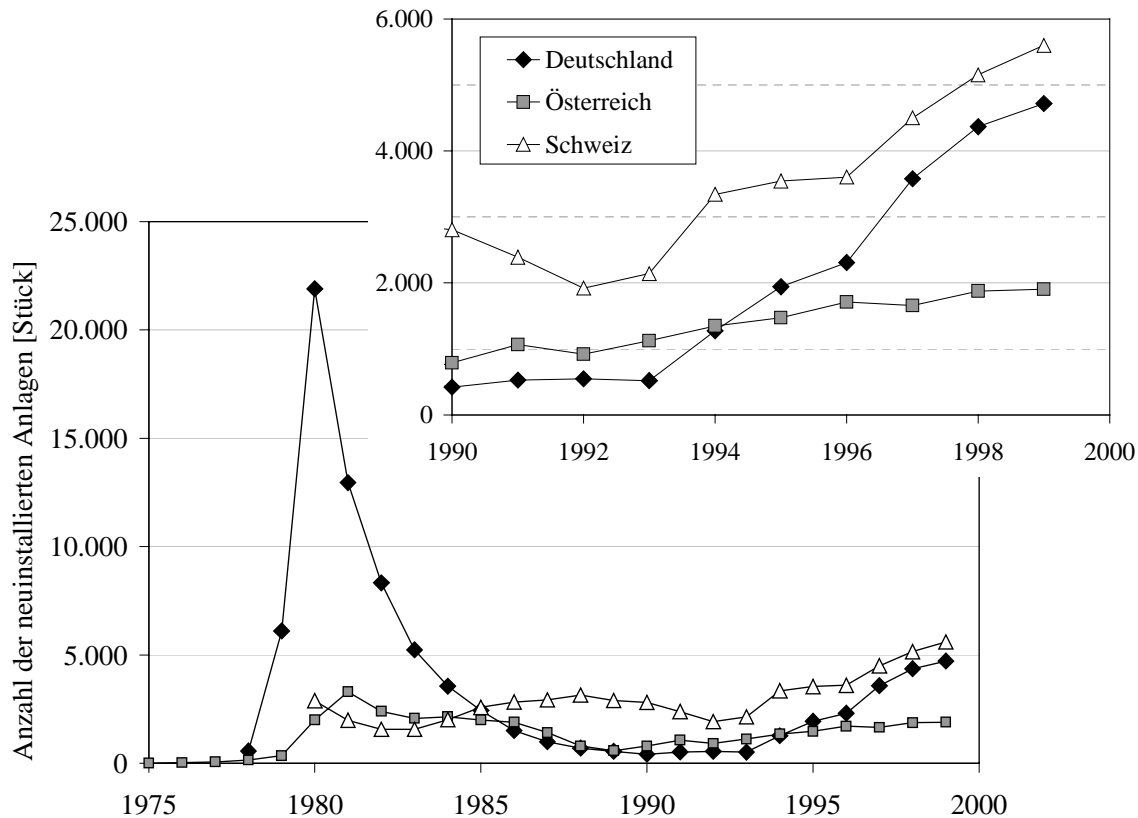
Die Nutzung der Wärmepumpentechnologie unterscheidet sich stark von einem Land zum anderen. Daher wird im folgenden ein Blick über die Grenzen geworfen, wenn auch kein Überblick über die weltweite Situation gegeben werden kann. Vielmehr wird im folgenden der Einsatz von Wärmepumpen im deutschsprachigen Raum beschrieben, da diese Länder hinsichtlich der klimatischen Bedingungen, der Gebäude- und Energieträgerstruktur sowie den rechtlichen Rahmenbedingungen am ehesten mit Deutschland vergleichbar sind. Dabei wird zunächst ein Überblick über die Entwicklung der Neuinstallationen in Deutschland, Österreich und der Schweiz gegeben (Kapitel 3.1.1). Anschließend wird auf die verwendeten Wärmequellen (Kapitel 3.1.2) eingegangen. Schließlich werden in Kapitel 3.1.3 die energie-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erörtert, die die beobachteten Unterschiede in der Marktentwicklung zumindest zum Teil erklären.

3.1.1 Neuinstallationen und Bestand von Heizungswärmepumpen

Der Einsatz von Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden wurde insbesondere durch die Ölpreisentwicklung Ende der siebziger Jahre angestoßen. Innerhalb weniger Jahre wurden sehr hohe installierte Stückzahlen erreicht (vgl. Abb. 3-1). Jedoch führten Fehler bei der Auslegung, nicht ausreichende Ausbildung der Installateure und „Kinderkrankheiten“ der neuen Technologie in Kombination mit dem Absinken des Rohölpreises in Deutschland zu einem nachlassenden Interesse an dieser Technologie in den achtziger Jahren.

Seit Beginn der neunziger Jahre steigt die Zahl der *Neuinstallationen* wieder deutlich an (vgl. Abb. 3-1). Wurden im Jahr 1990 rund 420 Anlagen in Deutschland installiert /VDEW 1999/, so waren es im Jahr 1999 bereits 4.700 /IWP 2000/.

In der Schweiz gab es in den achtziger Jahren keinen Rückgang der Neuinstallationen, seit Anfang der neunziger Jahre ist auch hier ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. In Österreich wurden in den achtziger Jahren neue Wärmepumpen hauptsächlich zur Warmwasserversorgung eingesetzt. Seit 1990 ist auch hier wieder ein Anstieg der neuinstallierten Heizungswärmepumpen festzustellen.

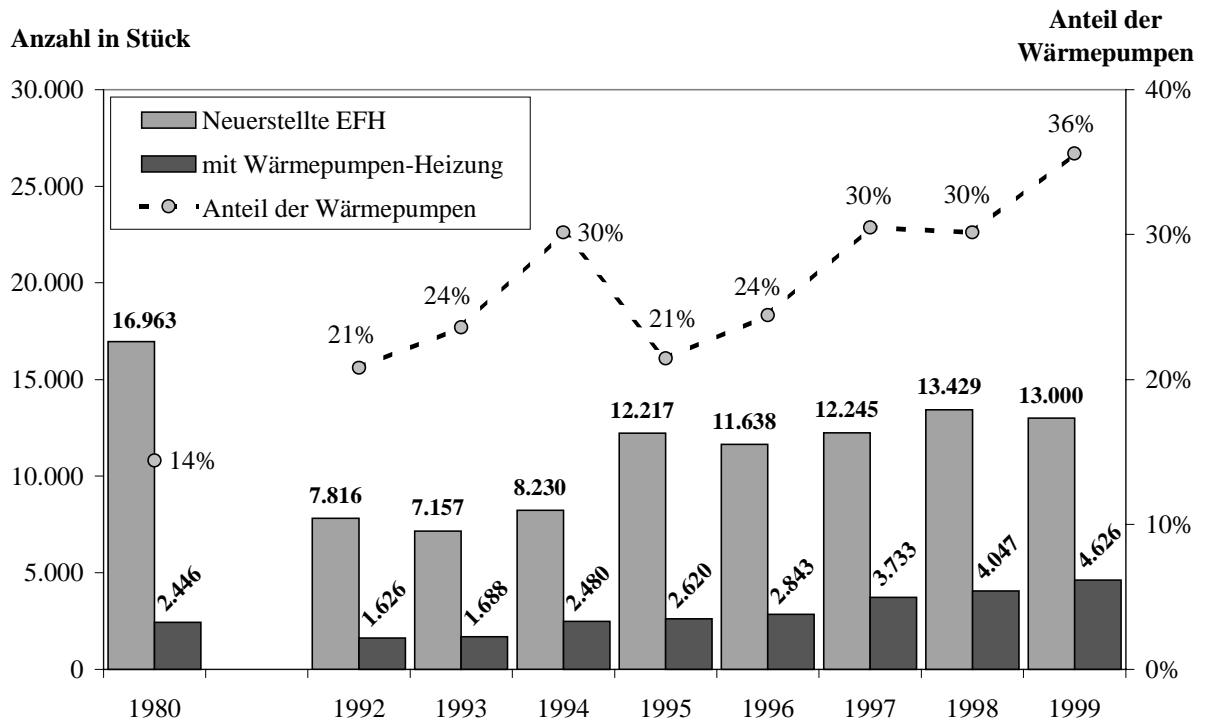


Quellen: /VDEW 1999/, /IWP 2000/, /Faninger 2000/, /FWS 2000/ und /Zaugg 1993/

Abb. 3-1: Neuintallationen von Heizungswärmepumpen in Deutschland, Österreich und der Schweiz

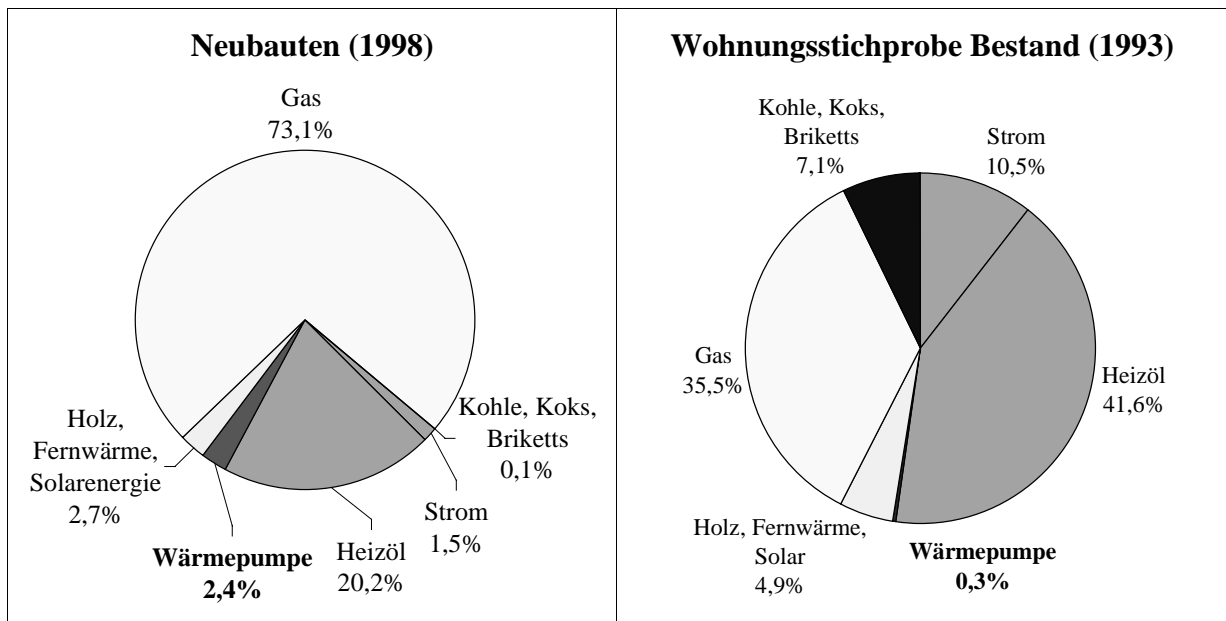
Im Jahr 1999 wurden in Deutschland und in der Schweiz etwa 4700 bzw. 5600 Heizungswärmepumpen installiert, in Österreich etwa 1900. Da Österreich und die Schweiz nur etwa ein Zehntel der *Einwohner* und damit der Haushalte wie Deutschland haben ist, ist der Marktanteil allerdings entsprechend deutlich höher. Die Zahl der installierten Heizungswärmepumpen pro eine Million Einwohner beträgt in Deutschland 53, in Österreich 233 und in der Schweiz 725.

Besonders deutlich ist der Unterschied bei *Neubauten* festzustellen. In der Schweiz wurden im Jahre 1999 in 36 % der neugebauten Einfamilienhäuser Wärmepumpen installiert, 1998 waren es 30 % (Abb. 3-2) /FWS 2000/. Im Vergleich dazu wurden in Deutschland nur etwa 2 % der Neubauten mit Wärmepumpenheizungen ausgestattet (vgl. Abb. 3-3). Hieraus wird das in Deutschland vorhandene Marktpotenzial ersichtlich. Dabei werden in Deutschland rund 95 % der Wärmepumpenheizungen werden in Neubauten installiert, der überwiegende Teil (87 %) wird monovalent bzw. monoenergetisch betrieben, d. h. es werden nur Strom und Umweltenergie zur Heizung eingesetzt.



Quelle: /BFE 2000/

Abb. 3-2: Wärmepumpen-Heizungen mit Wärmeleistungen unter 20 kW in Einfamilienhaus-Neubauten in der Schweiz



Quellen: /Statistisches Bundesamt 2000/, /IWP 2000/, /Statistisches Bundesamt 1995/ und /VDEW 1995/

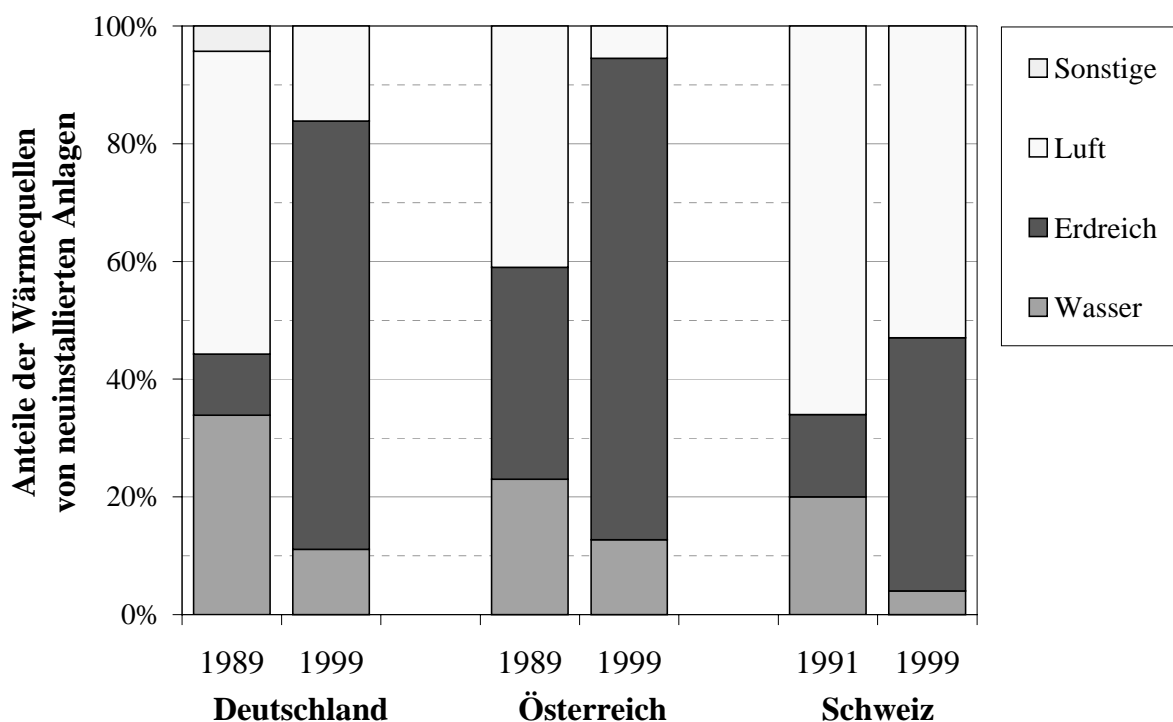
Abb. 3-3: Art der Beheizung von Neubauten (1998) und im Gebäudebestand (1993) in Deutschland

Im *Gebäudebestand* hat sich die Zahl der Wärmepumpenheizungen stabilisiert. Im Jahr 1998 waren laut /VDEW 1999/ 50.365 Anlagen mit einer installierten Leistung von 309.000 kW_{el} in Betrieb. Dies entspricht einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 6,1 kW_{el} im Bestand, bei Neuinstallationen liegt die mittlere Anlagenleistung nach /VDEW 1999/ bei 4,3 kW_{el}.

3.1.2 Verwendete Wärmequellen von Heizungswärmepumpen

Grundsätzlich stehen, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, verschiedene Wärmequellen für Wärmepumpen zur Verfügung. Dies sind insbesondere Luft (Außenluft, Abluft o. ä.), Erdreich (Erdsonde, Erdkollektor) und Wasser (Grund-, Oberflächen- oder Abwasser).

In den drei betrachteten Ländern gibt es deutliche Unterschiede in der Nutzung der Wärmequellen. Abb. 3-4 zeigt die Anteile der Wärmequellen neuinstallierter Wärmepumpen-Heizungsanlagen in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Hierbei ist die Verteilung jeweils für 1989 (Schweiz: 1991) und 1999 gegenübergestellt, um Entwicklungstrends darzustellen.



Quellen: /VDEW 1999/, /IWP 2000/, /Faninger 2000/, /Zaugg 1993/ und /FWS 2000/

Abb. 3-4: Anteil der genutzten Wärmequellen von neuinstallierten Wärmepumpen-Heizungsanlagen in Deutschland, Österreich und der Schweiz

Aus der Abbildung wird deutlich, dass in den letzten Jahren der Anteil von Luft und Wasser als Wärmequelle deutlich abgenommen hat; dafür wird zunehmend das Erdreich als Wärmequelle genutzt. Die Verwendung von Wasser als Wärmequelle hat zwar den Vorteil vergleichsweise hoher Jahresarbeitszahlen, jedoch sind die Erschließungskosten der Wärmequelle (Bohrung der zwei Brunnen) und wasserrechtliche Genehmigungen als Hemmnisse zu betrachten.

Insbesondere in *Deutschland* ist in den letzten Jahren ein Trend zur Nutzung der im Erdreich gespeicherten Wärme festzustellen und hierbei in zunehmendem Maße durch Erdsonden (z. Zt. ca. 30 % der Wärmequellen mit Erdsonde). Ein Grund hierfür könnte die För-

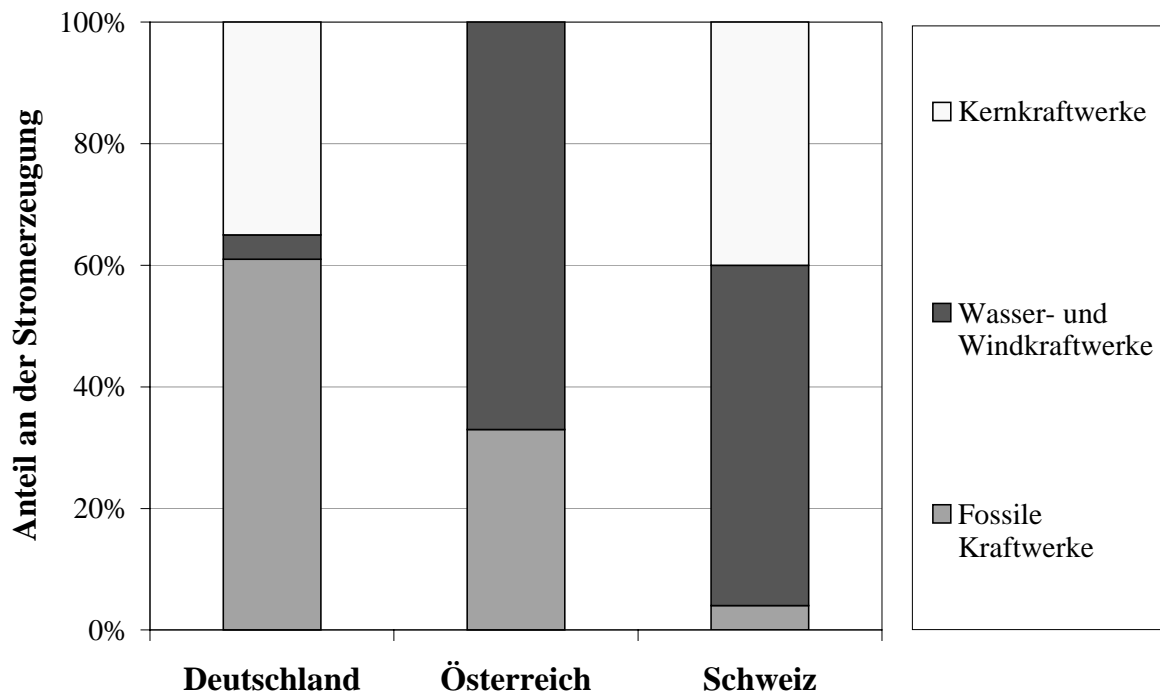
der Praxis eines großen deutschen Energieversorgungsunternehmens sein, das dem Nutzer Festpreise für die Bohrungen angeboten hat. Hierbei werden regionale Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit und damit der Bohrkosten ausgeglichen und somit dem Verbraucher eine höhere Planungssicherheit gegeben.

In *Österreich* dominiert ebenfalls die Wärmequelle Erdreich, allerdings handelt es sich bei dem überwiegenden Anteil der Systeme um Erdreich-Direktverdampfung. Im Jahr 1999 wurden rund 60 % der Systeme nach dem Prinzip der Erdreich-Direktverdampfung und 20 % mit einem Sole-Kreislauf installiert. Ein Grund dafür ist, dass einige große Hersteller in Österreich diese Technologie bevorzugt haben. Ein Vorteil dieses Systems ist die Einsparung eines Wärmeübertragers und somit ein höheres nutzbares Temperaturniveau an der Quellen- seite der Wärmepumpe. Jedoch sind für die Installation dieser Systeme besonders qualifizierte Handwerker (z. B. Kälteanlagenbauer) erforderlich. Darüber hinaus sollten diese Systeme aus technischen Gründen als Flächensysteme ausgeführt werden, was bei vielen Gebäuden (z. B. Gebäudebestand, Mehrfamilien- oder Reihenhäuser) nicht möglich ist. Aus ökologischer Sicht ist die Erdreich-Direktverdampfung hinsichtlich möglicher Leckagen ungünstiger als ein Solekreislauf, da im Kältemittel, das durch die im Erdreich verlegten Rohrleitungen strömt, geringe Mengen des Schmiermittels für den Verdichter enthalten sein können. In den letzten Jahren ist bei einem nahezu konstanten Anteil der Wärmequelle Erdreich eine Verschiebung von der Direktverdampfung zu Sole-Systemen zu beobachten.

Auch in der *Schweiz* ist ein wachsender Anteil der Wärmequelle Erdreich zu beobachten, jedoch ist Luft als Wärmequelle weiterhin dominierend. An besonders kalten Wintertagen erfolgt die Bereitstellung der Wärme häufig durch eine elektrische Direktheizung. Gründe für den hohen Anteil der Wärmequelle Luft sind die geringen Kosten zur Erschließung und die untergeordnete Bedeutung der Jahresarbeitszahl aufgrund der nahezu CO₂-freien Stromversorgung in der Schweiz (vgl. Kapitel 3.1.3).

3.1.3 Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen

Für die ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe sind die vorgelagerten Ketten der Stromerzeugung von entscheidender Bedeutung. Die Frage, ob die Wärmepumpe zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen beitragen kann, ist sowohl von der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage als auch von Art und Zusammensetzung der Stromerzeugung abhängig. Aus diesem Grund sind in Abb. 3-5 für die Länder Deutschland, Österreich und die Schweiz die Anteile verschiedener Kraftwerkstypen an der Stromerzeugung dargestellt.



Quellen: /VDEW 2000/, /Österreichisches Statistisches Zentralamt 1999/ und /VSE 2000/

Abb. 3-5: Anteile verschiedener Kraftwerkstypen an der Stromerzeugung in Deutschland, Österreich und der Schweiz (ohne Außenhandel)

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Stromerzeugung in *Österreich* und der *Schweiz* im Gegensatz zu *Deutschland* nur zu einem geringen Anteil in fossilen Kraftwerken erfolgt. In *Österreich* werden im Jahresmittel zwei Drittel der elektrischen Energie in Wasserkraftwerken erzeugt. Es ist jedoch zu beachten, dass in der Heizperiode der Anteil der fossilen Kraftwerke etwas höher liegt /Neubart; Kaltschmitt 2000/. In der *Schweiz* wird nahezu die gesamte elektrische Energie CO₂-frei erzeugt.

Die Stromerzeugung in *Deutschland* erfolgt hingegen zu einem großen Teil in fossilen Kraftwerken, insbesondere in Stein- und Braunkohlekraftwerken. Somit werden deutlich höhere CO₂-Emissionen pro kWh elektrischer Energie freigesetzt. Um zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen im Bereich Raumwärme beizutragen, müssen elektrisch betriebene Wärmepumpenanlagen somit in *Deutschland* eine höhere Jahresarbeitszahl aufweisen als in den Nachbarländern.

Da die Art der Stromerzeugung einen wesentlichen Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit von Wärmepumpen-Systemen hinsichtlich der CO₂-Emissionen hat, wird der hier verwendete Kraftwerksmix in Kapitel 5 näher erläutert. In *Österreich* und der *Schweiz* wurde und wird die Wärmepumpe nicht zuletzt aufgrund des eindeutigen Beitrags zum Klimaschutz *politisch* mit Nachdruck gefördert - Ziel des Bundesamts für Energiewirtschaft in der *Schweiz* war z. B. eine jährliche Steigerung der Neuinstallationen von Wärmepumpen-Heizungen um 30 % in den neunziger Jahren. Für die deutsche Situation ist hingegen aufgrund des hohen Anteils

von Stein- und Braunkohle detailliert zu untersuchen, wie die Gesamtemissionsbilanz der Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen aussieht.

3.2 Angebot an Wärmepumpen

Zur Ermittlung technologischer und ökonomischer Daten von derzeit angebotenen Heizungswärmepumpen wurde eine Herstellerbefragung durchgeführt. Im folgenden werden zunächst Methodik und allgemeine Ergebnisse der Herstellerbefragung beschrieben. Anschließend werden die technologischen Daten für die einzelnen Systeme dargestellt.

3.2.1 Methodik der Herstellerbefragung

Die Befragung der Hersteller wurde schriftlich mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens (vgl. Anhang A) durchgeführt. Insgesamt wurden Fragebögen an 75 Hersteller in Deutschland, Österreich und der Schweiz verschickt.

Der Fragebogen umfasste allgemeine Fragen sowie Datenblätter zur Erfassung technologischer und ökonomischer Daten der angebotenen Wärmepumpen. Die Daten der ausgefüllten Fragebögen wurden in eine Datenbank eingegeben und mit Messwerten des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum in Töss (Schweiz) überprüft und wenn möglich ergänzt. Anschließend erfolgte die Auswertung und grafische Darstellung der Nennleistungen und Leistungszahlen der einzelnen Systeme.

3.2.2 Allgemeine Ergebnisse

Der Rücklauf der Herstellerbefragung betrug 33 % der versendeten Fragebögen. Die *Rücklaufquote* ist für eine schriftliche Befragung als durchschnittlich bis gut einzustufen. In den meisten Fällen wurde der Fragebogen von den Herstellern ausgefüllt, ansonsten wurden Firmenprospekte und technische Unterlagen zugesandt.

Ein Ergebnis der Umfrage und der Datensammlung ist, dass es in Deutschland, Österreich und der Schweiz nur eine geringe Zahl von Herstellern gibt. Häufig werden Wärmepumpen eines Herstellers unter verschiedenen Firmennamen bzw. von verschiedenen Firmen angeboten. Eine Anbieterliste befindet sich im Anhang B.

Von den Unternehmen, die bei der Umfrage geantwortet haben, sind 72 % Hersteller von Heizungswärmepumpen (Serienprodukte). Für 89 % dieser Hersteller liegen Daten zu den angebotenen Produkten vor. Dies sind *16 Unternehmen mit insgesamt 439 Anlagen*¹. Es

¹ Doppelzählungen sind möglich, da Sole-Wasser-Wärmepumpen teilweise auch als Wasser-Wasser-Wärmepumpen angeboten wurden.

handelt sich hierbei ausschließlich um Hersteller von elektrischen Kompressionswärmepumpen.

Da den Autoren nur ein Hersteller von Absorptionswärmepumpen in Deutschland bekannt ist, wurde hierzu kein standardisierter Fragebogen erstellt, sondern die technischen Unterlagen angefordert. Allerdings ist dieses Produkt aufgrund seiner Nennleistung für den Einsatz in den im folgenden betrachteten Wohngebäuden kaum geeignet und wird daher nicht näher betrachtet.

Neben den üblichen Wärmepumpen, bei denen Wasser als Wärmeträger bei der Wärmesenke (Heizungssystem) verwendet wird, bietet ein Hersteller auch eine Kompressionswärmepumpe für Luft als Wärmeträger bei der Wärmesenke an. Da eine solche Anlage jedoch nicht mit den hierzulande üblichen Zentralheizungen auf Warmwasserbasis kombinierbar ist, wird sie im folgenden ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Hinsichtlich *ökonomischer Daten* erscheint eine systematische Auswertung der ausgefüllten Fragebögen nur mit hohem Aufwand (d. h. detaillierten Rückfragen bei den Herstellern) möglich. Problematisch hinsichtlich eines Vergleichs der Investitionskosten ist die Art der Preisangaben durch die Hersteller. Einige Hersteller geben Preise für einzelne Baugruppen, andere für eine Zusammenfassung von Baugruppen oder die Gesamtanlage an. Da sich die vorliegenden Preise häufig nicht eindeutig bestimmten Baugruppen zuordnen lassen, wurde keine alle Systeme umfassende Auswertung der Investitionskosten durchgeführt. Jedoch werden die Preisangaben der Hersteller zur Bestimmung der Investitionskosten für die ökonomische Analyse verwendet (vgl. Kapitel 6).

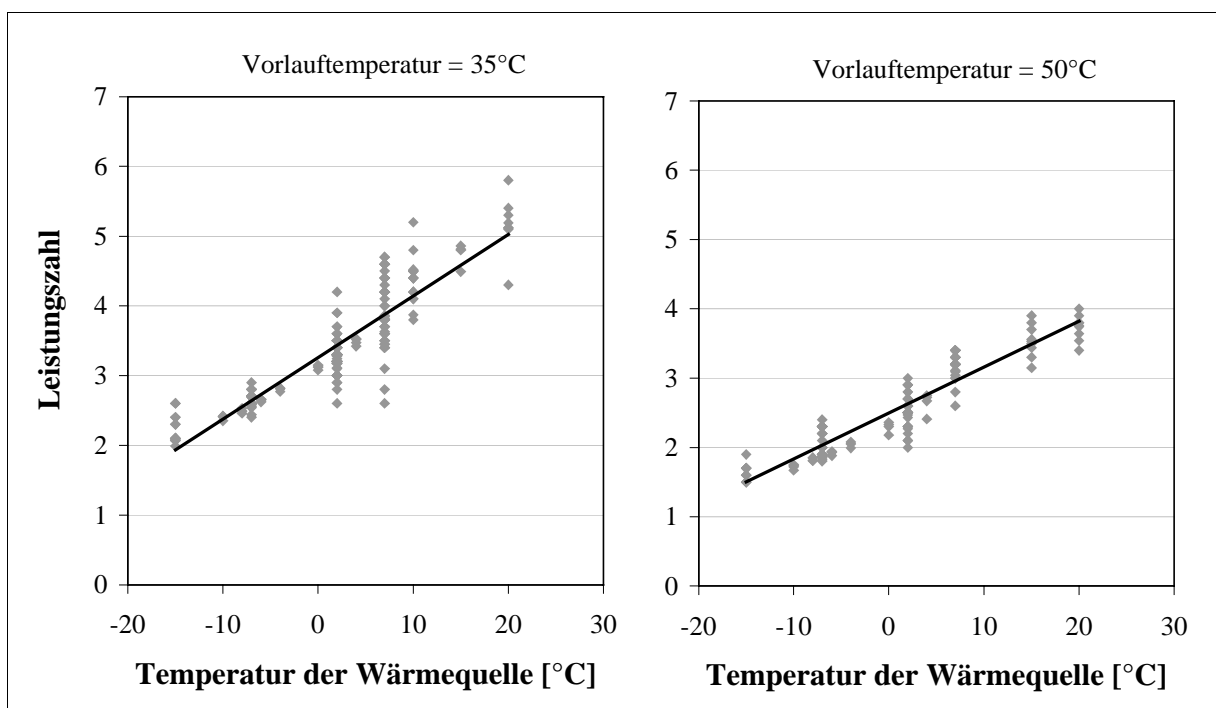
Wesentliche *technologische Daten* von Wärmepumpen sind der Leistungsbereich und die Leistungszahlen verfügbarer Anlagen. Die Ermittlung der Leistungszahlen erfolgt heute in der Regel nach /EN 255-2/. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Hersteller verbessert. In den Abb. 3-6 bis Abb. 3-8 sind für die Heizungswärmepumpen differenziert nach Wärmequelle und (bei Erdkollektoren) Art der Verdampfung die von den Herstellern angegebenen Leistungszahlen, teilweise ergänzt durch Messergebnisse des WPZ Töss /WPZ 2000/, grafisch dargestellt. Die Darstellung erfolgt für variable Quellentemperaturen bei zwei ausgewählten Wärmesenken-Temperaturen (d. h. Vorlauftemperaturen der Heizungsanlage).

Für die Regression durch die Datenpunkte wird vereinfachend ein linearer Verlauf angenommen. Da für einzelne Quellentemperaturen weniger Datenpunkte vorliegen als für andere, wird die Lage der Trendlinien durch diese besser dokumentierten Anlagen stärker beeinflusst als durch die restlichen Anlagen.

3.2.3 Wärmequelle Luft

Die Wärmepumpen für die Wärmequelle Luft werden entsprechend den verwendeten Wärmeträgern bei der Wärmequelle und –senke auch als Luft-Wasser-Wärmepumpen (kurz: A/W-Wärmepumpen) bezeichnet. Sie werden in einem *Nennleistungsbereich* zwischen 4 kW_{th} und 15 kW_{th}, in Einzelfällen bis 25 kW_{th} angeboten. Größere Leistungen werden dabei häufig durch eine Kombination mehrerer kleiner Wärmepumpen erzielt.

In Abb. 3-6 sind die *Leistungszahlen* von 83 Luft-Wasser-Wärmepumpen dargestellt. Wie erwartet steigt die Leistungszahl mit zunehmender Temperatur der Wärmequelle und mit abnehmender Vorlauftemperatur des Heizungssystems.



Quelle: Herstellerangaben zu 83 Heizungswärmepumpen

Abb. 3-6: Leistungszahlen von Luft-Wasser-Wärmepumpen

Auffällig sind die teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den Leistungszahlen verschiedener Anlagen, z. B. bei der Temperaturpaarung A2/W35 ($T_{\text{Luft}} = 2^\circ\text{C}$, $T_{\text{Wasser}} = 35^\circ\text{C}$). Hier beträgt die Leistungszahl der schlechtesten Anlage 2,6 und die der besten Anlage 4,2. Mögliche Gründe hierfür sind:

- die Messbedingungen (insbesondere die Temperaturdifferenz am Kondensator und die Berücksichtigung des Abtauvorgangs),
- das verwendete Kältemittel,
- der Entwicklungsstand der Anlagen und/oder
- die Nennleistung der Anlagen.

Die Wahl der Temperaturdifferenz am Kondensator bei der Leistungsmessung hat einen deutlichen Einfluss auf die Leistungszahl. Wird die Temperaturdifferenz am Kondensator,

d. h. an der Wärmesenke von 5 K auf 10 K erhöht, sinkt bei einer Vorlauftemperatur des Heizungskreislaufs von 35°C die mittlere Temperatur am Wärmetauscher von 32,5°C auf 30°C ab. Durch die geringere Temperaturdifferenz von 2,5 K zwischen Wärmequelle und Wärmesenke steigt die Leistungszahl um rund 20 %.²

Wärmepumpen mit der Wärmequelle Luft müssen bei niedrigen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit in gewissen Zeitabständen abgetaut werden. Wenn dieser Betriebszustand bei der Ermittlung der Leistungszahl nicht berücksichtigt wird, ergibt sich ebenfalls eine höhere Leistungszahl.

Zur Zeit sind die Wärmepumpenhersteller dabei die Anlagen auf neue Kältemittel umzustellen (vgl. Kapitel 2.1.1). Ein Teil der Leistungszahlen wurde für Anlagen mit neuen Kältemitteln ermittelt, ein Teil der Messergebnisse wurde für die bisher üblichen Kältemittel angegeben. Da der Einfluss des Kältemittels auf die Leistungszahl durchaus 10 % betragen kann, ist hierdurch sicherlich ein Teil der Streuung bedingt.

Zudem wurde die Wärmepumpentechnologie in den letzten Jahren beispielsweise durch neue Verdichterbauarten energetisch verbessert. Da der Austausch der Anlagen im Angebot der Hersteller jedoch sukzessive erfolgt, sind Anlagen unterschiedlicher Entwicklungsstufen dargestellt.

Als weiterer Einflussfaktor hinsichtlich der Leistungszahl ist die Nennleistung der Anlagen anzunehmen. Die statistische Auswertung der vorliegenden Daten hinsichtlich dieser Eigenschaft ergab jedoch keinen signifikanten Einfluss.

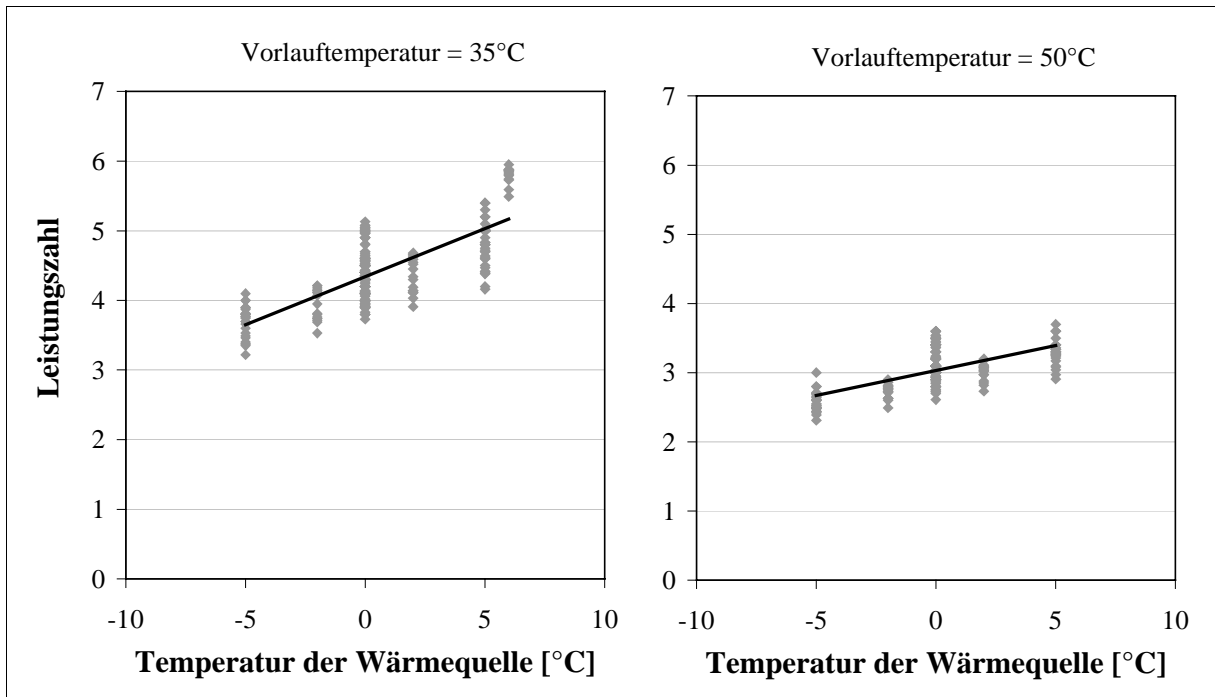
Insgesamt ist festzuhalten, dass die Streuung und die Mittelwerte der Leistungszahlen in Abb. 3-6 in einer vergleichbaren Größenordnung liegen wie die Messungen einzelner Anlagen im WPZ-Töss /WPZ 2000/.

3.2.4 Wärmequelle Erdreich mit Solekreislauf

Die hier betrachteten, sogenannten Sole-Wasser-Wärmepumpen (kurz: B/W-Wärmepumpen) mit Wärmequelle Erdreich und Sole-Zwischenkreislauf (s. Kapitel 2.2.1) sowie Wärmesenke Warmwasserheizung werden zumeist im *Nennleistungsbereich* zwischen 3 und 40 kW_{th} angeboten, in Einzelfällen bis etwa 100 kW_{th}. Auch hier ist bei hohen Leistungen eine Kombination mehrerer Wärmepumpen üblich, wodurch zum einen die Anzahl der Produktionsvarianten beschränkt und zum anderen die Versorgungssicherheit beim Anwender erhöht wird.

In Abb. 3-7 sind die *Leistungszahlen* von 191 Sole-Wasser-Wärmepumpen dargestellt. Die Leistungszahlen der Sole-Wasser-Wärmepumpen liegen etwas höher als die der Luft-Wasser-Wärmepumpen. Gründe hierfür sind

² Hinsichtlich einer besseren Vergleichbarkeit der Leistungszahlen sollte hier eine Temperaturdifferenz am Verdichter von beispielsweise 5 K vorgegeben werden.



Quelle: Herstellerangaben zu 191 Heizungswärmepumpen

Abb. 3-7: Leistungszahlen von Sole-Wasser-Wärmepumpen

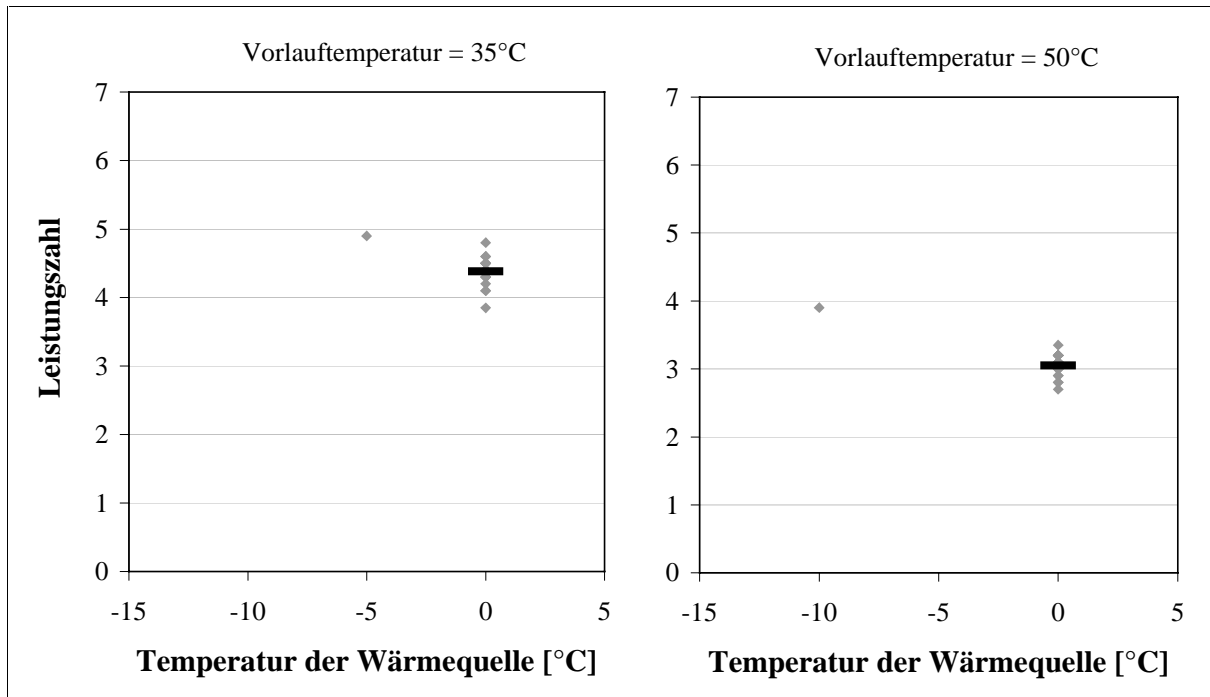
- dass im Gegensatz zu Luft-Wasser-Wärmepumpen die Antriebsenergie für einen Ventilator entfällt und der Energieverbrauch für die Sole-Umwälzpumpe nicht in der Leistungszahl berücksichtigt wird und
- ein Abtauen der Wärmequelle nicht erforderlich ist.

3.2.5 Wärmequelle Erdreich mit Direktverdampfung

Die größte Zahl der Erdreich-Direktverdampfungs-Wärmepumpen wird im *Nennleistungsbereich* zwischen 2 und 28 kW_{th} angeboten, in einzelnen Fällen auch bis etwa 45 kW_{th}.

In Abb. 3-8 sind die *Leistungszahlen* von 15 Erdreich-Direktverdampfungs-Wärmepumpen dargestellt. Entgegen den Erwartungen aus der Technologieanalyse in Kapitel 2.2.1 liegen die Leistungszahlen der analysierten 25 Heizungswärmepumpen bei einer Quellentemperatur von 0°C auf gleichem Niveau wie die der Sole-Wasser-Wärmepumpen. Im praktischen Betrieb kann jedoch aufgrund der direkten Wärmeübertragung vom Erdreich auf das Arbeitsmittel ein höheres Temperaturniveau genutzt werden.

Die auffällig hohen Leistungszahlen bei einer Quellentemperatur von -5 bzw. -10°C sind von einem Hersteller, der keine Angaben für eine Quellentemperatur von 0°C gemacht hat. Aufgrund des Unterschieds ist hier möglicherweise von anderen Messbedingungen auszugehen.



Quelle: Herstellerangaben für 25 Heizungsärmepumpen

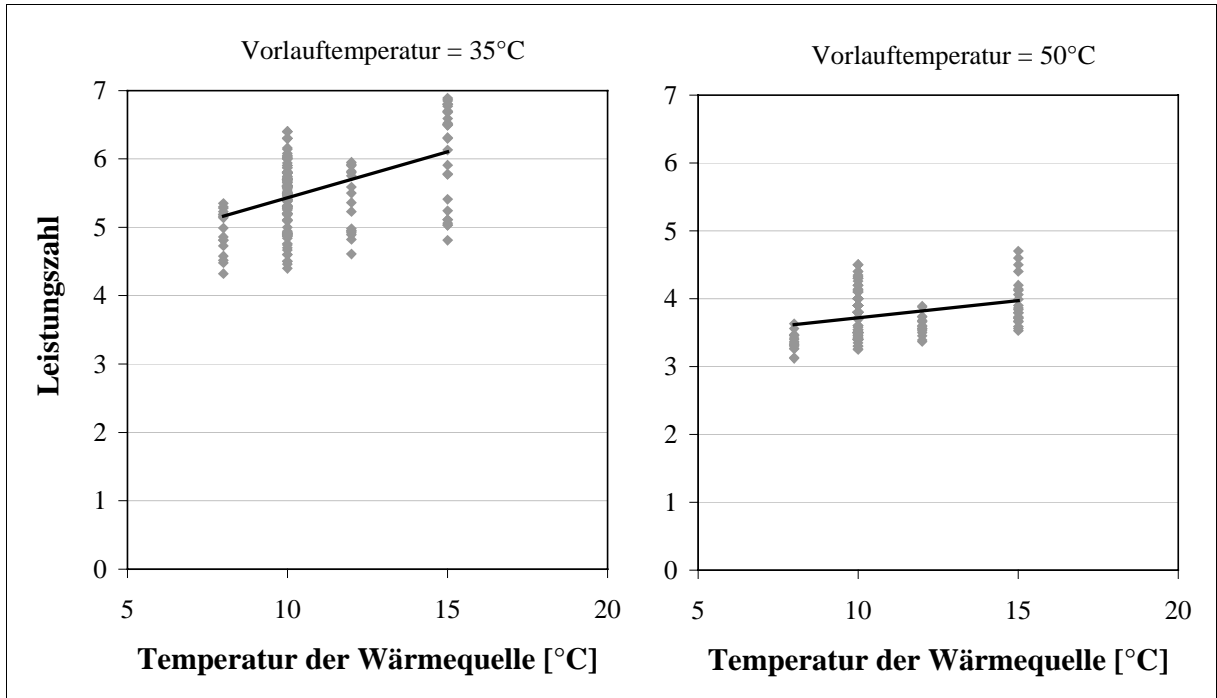
Abb. 3-8: Leistungszahlen von Erdreich-Direktverdampfungs-Wärmepumpen

3.2.6 Wärmequelle Wasser

Die sogenannten Wasser-Wasser-Wärmepumpen (kurz: W/W-Wärmepumpen) werden zu meist mit *Nennleistungen* zwischen 5 und 50 kW_{th} angeboten, in Einzelfällen bis etwa 150 kW_{th}. Auch hier ist bei hohen Leistungen eine Kombination mehrerer Wärmepumpen üblich.

In Abb. 3-9 sind die *Leistungszahlen* von 165 Wasser-Wasser-Wärmepumpen dargestellt. Hierbei handelt es sich zu einem geringen Teil um Geräte, die auch als Sole-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt werden können und deren Daten entsprechend auch in Abb. 3-7 verwendet wurden. Allerdings werden Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei einem höheren Temperaturniveau der Wärmequelle eingesetzt. Dies ist auch der Grund, warum die dargestellten Leistungszahlen bei W/W-Wärmepumpen höher sind als bei B/W-Wärmepumpen.

Besonders deutlich wird hier der Einfluss der Wärmesenktemperatur (Heizungssystem) auf die Leistungszahl der Wärmepumpen. Bei der günstigen Kombination von Wasser-Wasser-Wärmepumpen mit einer Fußbodenheizung lassen sich Leistungszahlen zwischen 5 und 6 erreichen. Zusätzlich muss allerdings noch ein geringer Energiebedarf für die Förderpumpe berücksichtigt werden.



Quelle: Herstellerangaben zu 165 Heizungsärmepumpen

Abb. 3-9: Leistungszahlen von Wasser-Wasser-Wärmepumpen

4 Versorgungsaufgaben und Versorgungssysteme

Der ökologische und ökonomische Vergleich von Wärmepumpenanlagen mit anderen Heizungssystemen wird anhand von Referenzsystemen durchgeführt, die für konkrete Versorgungsaufgaben ausgelegt werden. Als Versorgungsaufgaben werden dabei vier Gebäude mit unterschiedlichem Heizwärmebedarf festgelegt; als Versorgungssysteme werden neben Wärmepumpenanlagen öl- und gasbefeuerte Kessel sowie Holzpelletkessel betrachtet. Im folgenden werden in Kapitel 4.1 die ausgewählten Versorgungsaufgaben beschrieben sowie in Kapitel 4.2 die entsprechenden Heizungssysteme zur Raumwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung³ definiert.

4.1 Definition der Versorgungsaufgaben

Nach der Auswahl und Beschreibung von vier typischen Versorgungsaufgaben für den Einsatz von Wärmepumpenanlagen in Kapitel 4.1.1 wird in Kapitel 4.1.2 der Heizwärmebedarf der Versorgungsaufgaben nach DIN EN 832 und WSVO 95 berechnet sowie in Kapitel 4.1.3 der Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung bestimmt.

4.1.1 Auswahl der Gebäude

Die bisherigen Erfahrungen mit Wärmepumpen zeigen, dass diese überwiegend in Neubauten und dort vor allem in Einfamilienhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern installiert werden (vgl. Kapitel 3.1) Die dort notwendigen Heizleistungen entsprechen auch den Wärmeleistungen, der derzeit am Markt verfügbaren Wärmepumpenanlagen (vgl. 3.2). Daher werden in dieser Studie der Neubau eines Einfamilienhauses sowie eines kleinen Mehrfamilienhauses nach den Vorgaben der Wärmeschutzverordnung 1995 /WSVO 95/ als Versorgungsaufgaben betrachtet (vgl. Tabelle 4-1).

Die Mehrzahl aller neuen Heizungsanlagen wird jedoch nicht in Neubauten installiert sondern in existierende Gebäude. Daher ist auch zu untersuchen, inwiefern die Wärmepumpe eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative bei der Heizungsmodernisierung darstellt. Dies wird im folgenden anhand zweier typischer bestehender Gebäude untersucht. Als „Altbauten“ werden dabei ein Ein- und ein Mehrfamilienhaus, Baujahr 1980 gewählt, deren Heizungsanlagen i. Allg. die Abgasverlustgrenzwerte nach § 11 und § 23 der 1. BImSchV (Verordnung über Kleinf Feuerungsanlagen) /1. BImSchV 1997/ nicht mehr ein-

³ Aus Sicht der Autoren wäre die Bezeichnung „Nutzenergiebedarf für die Brauchwassererwärmung“ treffender. Da die Berechnungen gemäß /VDI 2067-12 2000/ erfolgen, wird trotz Vorbehalten die Bezeichnung „Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung“ gemäß /VDI 2067-12 2000/ verwendet. Dies beinhaltet den „Warmwasser-Nutzenergiebedarf für Körperreinigung und -pflege sowie Reinigung und Pflege im Haushalt“ (S. 2).

halten und somit in den nächsten Jahren erneuert werden müssen. Um möglichst repräsentative Gebäude dieser Altersklasse auszuwählen, werden diese entsprechend der IWU-Gebäudetypologie (Institut Wohnen und Umwelt /IWU 1990/) definiert. Die IWU-Gebäudetypologie führt dabei eine Einteilung des Gebäudebestandes für Deutschland in Typgebäude (Typ A bis H) auf Grundlage von unterschiedlichen Bauform (z. B. Einfamilien-, Reihen- oder Mehrfamilienhaus) und Baualtersklassen durch.

Um den Einsatz einer Wärmepumpenheizungsanlage unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu ermöglichen, ist es bei Altbauten meist sinnvoll den Ersatz des Wärmeerzeugers mit einer Verbesserung des Wärmedämmstandards des Gebäudes zu kombinieren. Durch die Senkung des Heizwärmebedarfs kann das bestehende Wärmeverteilsystem mit niedrigeren Temperaturen betrieben werden und somit – aufgrund der geringeren Temperaturspreizung zwischen Heizungsvorlauf und Wärmequelle - die Wärmepumpe mit einer höheren Jahresarbeitszahl betrieben werden. Prinzipiell können dabei unterschiedlichste Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmedämmstandards realisiert werden (u. a. Austausch der Fenster, Dämmung von Außenwänden, Kellerdecken, Dachstuhl). Hier wird unterstellt, dass – unabhängig von der letztendlich umgesetzten Maßnahme - der Wärmebedarf im Vergleich zu dem nach IWU definierten Gebäuden um etwa 20 % gesenkt und damit die Vorlauftemperatur des Heizsystems von 70°C auf 55 °C reduziert werden kann.

Tabelle 4-1: Auswahl der Versorgungsaufgaben

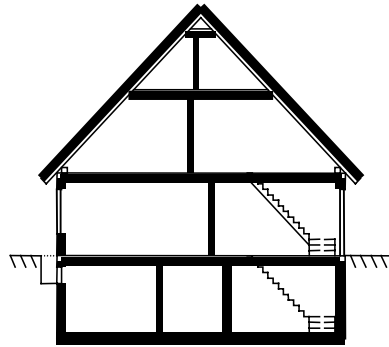
Versorgungsaufgabe	Beschreibung
EFH 95	Neubau eines Einfamilienhauses nach Vorgaben der WSVÖ 95
MFH 95	Neubau eines kleinen Mehrfamilienhauses nach Vorgaben der WSVÖ 95
EFH 80	Einfamilienhaus (Baualtersklasse 1979-83) entsprechend IWU-Typgebäude unter Annahme von nachträglichen energiesparenden Maßnahmen an der Gebäudehülle
MFH 80	Kleines Mehrfamilienhaus (Baualtersklasse 1979-83) entsprechend IWU-Typgebäude unter Annahme von nachträglichen energiesparenden Maßnahmen an der Gebäudehülle

Einfamilienhaus nach Wärmeschutzverordnung 95 (EFH 95)

Das 1995 errichtete freistehende Einfamilienhaus (EFH 95) wurde nach den Vorgaben der derzeit gültigen WSVÖ 95 errichtet. Das eingeschossige und vollständig unterkellerte Haus weist dabei eine beheizte Wohnfläche von knapp 145 m² gemäß II. Berechnungsverordnung auf /II. BV 1996/. Das Kellergeschoss wird nicht beheizt. Tabelle 4-2 zeigt die wesentlichen wärmetechnischen Daten der Versorgungsaufgabe EFH 95. Grundriss des Unter-, Erd- und Dachgeschosses sowie die Seitenansicht des Gebäudes sind in Abb. 4-1 dargestellt.

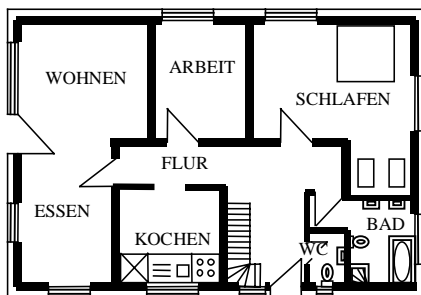
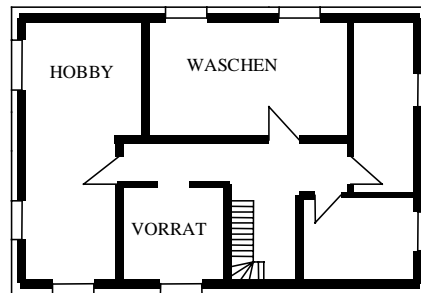
Tabelle 4-2: Wärmetechnische Daten des Gebäudes EFH 95

Bauteil	Fläche [m ²]	u-Wert [W/(m ² K)]	g-Wert [-]
Außenwand	121	0,32	-
Fenster	30	1,80	0,7
Geschossdecke / Grundfläche	96	0,29	-
Dach	134	0,19	-



Bauwerksvolumen	V	512 m ³
Umfassungsfläche	A	381 m ²
Oberfläche / Volumen	A/V	0,74 m ⁻¹

UG



EG

DG

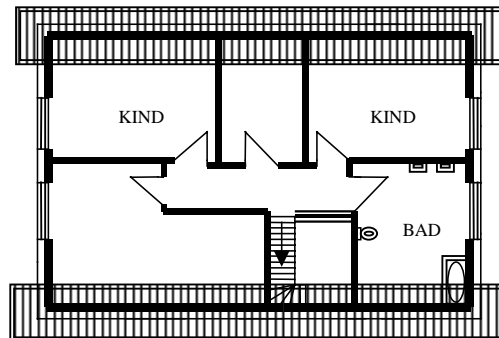


Abb. 4-1: Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes EFH 95

Mehrfamilienhaus nach Wärmeschutzverordnung 95 (MFH 95)

Das vollständig unterkellerte dreigeschossige Mehrfamilienhaus Baujahr 1995 (MFH 95) mit sechs Wohneinheiten besitzt eine beheizte Wohnfläche von rund 412 m² und wird über ein Treppenhaus erschlossen. Treppenhaus und Kellergeschoss werden dabei als nicht beheizte Zonen berücksichtigt. Eine ausführliche Analyse zum Energieverbrauch und zum Nutzerverhalten dieses Mehrfamilienhauses ist in /Leven 1998/ dargestellt. Tabelle 4-3 und Abb. 4-2 zeigen die wesentlichen Kenngrößen sowie Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes.

In den Wohnungen im Erd- und Obergeschoss ist ein einfaches mechanisches Lüftungssystem eingebaut. Durch Außenluftdurchlässe strömt Außenluft in Wohnraum, Schlafraum und Kinderzimmer. Aus diesen Räumen wird die Luft durch Überströmöffnungen in Küche und Bad und von dort mit je einem Lüfter ins Freie gefördert. Das Öffnen oder Schließen der Außenluftdurchlässe und die Wahl der Leistungsstufen der beiden Abluftventilatoren ermöglicht eine bedarfsangepasste Lüftung.

Die Dachgeschosswohnungen verfügen über ein zentrales Abluftsystem. In Wohn- und Schlafraum strömt durch feuchtegeregelter schlitzförmige Außenluftdurchlässe Luft ein. Die Luft wird durch Überströmöffnungen zu Küche und Bad und von dort durch ebenfalls feuchtegeregelter Abluftelemente über einen Luftkanal in eine zentrale Lüfterbox und von dort ins Freie gefördert. Dieses Lüftungssystem arbeitet völlig selbständig und kann von den Bewohnern nur ein- und ausgeschaltet werden /Leven 1998/.

Einfamilienhaus 1980 (EFH 80)

Das Einfamilienhaus 1980 (EFH 80) basiert auf dem entsprechenden Einfamilienhaus-Typgebäude der Baualtersklasse 1979-1983 von /IWU 1990/. Das freistehende Gebäude ist unterkellert und besitzt eine beheizte Wohnfläche von rund 118 m², wobei das Untergeschoss unbeheizt ist. Gegenüber dem Ist-Zustand nach IWU wurden am Gebäude Verbesserungen der Dämmung vorgenommen, so dass der Wärmebedarf um ca. 20 % gegenüber der IWU-Variante reduziert werden konnte. Charakteristische Daten der Versorgungsaufgabe EFH 80 sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

Mehrfamilienhaus 1980 (MFH 80)

Die Versorgungsaufgabe Mehrfamilienhaus Baujahr 1980 (MFH 80) geht, wie das Einfamilienhaus, von einem IWU-Typgebäude, dem kleinen Mehrfamilienhaus der Baualtersklasse 1979-1983, aus. Das Mehrfamilienhaus mit einer beheizten Wohnfläche von rund 315 m² ist unterkellert. Die sechs Wohneinheiten sind über ein unbeheiztes Treppenhaus erschlossen. Entsprechend dem EFH 80 wird auch hier gegenüber der IWU-Variante eine Verbesserung des Wärmedämmstandards unterstellt, welche zu eine Senkung der Heizwärmenachfrage um

knapp 20 % führen. Die wesentlichen wärmetechnischen Angaben des Mehrfamilienhauses 80 sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Abb. 4-4 zeigt die Seitenansicht und Grundrisse des Gebäudes MFH 80.

Tabelle 4-3: Wärmetechnische Daten des Gebäudes MFH 95

Bauteil	Fläche [m ²]	u-Wert [W/(m ² K)]	g-Wert [-]
Außenwand	430	0,26	-
Fenster	93	1,60	0,62
Geschossdecke / Grundfläche	154	0,85	-
Dach	255	0,19	-

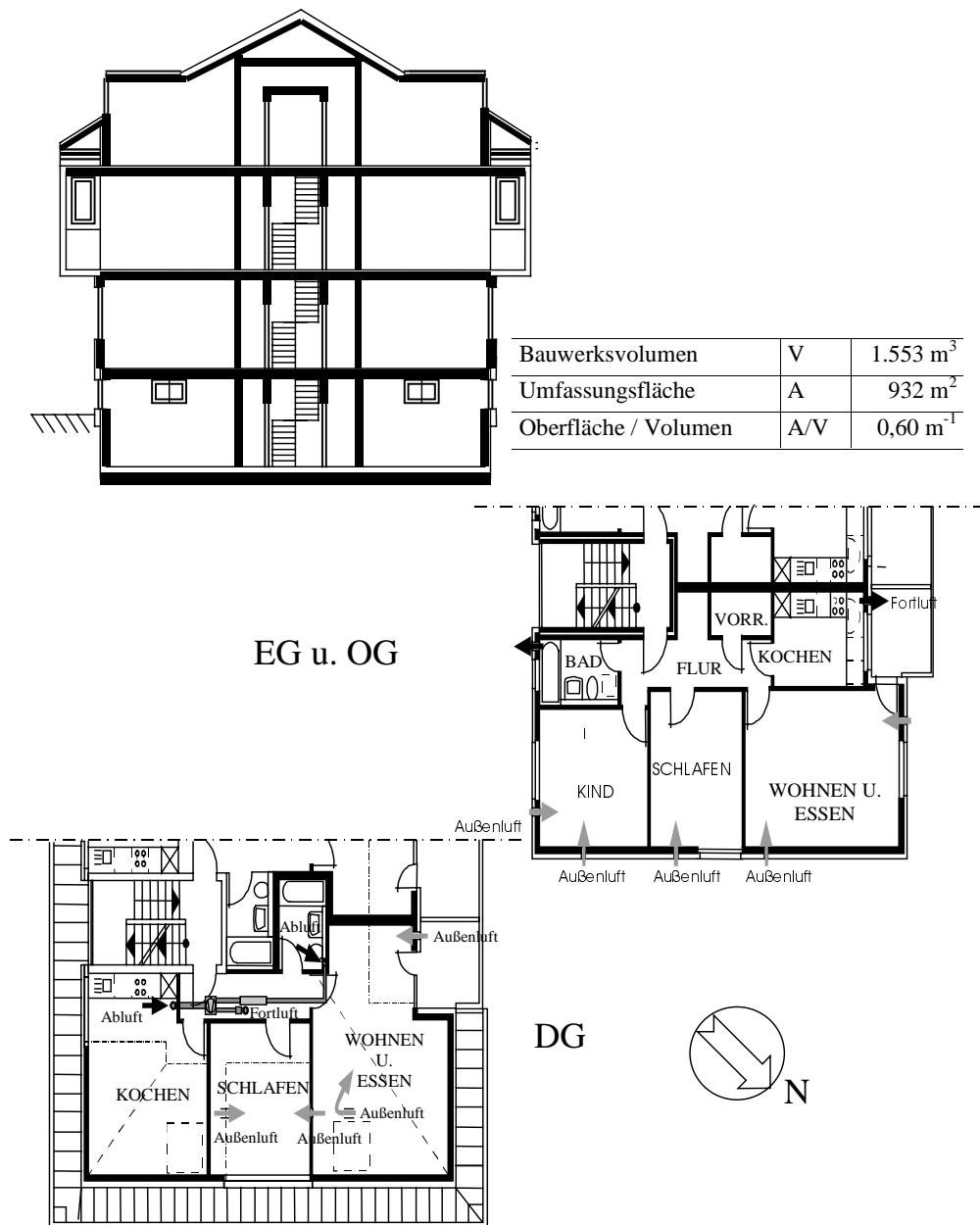
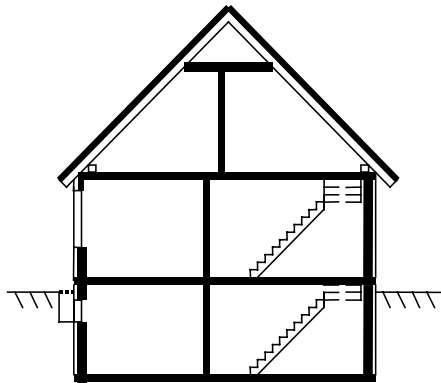


Abb. 4-2: Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes MFH 95

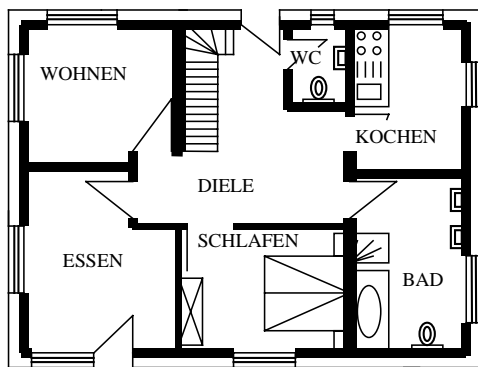
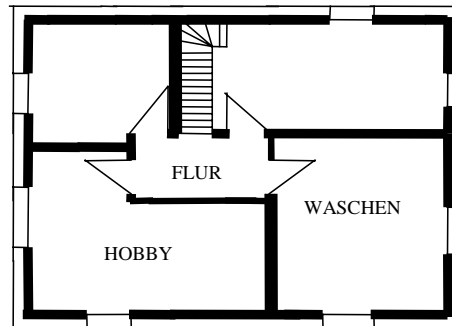
Tabelle 4-4: Wärmetechnische Daten des Gebäudes EFH 80

Bauteil	Fläche [m ²]	u-Wert [W/(m ² K)]	g-Wert [-]
Außenwand	107	0,81	-
Fenster	27	1,80	0,67
Geschossdecke / Grundfläche	92	0,50	-
Dach	138	0,19	-

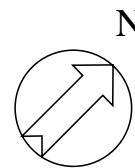


Bauwerksvolumen	V	437 m ³
Umfassungsfläche	A	364 m ²
Oberfläche / Volumen	A/V	0,83 m ⁻¹

UG



EG



DG

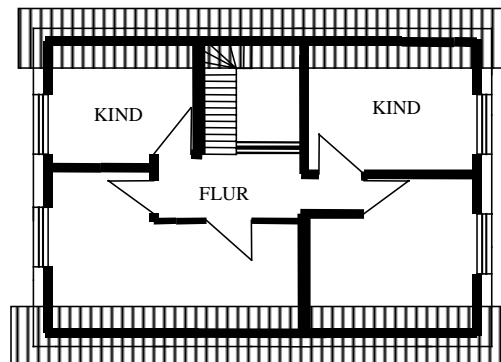
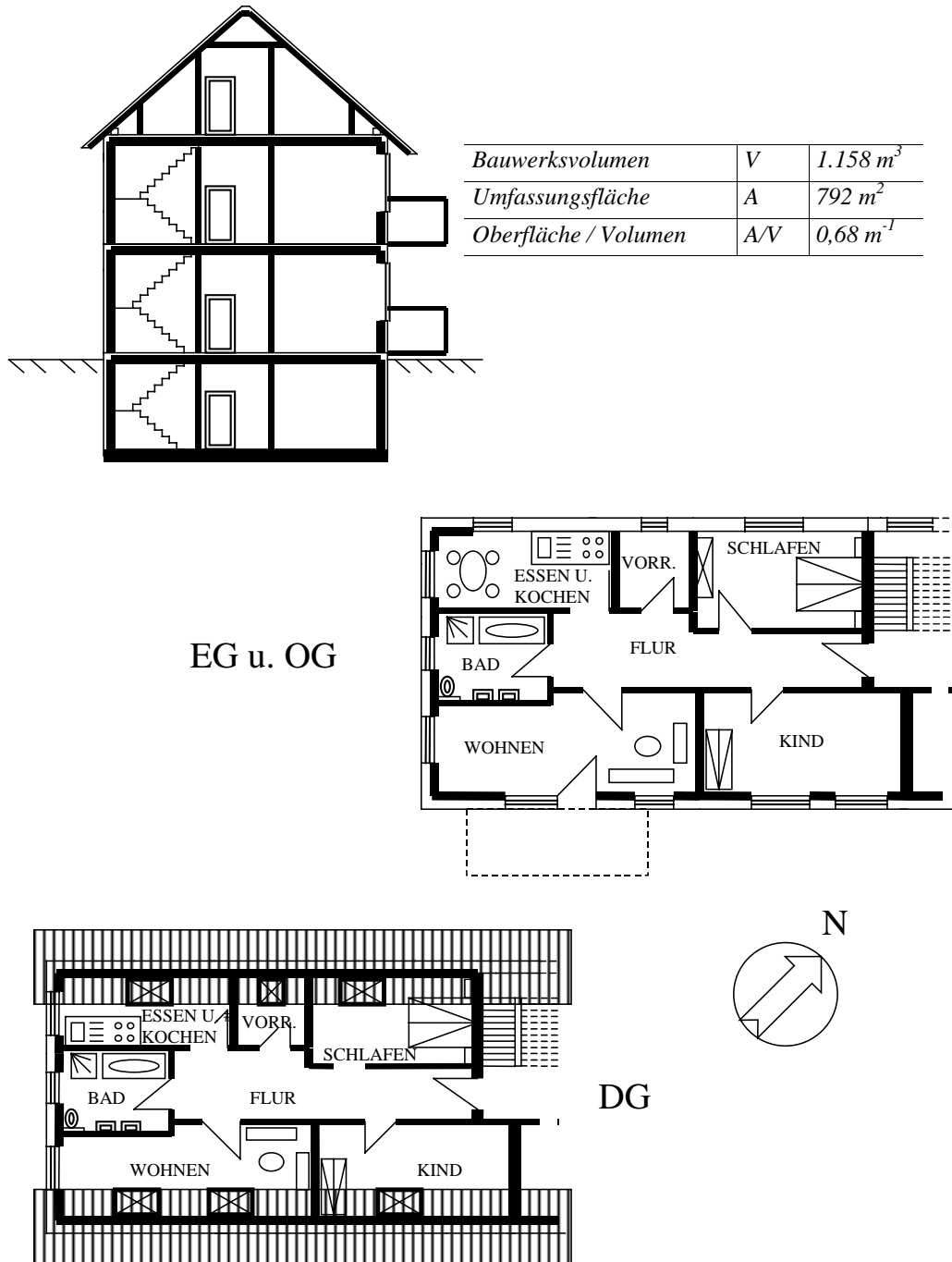


Abb. 4-3: Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes EFH 80

Tabelle 4-5: Wärmetechnische Daten des Gebäudes MFH 80

Bauteil	Fläche [m ²]	u-Wert [W/(m ² K)]	g-Wert [-]
Außenwand	311	0,80	-
Fenster	97	1,50	0,75
Geschossdecke / Grundfläche	180	0,50	-
Dach	204	0,30	-

**Abb. 4-4:** Seitenansicht und Grundriss des Gebäudes MFH 80

4.1.2 Normheizlast und Heizwärmebedarf der Gebäude

Die wichtigste Grundlage für die Auslegung heiztechnischer Anlagen ist die Berechnung der Normheizlast des Gebäudes gemäß /DIN 4701 1995/. Für die vier zu untersuchenden Gebäude ergeben sich nach DIN 4701 die in Tabelle 4-6 angeführten Heizlasten. Für die beiden Einfamilienhäuser liegen die Normheizlasten bei ca. 6,5 und 7,9 kW, für das MFH 95 bei ca. 16,5 kW und für das MFH 80 bei etwa 21,6 kW. Diese sind ein Maß für die maximale Heizleistung im Jahresverlauf.

Tabelle 4-6: Normheizlast der zu untersuchenden Gebäude

Bezeichnung	Einheit	EFH 95	MFH 95	EFH 80	MFH 80
Normheizlast	kW	6,47	16,46	7,86	21,55

Der rechnerisch ermittelte Aufwand an Wärme, der zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Raumlufttemperatur während eines gesamten Jahres benötigt wird, wird als Heizwärmebedarf bezeichnet /DIN 4108-6 1995/. Es handelt sich also um jene Wärmemenge, die vom Heizsystem *jährlich* zur Beheizung des Gebäudes bereitzustellen ist. Zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs werden in der Praxis u. a. die Berechnungsverfahren nach /WSVO 1995/ und das Monatsbilanzverfahren nach /DIN EN 832 1998/ eingesetzt. Im folgenden sollen kurz die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren skizziert werden. Dann werden die Vorgehensweise und die wesentlichen Eingabeparameter dargestellt und die Ergebnisse für den Heizwärmebedarf der ausgewählten Versorgungsaufgaben präsentiert.

Um die Unterschiede der Berechnungen des Jahresheizwärmebedarfs nach WSVO 95 und DIN EN 832 aufzuzeigen, werden zunächst beide Verfahren berücksichtigt. Für die weiteren Berechnungen werden die Ergebnisse des Jahresheizwärmebedarfs ausschließlich nach DIN EN 832 verwendet.

Vergleich der Rechenverfahren nach WSVO 95 und DIN EN 832

Die dritte Wärmeschutzverordnung, die seit 1. Januar 1995 in Kraft ist (WSVO 95), definiert nationale Anforderungen mit vorgegebenen festen Randbedingungen zum Jahresheizwärmebedarf für Gebäude mit normalen Innentemperaturen ($\geq 19\text{ }^{\circ}\text{C}$). Mit Einführung der derzeit diskutierten Energieeinsparverordnung (EnEV 2000) wird eine Senkung des maximal zulässigen Jahresheizwärmebedarfs um 25 bis 35 % gegenüber der WSVO 95 angestrebt.

Mit dem Verfahren nach DIN EN 832 wird der Jahresheizwärmebedarf von Wohngebäuden mittels monatlicher Bilanzierung berechnet. Diese Norm erlaubt im Vergleich zur WSVO 95 eine wesentlich genauere Bilanzierung sowohl der baulichen als auch lüftungstechnischen Komponenten. Ergänzend können Angaben zum Standort (Klima), zur Nutzung

(Innentemperatur, Temperaturabsenkung, interne Wärmegewinne) und zu den Lüftungseinrichtungen des Gebäudes variiert werden, die in der WSVO 95 weitgehend fest vorgegeben sind. In Tabelle 4-7 sind die wesentlichen Unterschiede der beiden Berechnungsverfahren nach WSVO 95 und DIN EN 832 dargestellt.

Tabelle 4-7: Unterschiede zwischen den Rechenverfahren nach WSVO 95 und DIN EN 832

Bezeichnung	WSVO 95	DIN EN 832
Referenzregionen	1	14
Luftwechsel	0,8 h ⁻¹	monatlich wählbar
Innentemperatur	20 °C	monatlich wählbar
Innere Wärmegewinne	fest	monatlich wählbar
Fensterorientierung	3 Werte	Beliebig
Bilanzzeitspanne	Jahr	Monat und Jahr
Ausnutzungsfaktor für Wärmegewinne	fest	abhängig von der spezifischen Wärmekapazität
Wärmebrücken	pauschal	Genau
RLT-Angabe	3 Arten	Beliebig
Luftdichtheit	-	Messwerte variabel
Nachtabsenkung	pauschal	Zeitdauer und Temperatur variabel

nach /RWE 1998/

Vorgehensweise und Eingabeparameter

Für die Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs wird die Software HELENA 3.0 /HELENA 3.0 2000/ verwendet. Damit können Wärmeschutznachweise und Wärmebedarfsausweise (nach § 12 Wärmeschutzverordnung) für alle Berechnungsverfahren der WSVO 95 erstellt und ausgegeben werden. Mit den selben Daten für die Bauteile und ergänzenden Angaben (z. B. Wärmebrücken) können mit HELENA 3.0 auch der Jahreheizwärmebedarf von Wohngebäuden nach der DIN EN 832 berechnet werden.

Tabelle 4-8 zeigt die wesentlichen Eingabeparameter, die zur Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs der vier Versorgungsaufgaben notwendig sind.

Tabelle 4-8: Wesentliche Eingabegrößen zur Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs

Bezeichnung	Einheit	EFH 95	MFH 95	EFH 80	MFH 80
Temperaturzonen im Gebäude	-	2	8	2	8
Klimaregion gemäß DIN 4108-6	-	TRY Deutschl.	TRY Deutschl.	TRY Deutschl.	TRY Deutschl.
Beheizte Wohnfläche nach II.BV	m ²	145	412	118	315
Bruttogebäudevolumen	m ³	512	1.553	437	1.158
Wärmeübertragende Umfassungsfläche	m ²	381	932	364	792
Oberfläche / Volumen	m ⁻¹	0,74	0,60	0,83	0,68
Innenlufttemperatur	°C	20	20	20	20
Luftwechsel	h ⁻¹	0,8	Lüftungs- anlage	0,8	0,8
Interne Wärmequellen (bezogen auf die beheizte Wohnfläche)	W/m ²	4,5	4,5	4,5	4,5

Im folgenden werden die in Tabelle 4-8 aufgeführten Eingabeparameter näher erläutert.

- Die beiden Einfamilienhäuser weisen jeweils zwei Temperaturzonen im Gebäude auf. Dabei ist der Wohnbereich als beheizte Zone und das Kellergeschoss als unbeheizte Zone ausgewiesen. Bei den beiden Mehrfamilienhäusern sind die sechs Wohnungen jeweils als einzelne beheizte Zonen definiert, während Treppenhaus und Kellerbereich als unbeheizte Zonen gelten.
- Der Jahresheizwärmebedarf wird auf das Referenzklima TRY (test referenz year) Deutschland gemäß DIN V 4108-6 bezogen /DIN 4108-6 1995/. In die Berechnungen werden die monatlichen Mittelwerte der Außentemperatur und die monatliche Globalstrahlung je Flächeneinheit für die jeweilige Himmelsrichtung und Neigung berücksichtigt.
- Die Innentemperatur der beheizten Räume wird auf 20 °C festgelegt, während für unbeheizte Zonen die Innentemperatur berechnet wird.
- Für die wärmetechnischen Daten der einzelnen Außenflächen werden die Daten aus Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-5 verwendet.
- Für die beiden Einfamilienhäuser und das MFH 80 wird entsprechend WSV0 95 und DIN 4108-6 von einem Luftwechsel von 0,8 h⁻¹ ausgegangen, während die /DIN 4701 1995/ zur Berechnung der Heizlast mit einem Luftwechsel von nur 0,5 h⁻¹ rechnet. Für das MFH 95 erfolgt aufgrund der mechanischen Lüftungsanlage eine gesonderte Betrachtung. Durch den monatlich wählbaren Luftwechsel nach DIN EN 832 werden für die Lüftungsanlage in HELENA 3.0 folgende Parameter zur Berechnung

herangezogen: Die tägliche Betriebsdauer der Lüftungssysteme wird für die Heizperiode (September bis einschließlich Mai) mit 24 Stunden angesetzt. Bei den in Tabelle 4-9 angegebenen Volumenströmen entspricht dies einem Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$. In den Monaten Juni bis August (keine Heizperiode) wird von einem freien Luftwechsel von $0,8 \text{ h}^{-1}$ ausgegangen.

- Die internen Wärmegewinne werden mit $4,5 \text{ W je m}^2_{\text{beh. Wohnfläche}}$ für alle vier Gebäude gleichermaßen berücksichtigt. Sie beinhalten die Wärmeabgaben von Personen, Geräten, Beleuchtung usw.

Tabelle 4-9: Eingabegrößen für die Lüftungssysteme des Gebäudes MFH 95

Bezeichnung	Einheit	Erd- und Obergeschoss	Dachgeschoss
Betriebsvolumenstrom	m^3/h	95	90
Zuluftvolumenstrom	m^3/h	95	90
Abluftvolumenstrom	m^3/h	95	90
Luftwechsel bei 50 Pa	1/h	1,0	1,6
Windschutzkoeffizient	-	0,07	0,07
Fassadenkoeffizient	-	15	15
Wärmerückgewinnungsgrad	%	0	0
Mittlere Leistungsaufnahme des Ventilators	W	50	50

Jahresheizwärmebedarf der Gebäude

Aus den Eingabegrößen und der Modellierung der vier Versorgungsaufgaben EFH 95, MFH 95, EFH 80 und MFH 80 ergeben sich nach WSVO 95 und DIN EN 832 die in Tabelle 4-10 zusammengefassten Werte für den Jahresheizwärmebedarf.

Für die beiden Neubauten (EFH 95 und MFH 95) ergibt sich ein Heizwärmebedarf, der den zulässigen Heizwärmebedarf nach WSVO 95 um 10 % bzw. 11 % unterschreitet. Damit sind diese Gebäude von ihrem Dämmstandard her zwischen der derzeit gültigen Wärmeschutzverordnung und dem im Rahmen der Energieeinsparverordnung angestrebten Niedrigenergiehausstandard angesiedelt.

Beim EFH 80 liegt der Heizenergiebedarf in der untersuchten Variante noch 35 % über dem zulässigen Wert der WSVO 95, während beim MFH 80 dieser um rund 34 % überschritten wird. Somit handelt es sich hier um Altbauten, die zwar schon wärmetechnisch verbessert wurden, aber dennoch hinter den Anforderungen an Neubauten deutlich zurückbleiben.

Tabelle 4-10: Jahresheizwärmebedarf der betrachteten Gebäude

Berechnung nach WSVO 95					
		EFH 95	MFH 95	EFH 80	MFH 80
Heizwärmebedarf nach WSVO 95	kWh/a	12.156	33.705	16.697	39.919
Heizwärmebedarf nach WSVO 95 bezogen auf die Gebäudenutzfläche	kWh/m ² a	74,1	67,8	119,4	107,7
Abweichung von der WSVO 95	%	- 11	- 10	+ 35	+ 34
Berechnung nach DIN EN 832					
Heizwärmebedarf nach DIN EN 832	kWh/a	15.158	30.131	20.308	46.662
Heizwärmebedarf nach DIN EN 832 bezogen auf die beheizte Wohnfläche	kWh/m ² a	104,3	73,1	172,4	128,5

Tabelle 4-10 macht auch deutlich, dass sich der Jahresheizwärmebedarf der vier Gebäude nach WSVO 95 und DIN EN 832 deutlich unterscheidet, obwohl für das jeweilige Gebäude die gleichen Parameter definiert wurden. Der nach WSVO 95 berechnete flächenbezogene Heizwärmebedarf wird nach /Feist 1997/ als zu niedrig angesehen, da die anrechenbare Gebäudenutzfläche A_N nach WSVO 95 - berechnet aus dem beheizten Gebäudevolumen und dem Umrechnungsfaktor 0,32 - um etwa 10 % bis 60 % größer ist, als die reale Wohnfläche. Die starke Abweichung resultiert daraus, dass der Umrechnungsfaktor von 0,32 zu hoch angesetzt ist. Bei einer lichten Raumhöhe von 2,6 m und einer Deckenstärke von 20 cm ergibt sich bereits für das Verhältnis Brutto-Grundfläche zu Brutto-Bauwerksvolumen ein Wert von 0,36 /Feist 1997/. Aber auch die absoluten Werte für den Jahresheizwärmebedarf weichen deutlich voneinander ab.

Für die beiden Einfamilienhäuser und das MFH 80 liegen die Werte des Heizwärmebedarfs nach DIN EN 832 um rund 14 bis 20 % höher als nach WSVO 95. Die Differenz resultiert aus den monatlich wählbaren Eingabeparametern (z.B. Luftwechsel) der DIN EN 832 und der Verwendung von spezifischen Standort-Klimadaten. Dagegen zeigt der Jahresheizwärmebedarf des MFH 95 nach DIN EN 832 einen um knapp 12 % geringeren Wert gegenüber dem Rechenverfahren nach WSVO 95. Dies resultiert aus dem im Vergleich zum Verfahren nach WSVO 95 reduzierten Luftwechsel durch die Lüftungsanlage von $0,5 \text{ h}^{-1}$ in der Heizperiode.

4.1.3 Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung

Neben der Bereitstellung von Raumwärme benötigt die Trinkwassererwärmung die meiste Energie in Haushalten. Während in Altbauten zwischen 10 und 20 % der verbrauchten Ener-

gie auf die Trinkwassererwärmung entfallen, sind es in Niedrigenergiehäusern rund 40 bis 50 %.

Warmwasser wird für Körperreinigung und -pflege (z. B. Dusche, Waschtisch) sowie Reinigung im Haushalt (u.a. Geschirrspülmaschine) benötigt. Die VDI-Richtlinie 2067 Blatt 12 beinhaltet die Berechnung des Nutzenergiebedarfs für die Trinkwassererwärmung /VDI 2067-12 2000/. Die darin angegebenen Werte zum Nutzenergiebedarf bei Wohnbauten sind als Orientierung anzusehen, vor allem dort, wo eine genaue Ermittlung der Bedarfswerte nicht möglich ist. Dabei wird für die Körperreinigung von einer Nutzwärme von 40 °C und für die Reinigung des Geschirrs und der Wäsche von einer Nutzwärme zwischen 50 und 60 °C ausgegangen. Die Berechnung des Nutzenergiebedarfs $Q_{N,a}$ für die Trinkwassererwärmung wird nach folgender Formel vorgenommen:

$$Q_{N,a} = n_p \cdot q_{N,ges,a} \quad (4-1)$$

Die zu versorgende Anzahl der Personen n_p wird dabei mit dem personenbezogenen Gesamt-Nutzenergiebedarf pro Jahr $q_{N,ges,a}$ multipliziert.

Bei der Anzahl der Personen wird die statistische Belegungszahl n_p nach der Gebäude- und Wohnungsstichprobe von 1993 herangezogen (nach /VDI 2067-12 2000/). Für die Einfamilienhäuser EFH 95 und EFH 80 wird von sieben und mehr Räumen ausgegangen, woraus eine Belegungszahl von jeweils 3,8 Personen resultiert. Für die Wohnungen im Erd- und ersten Obergeschoss der beiden Mehrfamilienhäuser werden entsprechend /VDI 2067-12 2000/ je 2,8 und für die Dachgeschosswohnungen je 2,3 Bewohner angenommen.

Der durchschnittliche Warmwasserbedarf in einem Mehrpersonenhaushalt wird in /RWE 1998/ mit 400 kWh/(a Person) Nutzwärme angegeben. In /VDI 2067-12 2000/ werden für den personenbezogenen Gesamt-Nutzenergiebedarf je nach Ausstattung zwischen 520 und 600 kWh/(a Person) veranschlagt. Für die folgenden Berechnungen wird der personenbezogene Gesamt-Nutzenergiebedarf $q_{N,ges,a}$ auf der Basis von Messwerten in 36 Wohnungen im Zeitraum von Januar 1996 bis Dezember 1997 /Leven 1998/ für alle Gebäude mit 580 kWh/(a Person) festgelegt. Damit liegt der verwendete Wert innerhalb der in /VDI 2067-12 2000/ vorgegebenen Bandbreite. Für den Gesamt-Nutzenergiebedarf ergeben sich für die vier zu betrachtenden Gebäude die in Tabelle 4-11 dargestellten Werte.

Tabelle 4-11: Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung der Versorgungsaufgaben

Bezeichnung	Einheit	EFH 95	MFH 95	EFH 80	MFH 80
Anzahl der Nutzer	-	3,8	15,8	3,8	15,8
Personenbezogener Gesamt-Nutzenergiebedarf	kWh/(a Person)	580	580	580	580
Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung	kWh/a	2.204	9.164	2.204	9.164

4.2 Definition der Versorgungssysteme

Für die in Kapitel 4.1 definierten Gebäude EFH 95, MFH 95, EFH 80 und MFH 80 und die zugehörigen Versorgungsaufgaben werden im folgenden Versorgungssysteme zur Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeübergabe sowie zur Trinkwassererwärmung definiert. Ausgehend von diesen Systemen werden die für die weiteren Berechnungen notwendigen Aufwandszahlen für die Nutzenübergabe, Verteilung und Erzeugung (Raumwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung) sowie der Hilfsenergiebedarf bestimmt.

4.2.1 Auswahl der Versorgungssysteme

Als Referenzsysteme zur Wärmeerzeugung werden hier Wärmepumpenanlagen mit den Wärmequellen Erdreich (Erdkollektor und Sonde), Grundwasser, Außenluft und Massivabsorber berücksichtigt. Entsprechend des derzeitigen Heizungsbestandes (vgl. Abb. 3-3 und /Energiesparen 2000/) werden diesen als konventionelle Wärmeerzeugungssysteme Öl- und Erdgas-Niedertemperaturheizkessel sowie Gas-Brennwertheizkessel gegenübergestellt. Zusätzlich wird für die Neubauten EFH 95 und MFH 95 ein mit Holzpellets befeuertes System untersucht. Zur Wärmeverteilung werden Systeme mit Fußbodenheizung bzw. Plattenheizkörpern betrachtet, die Trinkwassererwärmung erfolgt bei allen Versorgungssystemen durch indirekt beheizte Speicher.

Wärmeerzeugung

Im folgenden werden die Wärmeerzeuger der jeweiligen Versorgungssysteme kurz beschrieben (vgl. /Schramek et al. 1995/, /Neubarth, Kaltschmitt 2000/).

- **Wärmepumpenanlagen**

Entsprechend den in Kapitel 2 dargestellten Systemen und der Marktübersicht in Kapitel 3.2 werden hier als Versorgungssysteme für die Versorgungsaufgaben EFH 95 und EFH 80 Wärmepumpenanlagen mit Erdreich, Grundwasser sowie Außenluft als

Wärmequelle berücksichtigt, während für die Versorgungsaufgaben MFH 95 und MFH 80 nur Anlagen mit den Wärmequellen Erdreich und Grundwasser Anwendung finden, da Außenluftwärmepumpen in diesem Leistungsbereich i. allg. nicht mehr eingesetzt werden.

Zum Ausgleich von Wärmenachfrage und Wärmeangebot, u. a. aufgrund von vorgegebenen Ausschaltzeiten (Sperrzeiten) durch das Energieversorgungsunternehmen, werden bei den Wärmepumpen-Systemen mit Plattenheizkörpern gedämmte Stahlspeicher als Wärmespeicher berücksichtigt. Bei Fußbodenheizungen ist i. allg. kein Wärmespeicher erforderlich, da hier die großen Speichermasse des Gebäudes (z. B. Estrich, Betonboden) ausreichen, um Komforteinbußen durch den taktenden Betrieb der Wärmepumpe zu vermeiden.

- **Niedertemperaturheizkessel für Öl und Erdgas**

Erdgas- und Öl-Niedertemperaturheizkessel werden für alle untersuchten Versorgungsaufgaben als Versorgungssysteme berücksichtigt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Kesseltypen (z.B. Spezialheizkessel), welche die Kesselwassertemperatur auf ca. 80 bis 90 °C konstant halten und die jeweilige Vorlauftemperatur durch Rücklaufbeimischung erreichen, werden Niedertemperaturkessel (NT-Kessel) in Abhängigkeit von der Außentemperatur mit gleitender Vorlauftemperatur von 75 °C bis 40 °C oder noch niedriger betrieben. Vor allem bei Kesseln mit Warmwassererwärmung lassen sich dadurch die Abgas- und Bereitschaftsverluste während der heizungsfreien Sommerzeit deutlich verringern und somit Jahresnutzungsgrade von 91 bis 93 % erreichen.

- **Gas-Brennwertheizkessel**

Die beste Ausnutzung der im Brennstoff enthaltenen Energie lässt sich durch Brennwertkessel erzielen. Durch Abkühlung der heißen Abgase über den Rücklauf des Heizungssystems wird dabei die fühlbare Restwärme der Abgase sowie die latente Wärme (Verdampfungswärme) des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes genutzt. Diese Verdampfungswärme kann dabei allerdings nur gewonnen werden, wenn die Rücklauftemperatur des Heizungssystems unterhalb der Taupunkttemperatur des Abgases liegt und somit ein Teil des Wasserdampfes kondensieren kann. Aufgrund des höheren Wasserstoffanteils im Brennstoff lässt sich bei erdgasbefeuerten Kesseln mit 11 % ein höherer theoretischer Energiegewinn als bei heizölbefeuerten Kesseln (6 %) erzielen. Neben den im Vergleich zu erdgasbefeuerten Brennwertkesseln schlechteren energetischen Rahmenbedingungen, sind bei heizölbefeuerten Brennwertgeräten die chemischen Eigenschaften des Kondensats gegenüber erdgasbefeuerten Geräten ungünstiger. Durch den Schwefelgehalt im Heizöl ist der Anteil der im Abgas und damit auch der in Kondensat enthaltenen sauren Bestandteile wesentlich höher. Probleme können sich dadurch insbesondere durch eine verstärkte Korrosion der Heizungsanlage sowie durch eine Versottung des Schornsteins ergeben. Die mit dem Kondensat in Berührung

kommenden Anlagenkomponenten müssen daher entsprechend säurebeständig ausgeführt und das Kondensat vor Einleitung in das öffentliche Abwassersystem ggf. neutralisiert werden. Aus diesen Gründen finden ölbefeuerte Brennwertheizkessel heute kaum Anwendung. Als Versorgungssysteme werden dementsprechend für die vier untersuchten Versorgungsaufgaben nur erdgasbefeuerte Brennwertkessel untersucht.

- **Holzpelletheizkessel**

Holzpellets sind zylindrische Presslinge aus trockenem, naturbelassenem Holz mit einem Durchmesser von meist 6 bis 8 mm und einer maximalen Länge meist 10 bis 30 mm, die ohne chemische Zusätze unter mechanischem Druck geformt werden. Durch die Möglichkeit Pellets pneumatisch zu fördern, können diese in geschlossenen Systemen transportiert und umgeschlagen werden (z. B. Silo-LKW) sowie aus dem Brennstofflager durch ein Saugsystem in den Vorratsbehälter des Kessels gefördert werden. Von diesem Vorratsbehälter werden die Pellets automatisch über eine Förderschnecke bedarfsgerecht in den Brennertopf (Schalen- oder Muldenbrenner) eingetragen.

Holzpellet-Systeme werden aufgrund der schlechten Nachrüstbarkeit in Altbauten nur für die beiden Versorgungsaufgaben EFH 95 und MFH 95 als Versorgungssystem berücksichtigt. Da die Leistung von Pelletkesseln i. allg. nicht beliebig weit gedrosselt sowie an Lastschwankungen angepasst werden kann, sind sowohl für Systeme mit Plattenheizkörpern als auch mit Fußbodenheizung zum Ausgleich von Wärmenachfrage und Wärmeerzeugung Wärmespeicher erforderlich.

Wärmeverteilung und Wärmeübergabe

In Deutschland werden Wohnräume überwiegend durch Warmwasser-Zentralheizungen mit Heizkörpern beheizt. In Neubauten finden aber auch Fußbodenheizungen zur Wärmeübergabe zunehmend Verbreitung. Auch kombinierte Systeme mit Heizkörpern und Fußbodenheizungen sind in der Praxis zu finden.

Heizkörper geben je nach Konstruktionsprinzip die Wärme in unterschiedlichen Anteilen durch Konvektion und Strahlung an den zu beheizenden Raum ab. Heute werden überwiegend Plattenheizkörper verwendet, da sie im Vergleich zu früher verbreiteten Rippenheizkörpern den Vorteil einer kompakteren Bauweise haben. Für alle untersuchten Versorgungsaufgaben bzw. Versorgungssysteme werden Plattenheizkörper mit Thermostatventilen (kurz: PHK) und einer Vorlauftemperatur von 55 °C sowie einer Rücklauftemperatur von 45 °C betrachtet.

Bei einer Fußbodenheizung wird die Wärmeübergabe im wesentlichen von der Temperaturdifferenz zwischen Fußbodenoberfläche und Raumluft bestimmt. Für die untersuchten Versorgungssysteme der Versorgungsaufgaben EFH 95 und MFH 95 wird dabei eine Warmwasserfußbodenheizung (FBH) mit PI (Proportional-Integral)-Regelung bei einer Vorlauf-

temperatur von 35 °C und einer Rücklauftemperatur von 25 °C berücksichtigt. Für die Versorgungsaufgaben EFH 80 und MFH 80 werden demgegenüber keine Versorgungssysteme mit Fußbodenheizung untersucht, da bei Altbauten eine nachträgliche Umrüstung auf Fußbodenheizung aufwändig wäre und daher auf das bestehende Wärmeverteilsystem mit Plattenheizkörpern zurückgegriffen wird.

Trinkwassererwärmung

Grundsätzlich ist eine zentrale oder eine dezentrale Trinkwassererwärmung möglich. In dieser Untersuchung wird für alle untersuchten Versorgungssysteme von einer zentralen Trinkwassererwärmung mit indirekt beheiztem Speicher ausgegangen. Die Versorgung aller Zapfstellen erfolgt dabei über einen zentrale Warmwasserspeicher, der über einen Rohrschlangenwärmetauscher durch den Wärmeerzeuger beheizt wird.

Gesamtübersicht der Versorgungssysteme

In Tabelle 4-12 sind die für die Versorgungsaufgaben EFH 95 und MFH 95 untersuchten Versorgungssysteme zusammengefasst. Als Wärmeübergabesysteme werden dabei sowohl Plattenheizkörper (55/45 °C) als auch Fußbodenheizung (35/25 °C) berücksichtigt. Tabelle 4-13 zeigt die Versorgungssysteme der Versorgungsaufgaben EFH 80 und MFH 80. Als Wärmeübergabesysteme werden hier ausschließlich Plattenheizkörper (55/45 °C) betrachtet.

4.2.2 Aufwandszahlen der Raumwärmebereitstellung

Für den Vergleich von Heizsystemen bietet es sich an das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen heranzuziehen. Der Nutzen der Heizanlage besteht darin, in den Räumen des Gebäudes für die Bewohner thermisch behagliche Zustände zu schaffen. Wird der zusätzliche Aufwand in den einzelnen Bedarfsbereichen auf die eigentlich erforderlichen Bedarfswerte bezogen, ergeben sich Aufwandszahlen e_i , die als energetische Vergleichsgrößen genutzt werden können. Die Aufwandszahl ist dabei als Kehrwert des Nutzungsgrads von Heizkessel, Wärmeverteilung und -übergabe bzw. als Kehrwert der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen definiert. Im folgenden werden die Aufwandszahlen für die Wärmeübergabe, -verteilung und -erzeugung der betrachteten Versorgungssysteme diskutiert.

Tabelle 4-12: Übersicht über die untersuchten Versorgungssysteme für die Versorgungsaufgaben EFH 95 und MFH 95

Wärmeerzeugung / Heizung	Wärme- übergabe	Versorgungssysteme EFH 95	Versorgungssysteme MFH 95
Ölheizkessel	PHK ^a FBH ^b	Öl/PHK-E95 Öl/FBH-E95	Öl/PHK-M95 Öl/FBH-M95
Gas-Niedertemperatur-Heizkessel	PHK FBH	G-NT/PHK-E95 G-NT/FBH-E95	G-NT/PHK-M95 G-NT/FBH-M95
Gas-Brennwert-Heizkessel	PHK FBH	G-BW/PHK-E95 G-BW/FBH-E95	G-BW/PHK-M95 G-BW/FBH-M95
Holzpellet-Heizkessel	PHK FBH	HP/PHK-E95 HP/FBH-E95	HP/PHK-M95 HP/FBH-M95
B/W ^c -Wärmepumpe (Kollektor)	PHK FBH	BWK/PHK-E95 BWK/FBH-E95	BWK/PHK-M95 BWK/FBH-M95
B/W-Wärmepumpe (Sonde)	PHK FBH	BWS/PHK-E95 BWS/FBH-E95	BWS/PHK-M95 BWS/FBH-M95
W/W ^d -Wärmepumpe	PHK FBH	WW/PHK-E95 WW/FBH-E95	WW/PHK-M95 WW/FBH-M95
A/W ^e -Wärmepumpe	PHK FBH	AW/PHK-E95 AW/FBH-E95	
Wärmepumpe mit Massivabsorber	PHK FBH	MA/PHK-E95 MA/FBH-E95	MA/PHK-M95 MA/FBH-M95

^aPHK: Plattenheizkörper;^bFBH: Fußbodenheizung;^cB/W: Sole (*engl.* Brine) / Wasser;^dW/W: Wasser / Wasser; ^eA/W: Luft (*engl.* air) / Wasser**Tabelle 4-13:** Übersicht über die untersuchten Versorgungssysteme der Versorgungsaufgaben EFH 80 und MFH 80

Wärmeerzeugung / Heizung	Wärme- übergabe	Versorgungssysteme EFH 80	Versorgungssysteme MFH 80
Ölheizkessel	PHKa	Öl/PHK-E80	Öl/PHK-M80
Gas-Niedertemperatur-Heizkessel	PHK	G-NT/PHK-E80	G-NT/PHK- M80
Gas-Brennwert-Heizkessel	PHK	G-BW/PHK-E80	G-BW/PHK- M80
B/W ^b -Wärmepumpe (Kollektor)	PHK	BWK/PHK-E80	BWK/PHK- M80
B/W-Wärmepumpe (Sonde)	PHK	BWS/PHK-E80	BWS/PHK- M80
W/W ^c -Wärmepumpe	PHK	WW/PHK-E80	WW/PHK- M80
A/W ^d -Wärmepumpe	PHK	AW/PHK-E80	
Wärmepumpe mit Massivabsorber	PHK	MA/PHK-E80	MA/PHK- M80

^aPHK: Plattenheizkörper;^bFBH: Fußbodenheizung;^cB/W: Sole (*engl.* Brine) / Wasser;^dW/W: Wasser / Wasser; ^eA/W: Luft (*engl.* air) / Wasser

Aufwandszahlen der Wärmeübergabe

Die Aufwandszahl für die Wärme- oder Nutzenübergabe e_1 vom Heizkörper an den zu beheizenden Raum bezeichnet das Verhältnis der von den Heizflächen (Plattenheizkörper oder Fußbodenheizung) abgegebenen Wärme zu dem nach DIN EN 832 berechneten Heizwärmebedarf des Gebäudes. Verluste bei der Nutzenübergabe können u. a. durch unterschiedliche Auslegungstemperaturen oder bautechnische Gegebenheiten (z.B. Fußbodenheizung grenzt an unbeheizten Raum) entstehen. Für die betrachteten Wärmeübergabesysteme Plattenheizkörper (55/45 °C) mit Thermostatventilen und Fußbodenheizung (35/25 °C) mit PI-Regelung werden die in /Bach et al. 1998/ definierten Aufwandszahlen für die weiteren Berechnungen berücksichtigt (Tabelle 4-14).

Tabelle 4-14: Aufwandszahlen für die Wärmeübergabe

Übergabesystem	Aufwandszahl e_1
Plattenheizkörper (55/45 °C) mit Thermostatventilen	1,25
Fußbodenheizung (35/25 °C) mit PI-Regelung	1,25

nach /LGA 2000b/

Aufwandszahlen der Wärmeverteilung

Verluste durch die Wärmeverteilung vom Wärmeerzeuger (d. h. Heizkessel, Wärmepumpe) zum Nutzenübergabesystem (d. h. Plattenheizkörper, Fußbodenheizung) lassen sich auch bei einer guten Dämmung der Wärmeverteilrohre nicht gänzlich vermeiden. Entsprechend ist die Aufwandszahl e_2 für die Verteilung als das Verhältnis vom Energieaufwand der Verteilung zum Energieaufwand der Nutzenübergabe definiert /VDI 2067 2000/. Als Aufwandszahl für Plattenheizkörper werden hier 1,04 und für Fußbodenheizungen 1,02 unterstellt (Tabelle 4-15; /LGA 2000a/). Die niedrigeren Aufwandszahlen der Fußbodenheizung resultieren dabei aus der im Vergleich zu Plattenheizkörpern geringeren Vorlauftemperatur.

Tabelle 4-15: Aufwandszahlen für die Verteilung der Systeme

Verteilungssystem	Aufwandszahl e_2
Plattenheizkörper (55/45 °C) mit Thermostatventilen	1,04
Fußbodenheizung (35/25 °C) mit PI-Regelung	1,02

nach /LGA 2000b/

Aufwandszahlen der Wärmeerzeugung

Die Aufwandszahl e_3 der Wärmeerzeugung entspricht dem Kehrwert des Nutzungsgrads des Heizkessels bzw. der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und somit dem Quotienten aus der zugeführten Brennstoffenergie bzw. elektrischen Energie und der an die Wärmeverteilung übertragene Wärmemenge.

Für die einzelnen Versorgungssysteme werden die Nutzungsgrade bzw. die Jahresarbeitszahlen entsprechend verfügbarer Messwerte ausgeführter Anlagen sowie ergänzender Literaturrecherchen festgelegt (vgl. u a. /HLH 1999/, /Neubarth 2000/, /Heidelck et al. 1999/, /Primus 1997/ (vgl. Tabellen B-1 bis B-2 im Anhang). Die Jahresnutzungsgrade bzw. die Jahresarbeitszahlen der Wärmeerzeuger sowie die entsprechenden Aufwandszahlen für die Raumwärmebereitstellung sind in Tabelle 4-16 dargestellt.

4.2.3 Aufwandszahlen der Trinkwassererwärmung

Durch das im Vergleich zur Raumwärmebereitstellung höhere Temperaturniveau der Trinkwassererwärmung und den damit verbundenen höheren Bereitschaftsverlusten der Wärmeerzeuger während der Sommerzeit sowie der Warmwasserspeicher bzw. den ungünstigeren Betriebsbedingungen der Wärmepumpe liegen die Nutzungsgrade der Heizkessel bzw. die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen unterhalb der entsprechenden Größen der Raumwärmebereitung. Die Nutzungsgrade und Jahresarbeitszahlen sowie die entsprechende Aufwandszahlen e_{2TW} der Wärmeerzeuger für die Trinkwassererwärmung (inkl. Verluste der Warmwasserspeicher) sind in Tabelle 4-16 dargestellt.

Verteilungsverluste bei der Trinkwassererwärmung sind auch bei einer entsprechenden Dämmung der Leitungsrohre insbesondere aufgrund von verbrauchsfernen Standorten der Zapfstellen nicht gänzlich zu vermeiden. Hier wird ein Verteilungsnutzungsgrad der Warmwasserverteilung von 0,91 unterstellt; dies entspricht einer Aufwandszahl e_{1TW} von 1,04.

Die insgesamt für die Trinkwassererwärmung aufzuwendende Energie bestimmt sich demnach aus dem Produkt der Aufwandszahl für die Verteilung e_{1TW} und der Aufwandszahl für die Erzeugung e_{2TW} .

Tabelle 4-16: Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl sowie Aufwandszahlen der Wärmeerzeuger für Raumwärmebereitstellung und Trinkwassererwärmung

Versorgungssystem	Raumwärmebereitstellung		Trinkwassererwärmung	
	Nutzungsgrad / Jahresarbeitszahl	Aufwandszahl e_3	Nutzungsgrad / Jahresarbeitszahl	Aufwandszahl e_{2TW}
Öl / PHK	0,93	1,08	0,72	1,39
Öl / FBH	0,93	1,08	0,72	1,39
G-NT / PHK	0,93	1,08	0,72	1,39
G-NT / FBH	0,93	1,08	0,72	1,39
G-BW / PHK	1,00	1,00	0,80	1,25
G-BW / FBH	1,04	0,96	0,80	1,25
HP / PHK	0,80	1,25	0,64	1,56
HP / FBH	0,80	1,25	0,64	1,56
BWK / PHK	3,30	0,30	2,40	0,41
BWK / FBH	3,80	0,26	2,40	0,41
BWS / PHK	3,30	0,30	2,40	0,41
BWS / FBH	3,80	0,26	2,40	0,41
WW / PHK	3,80	0,26	2,80	0,36
WW / FBH	4,30	0,23	2,80	0,36
AW / PHK	2,80	0,36	2,10	0,48
AW / FBH	3,30	0,30	2,10	0,48
MA / PHK	2,90	0,34	2,10	0,48
MA / FBH	3,40	0,29	2,10	0,48

4.2.4 Hilfsenergiebedarf der Versorgungssysteme

Heizsysteme benötigen zum Betrieb einzelner Komponenten elektrische Energie. Für Ölheizkessel, Gas-Niedertemperatur-Heizkessel und Brennwertkessel enthält die Hilfsenergie neben dem Energiebedarf für Regelung und Umwälzpumpe auch den Strombedarf für Brennstoffventil, Ventilator, Gebläse bzw. Ölvorwärmung /HLH 1997/. Die Heizungs-Umwälzpumpen tragen in der Regel am meisten (> 50 %) zum Strombedarf der Heiz- und Warmwasseranlage bei /HLH 1997/. Bei den Wärmepumpen-Systemen ist der Energiebedarf der Wärmequellenanlage bereits in der Jahresarbeitszahl berücksichtigt, so dass in der Hilfsenergie der Wärme-

pumpen-Systeme ausschließlich der Strombedarf für die Regelung und die Heizungs-Umwälzpumpe eingeht.

Der höhere Hilfsenergiebedarf der Versorgungssysteme in den beiden Mehrfamilienhäusern resultiert aus dem höheren Energiebedarf der Umwälzpumpe (Tabelle 3-11).

Tabelle 3-11: Elektrischer Hilfsenergiebedarf der Versorgungssysteme in kWh/a

Versorgungssystem	EFH 95	MFH 95	EFH 80	MFH 80
Öl / PHK	740	1.110	740	1.110
Öl / FBH	740	1.110	-	-
G-NT / PHK	460	690	460	690
G-NT / FBH	460	690	-	-
G-BW / PHK	500	750	500	750
G-BW / FBH	500	750	-	-
HP / PHK	850	1.280	-	-
HP / FBH	850	1.280	-	-
BWK / PHK	400	600	400	600
BWK / FBH	400	600	-	-
BWS / PHK	400	600	400	600
BWS / FBH	400	600	-	-
WW / PHK	400	600	400	600
WW / FBH	400	600	-	-
AW / PHK	400	600	400	600
AW / FBH	400	600	-	-
MA / PHK	400	600	400	600
MA / FBH	400	600	-	-

5 Ökologische Analyse

Die ökologische Betrachtung der ausgewählten Versorgungssysteme wird anhand von Lebenswegbilanzen durchgeführt. Im Anschluss an die Darstellung der Methodik werden die Ergebnisse für den Endenergiebedarf, den Bedarf an erschöpflichen Energieträgern sowie die CO₂- und SO₂- Äquivalent-Emissionen diskutiert.

5.1 Methodik der Ökobilanzierung

Zur Abschätzung und zum Vergleich der Umwelteinwirkungen durch unterschiedliche Heizsysteme werden Ökobilanzen erstellt und ausgewählte Umweltkenngößen berechnet. Das Ziel der Ökobilanz ist dabei die möglichst umfassende Bewertung des jeweiligen Bilanzobjektes (hier: Heizungssystem) über den gesamten Lebensweg hinsichtlich der Wirkungen auf Mensch und Umwelt von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung und ggf. Wiederverwertung der Anlagen ("von der Wiege bis zur Bahre"). Mit jeder dieser einzelnen Phasen des Lebenszyklus sind vielfältige Stoffströme verbunden, wie z. B. die Aufwendungen für die Bereitstellung von Brennstoffen, die ebenfalls in die Bilanzierung einfließen /Neubarth 2000/.

Für die Erstellung der ökologischen Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA) werden in dieser Studie die Vorgaben für eine Ökobilanzierung nach der EN ISO 14040 /EN ISO 14040 1997/ mit einer entsprechenden Gliederung in die vier Schritte "Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens" "Sachbilanz", "Wirkungsabschätzung" und "Auswertung" zugrundegelegt.

5.1.1 Vorgehensweise nach EN ISO 14040

Der Aufbau einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 ist in Abb. 5-1 dargestellt. Im folgenden werden die wesentlichen Bestandteile für die vorliegende Studie kurz beschrieben.

Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Zu Beginn einer Ökobilanz müssen das Untersuchungsziel (Bilanzobjekt und -einheit) und der Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Dazu zählen u. a. die Festlegung des geographischen Bezugsraums, des Bezugszeitraums und der zu bilanzierenden Größen sowie der sonstigen relevanten Grenzen und Annahmen.

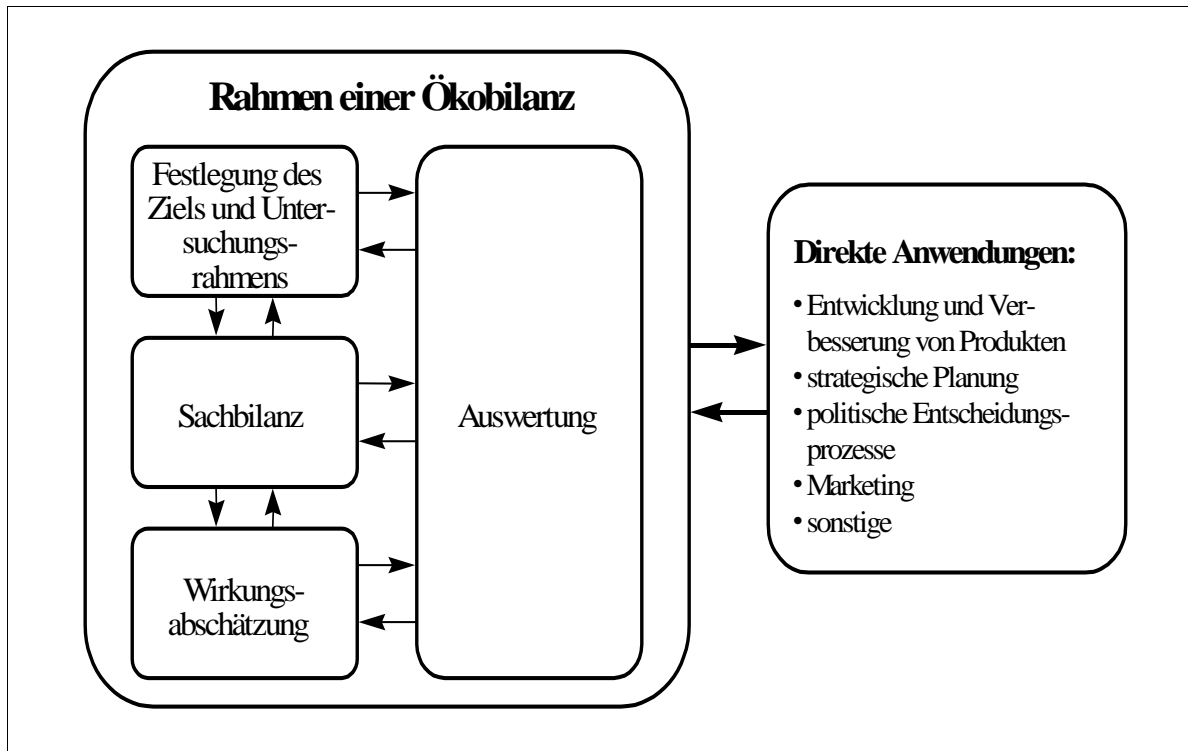


Abb. 5-1: Aufbau einer Ökobilanz nach EN ISO 14040

Festlegung des Bilanzobjektes und der Bilanzeinheit/funktionellen Einheit. Die Ökobilanz stellt eine Methode zur Bilanzierung einer Nutzenbereitstellung dar. Um ein beliebiges Objekt (z. B. Produkt, Verfahren, System oder Technologie) bilanzieren zu können, muss zunächst das Bilanzobjekt festgelegt werden. /DIN 33926 1996/ definiert das Bilanzobjekt als Stoff, Prozess oder Produkt. In dieser Studie stellen die verschiedenen Versorgungssysteme die Bilanzobjekte dar. Die Ergebnisse der Ökobilanzen werden - um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen - auf die Bilanzeinheit oder "funktionelle Einheit" bezogen /DIN 33926 1996/. Im vorliegenden Fall ist die Bilanzeinheit die jeweilige Versorgungsaufgabe.

Geographischer Bezugsraum, Bezugszeitraum. Als räumlichen Bezug werden hier die Gegebenheiten in Deutschland verwendet und als zeitlicher Bezug das Ende der neunziger Jahre gewählt.

Festlegung der Sachbilanzgrößen und Wirkungskategorien. Durch die Festlegung der Sachbilanzgrößen und Wirkungskategorien werden letztendlich die Ergebnisgrößen der Bilanzierung bestimmt. In dieser Studie werden als Wirkungskategorien die CO₂- und SO₂-Äquivalent-Emissionen und der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern untersucht. Auf die Bedeutung dieser Größen wird in Kapitel 5.1.2 noch näher eingegangen. Dort werden auch die Sachbilanzgrößen beschrieben, die für die Ermittlung der Wirkungskategorien bilanziert werden müssen..

Sachbilanz

In der Sachbilanz werden die zuvor festgelegten Sachbilanzgrößen durch die Ermittlung und Zusammenstellung möglichst aller relevanten Stoff- und Energieströme, welche dem betrachteten Bilanzobjekt zugeordnet werden können, quantifiziert. Dazu wird die Realität so weit in ein Modell überführt, dass die gewünschten Größen entsprechend quantifizierbar sind. Wie dies in der vorliegenden Studie durchgeführt wurde, wird in Kapitel 5.1.3 näher erläutert. Als Ergebnis werden die Werte der festgelegten Sachbilanzgrößen, z. B. der Endenergiebedarf, ggf. differenziert nach einzelnen Abschnitten eines Lebensweges, ausgewiesen.

Wirkungsabschätzung

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung werden verschiedene potenzielle Wirkungen, wie z. B. die Inanspruchnahme von Ressourcen (nichtenergetisch und energetisch), Treibhauseffekt, Ozonabbau, Versauerung, Eutrophierung, Human- und Ökotoxizität, Bildung von Photooxidenten und andere potentielle Wirkungen, ermittelt (vgl. /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/). In der vorliegenden Studie werden dabei vorwiegend Wirkungskategorien betrachtet, die derzeit aktuelle energiebedingte Umweltwirkungen beschreiben wie etwa den Treibhauseffekt (vgl. Kapitel 5.1.2).

Auswertung

Bei der Auswertung werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz zusammengefasst, um eine Grundlage für Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Entscheidungsfindungen zu bilden /EN ISO 14040 1997/.

Bilanzierungsinstrument

Zur Durchführung der Ökobilanzen wird im folgenden auf das EDV-gestützte Bilanzierungsinstrument BALANCE /Marheineke 2000/ zurückgegriffen. Dieses ermöglicht eine effiziente Verwaltung der Daten, die in die Erstellung der Bilanzen einfließen und eine rasche Auswertung der Bilanzergebnisse. Das Programm greift auf eine umfangreiche Datenbank mit den bei der Bereitstellung von energetischen und nicht energetischen Rohstoffen anfallenden kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen zurück.

5.1.2 Betrachtete Wirkungskategorien

In der vorliegenden Studie werden die CO₂-Äquivalent-Emissionen als Maß für den Treibhauseffekt, die SO₂-Äquivalent-Emissionen als Maß für die Versauerung und der Bedarf an

erschöpflichen Energieträgern als Maß für die Inanspruchnahme erschöpflicher energetischer Ressourcen betrachtet.

Bedarf an erschöpflichen Energieträgern

Unter dem Bedarf an erschöpflichen oder fossilen Energieträger wird hier der Bedarf fossil biogener (d. h. Erdöl, Erdgas, Steinkohlen, Braunkohlen) und fossil mineralischer Energieträger (d. h. Uran) verstanden. Berücksichtigt werden dabei neben dem unmittelbaren Energieeinsatz (z. B. Energieinhalt des verfeuerten Heizöls) auch die indirekten Aufwendungen, die bei der Herstellung der Anlagen (z. B. Bau des Kraftwerks, Bau und Betrieb der Anlagen für Brennstoffförderung und -aufbereitung, Transport, Abriss) in den vorgelagerten Prozessketten anfallen. Das Ergebnis einer derartigen Energiebilanz kann als "Bedarf an erschöpflichen Energieträgern" bzw. "primärenergetisch bewerteter kumulierter fossiler Energieaufwand" bezogen auf die bereitgestellte Energie zusammengefasst werden.

Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist ein Maß für den potenziellen Beitrag anthropogen verursachter Stofffreisetzungen zur Erwärmung der Erdatmosphäre. Um diesen Effekt zumindest annähernd zu beschreiben, werden Äquivalenzfaktoren, die die potenzielle Änderung der Absorption von Wärmestrahlung in der Atmosphäre (radiative forcing) von Gasen im Vergleich zum treibhausrelevanten Gas CO₂ beschreiben, verwendet /IPCC 1995/.

Bei klimawirksamen Spurengasemissionen wird hinsichtlich ihrer direkten und indirekten Wirksamkeit unterschieden. Zu den direkt klimawirksamen Emissionen zählen im wesentlichen Kohlenstoffdioxid (CO₂), Distickstoffoxid (N₂O, Lachgas), Methan (CH₄), Wasserdampf, nahezu alle technisch produzierten teil- und vollhalogenierten Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW und H-FCKW) sowie einige persistente Chlorkohlenwasserstoffe (CKW). Die indirekt wirkenden Emissionen dagegen sind erst nach chemischen Umwandlungsprozessen innerhalb der Troposphäre klimawirksam. Zu diesen zählen kohlenstoffhaltige Substanzen wie z. B. Kohlenstoffmonoxid (CO) oder Kohlenwasserstoffe, die letztendlich zum klimawirksamen CO₂ reagieren. Andere indirekt wirksame Emissionen bilden unter bestimmten Voraussetzungen durch photochemische Reaktionen troposphärisches Ozon, das ebenfalls klimawirksam ist. Zu diesen Substanzen zählen z. B. die Stickstoffoxide (NO_x) und die Kohlenwasserstoffe (vgl. /Kaltschmitt, Reinhardt 1997/).

Diese relevanten Emissionen sind unterschiedlich stark wirksam und werden über Gewichtungsfaktoren zum gesamten Treibhauseffekt verknüpft (Tabelle 5-1). Der Treibhauseffekt wird in CO₂-Äquivalenten angegeben und berechnet sich aus der Summe aller Produkte von Äquivalenzfaktoren und den entsprechenden Massen der treibhausrelevanten Gase.

In der vorliegenden Studie werden die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen bilanziert, da diese die bedeutsamsten energiebedingten Treibhausgase darstellen.

Tabelle 5-1: Gewichtungsfaktoren zur Berechnung des Treibhauseffektes in CO₂-Äquivalent-Emissionen

Sachbilanzgröße	Gewichtungsfaktoren, 100 Jahre [kg CO ₂ /kg]
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	21
Distickstoffoxid (N ₂ O)	310

Quelle: /IPCC 1995/

Versauerung von Gewässern und Böden

Die Versauerung von Gewässern und Böden wird durch säurebildende Gase verursacht, die aus der Atmosphäre entweder trocken oder nass auf die jeweiligen Systeme einwirken /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/.

Das Versauerungspotential (Acidification Potenzial: AP) in SO₂-Äquivalenten basiert auf dem gewichtsbezogenen Protonenbildungspotential von Gasen im Verhältnis zu Schwefeldioxid (SO₂). Die Bestimmung der einzelnen Äquivalenzfaktoren erfolgt auf der Basis ihres Potentials Protonen (H⁺-Ionen) zu bilden. Die Berechnung des Beitrags zur Versauerung als SO₂-Äquivalent erfolgt durch Multiplikation der Masse der einzelnen Emissionen mit den jeweiligen Versauerungspotenzial-Werten und anschließender Summenbildung. Aus der in /Heijungs et al. 1992/ vorgeschlagenen Liste werden in der vorliegenden Studie Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid bzw. -dioxid, Ammoniak, Salzsäure und Fluorwasserstoff berücksichtigt (s. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Gewichtungsfaktoren zur Berechnung der Versauerung in SO₂-Äquivalent-Emissionen

Sachbilanzgröße	Gewichtungsfaktoren, 100 Jahre [kg SO ₂ /kg]
Schwefeloxide (SO ₂)	1,00
Stickoxide (NO _x)	0,70
Ammoniak (NH ₃)	1,88
Salzsäure (HCl)	0,88
Fluorwasserstoff (HF)	1,60

Quelle: /Heijungs et al. 1992/ /UBA 1995/

5.1.3 Ermittlung der Sachbilanzgrößen

Die Bilanzen der vorliegenden Untersuchung werden auf der Grundlage von Prozesskettenanalysen erstellt. Im folgenden wird zunächst allgemein auf das Vorgehen bei der Prozesskettenanalyse eingegangen. Anschließend werden die im vorliegenden Kontext besonders relevanten Punkte Ermittlung des Endenergiebedarfs und Ermittlung des Kraftwerksmix diskutiert.

Prozesskettenanalyse

Bei der Prozesskettenanalyse wird ein beliebig komplexes System (z. B. Raumwärmebereitstellung mittels Versorgungssystem Öl/PHK) in endlich viele, überschaubare Teilsysteme (Prozesse) zerlegt. Prozesse zeichnen sich durch Zustandsänderungen aus: Eingangsgrößen eines Prozesses werden innerhalb dieses Prozesses in Ausgangsgrößen umgewandelt. Man unterscheidet bei diesen Eingangs- und Ausgangsgrößen zwischen Elementar- und Produktflüssen. Elementarflüsse sind definiert als Stoff- oder Energieströme, die aus der Umgebung in das untersuchte System eintreten (z. B. Heizöl) bzw. vom untersuchten System an die Umgebung abgegeben werden (z. B. Kohlenstoffdioxidemissionen), ohne danach bzw. zuvor durch menschliche Einflüsse verändert zu werden /EN ISO 14040 1997/. Produktflüsse können Input- (z. B. Kraftwerksmix, Ferntransport) und Outputströme (z. B. Wärme) darstellen. Da der Produktinput eines Prozesses aus dem Produktoutput eines anderen Prozesses gebildet wird, und der Output dieses Prozesses üblicherweise wiederum Input eines anderen Prozesses ist, kann eine Prozesskette gebildet werden, indem man die Prozesse, welche den Lebensweg eines Produktes darstellen, entsprechend miteinander verbindet (Abb. 5-2). Jeder Prozess ist demnach durch Produktflüsse, d. h. Inputs und Outputs sowie in das System ein- und austretende Elementarflüsse gekennzeichnet.

Prinzipiell ist mit der Prozesskettenanalyse eine sehr hohe Genauigkeit der Modellierung erreichbar, die von der Verfügbarkeit der Daten, den Kenntnissen über Produkt und Prozesse sowie der Analysetiefe abhängt. Dementsprechend ist die Prozesskettenanalyse ein sehr arbeitsaufwendiges Verfahren (vgl. /Kaltschmitt et al. 1996/, /Eyerer 1996/). Um den Bilanzierungsaufwand zu begrenzen, werden daher Systemgrenzen definiert und so vor- und nachgelagerte Prozesse, die keinen relevanten Einfluss auf das Bilanzergebnis haben, nicht mehr berücksichtigt (z. B. Aufwendungen für den die Anlage planenden Ingenieur).

In Abb. 4-2 ist der Aufbau einer Prozesskette exemplarisch für das Versorgungssystem Öl/PHK dargestellt. In den Prozess „Herstellung Öl/PHK“ gehen u.a. Produktinputs ein, die zur Herstellung des Heizsystems benötigt werden. So werden z. B. zur Herstellung des Wärmeerzeugers Stahl und Aluminium verwendet, die über die entsprechenden vorgelagerten Ketten in der Bilanzierung berücksichtigt werden.

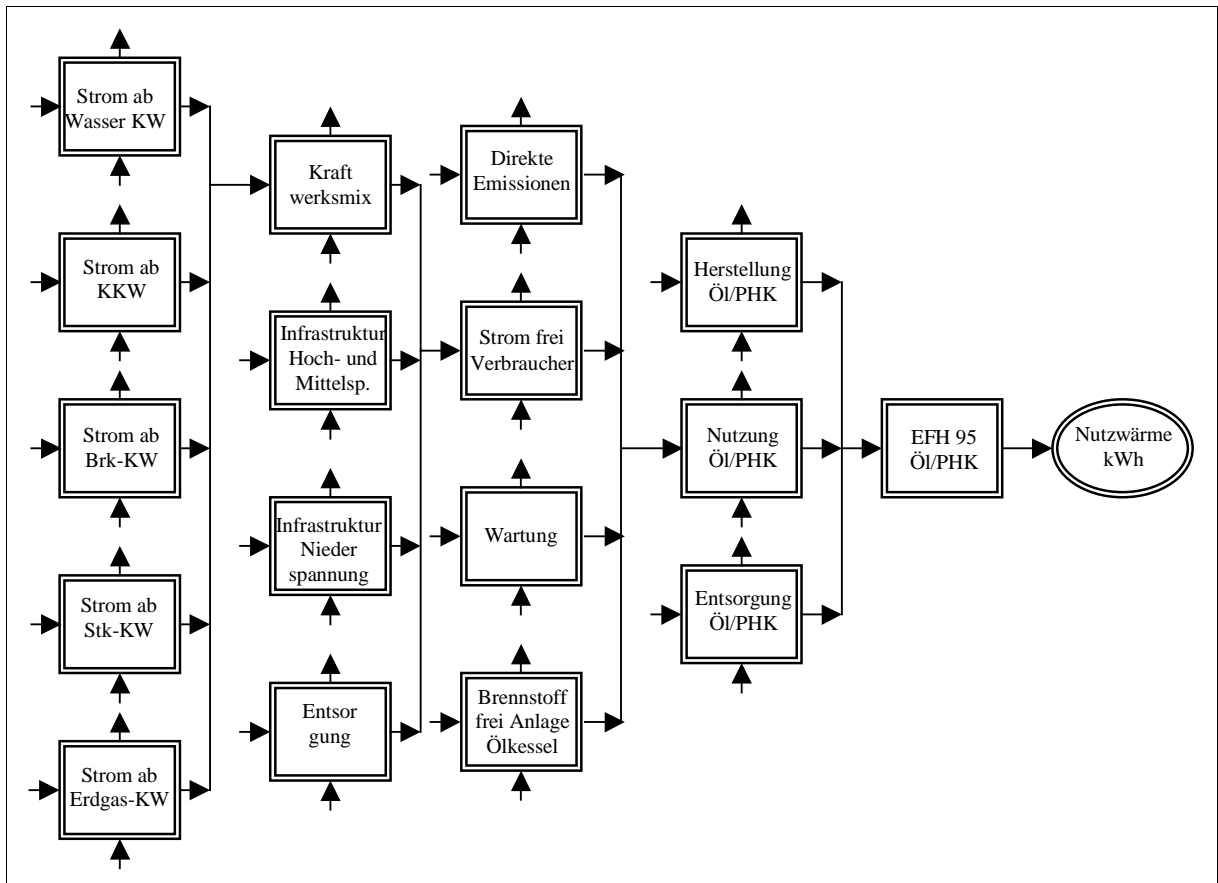


Abb. 5-2: Aufbau einer Prozesskettenanalyse

Die Produktinputs des Prozesses „Nutzung Öl/PHK“ sind die Prozesse „Strom frei Verbraucher“, „Wartung“ sowie „Brennstoff frei Anlage“. Die Bestimmung der Parameter des Prozesses „Nutzung Öl/PHK“ werden unter dem Stichwort „Ermittlung des Endenergiebedarfs“ im folgenden beschrieben. Darauf aufbauend werden bei der „Nutzung Öl/PHK“ die direkten Emissionen berücksichtigt, die durch die Verbrennung des Brennstoffs am Anlagenstandort (z.B. Heizöl im Heizkessel) entstehen. Bei der Bilanzierung der direkten Emissionen bei der Verbrennung von Holzpellets ist anzumerken, dass die CO₂-Emissionen in diesem Teil der Prozesskette nicht berücksichtigt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Verbrennung der Holzpellets nur so viel CO₂ freigesetzt wird, wie zuvor vom Baum - bei einer unterstellten nachhaltigen Forstwirtschaft - der Atmosphäre entzogen wurde. Der Prozess „Wartung“ berücksichtigt Energiebedarf und Emissionen, die durch Wartung, Reinigung und Instandhaltung (z. B. Schornsteinfeger) des Heizsystems entstehen. Energiebedarf und Emissionen, die mit der Bereitstellung des Brennstoffs (z.B. Heizöl frei Verbraucher) in Zusammenhang stehen, werden im Prozess „Brennstoff frei Anlage“ berücksichtigt. Beispielsweise werden hier Emissionen und Energiebedarf des vorgelagerten Raffinationsprozesses berücksichtigt.

Der Prozess „Strom frei Verbraucher“ wird durch für die Bilanzierung verwendeten Kraftwerksmix bestimmt. Auf die hier zugrundegelegte Variante wird im folgenden ebenfalls detaillierter eingegangen.

Der Prozess „Entsorgung Öl/PHK“ beinhaltet die Aufwendungen die bei der Entsorgung bzw. dem Abriss des Heizsystems anfallen. So werden hier z.B. Emissionen berücksichtigt, die von einem Lkw stammen, der die Komponenten des Systems zur Entsorgungsstelle transportiert.

Ermittlung des Endenergiebedarfs

Die einem Gebäude zugeführte Energie wird als Endenergie bezeichnet. Die Endenergie (z. B. Heizöl im Öltank des Endverbrauchers, Holzpellets im Brennstofflager) wird durch den Energiewandler (z. B. Heizkessel, Wärmepumpe) in Wärme umgewandelt und anschließend unmittelbar als Nutzwärme oder über ein Wärmeverteilsystem an die jeweiligen Verbraucher (z. B. Warmwasserzapfstelle) übertragen.

Die aufzuwendende Endenergie für die Raumwärmebereitstellung (Gleichung 4-1) ergibt sich aus dem Produkt des Jahresheizwärmebedarfs Q_H nach DIN EN 832 (Kapitel 4.1.2) und den Aufwandszahlen für die Wärmeübergabe (e_1), die Verteilung (e_2) und die Erzeugung (e_3 ; vgl. Kapitel 4.2.2).

$$Q_{ED,R} = Q_H \cdot e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \quad (5-1)$$

Für die Trinkwassererwärmung bestimmt sich die benötigte Endenergie $Q_{ED,TW}$ (Gleichung 4-2) entsprechend aus dem Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung $Q_{N,a}$ (vgl. Kapitel 4.1.3) und den Aufwandszahlen für Verteilung e_{1TW} und Erzeugung e_{2TW} (vgl. Kapitel 4.2.3).

$$Q_{ED,TW} = Q_{N,a} \cdot e_{1TW} \cdot e_{2TW} \quad (5-2)$$

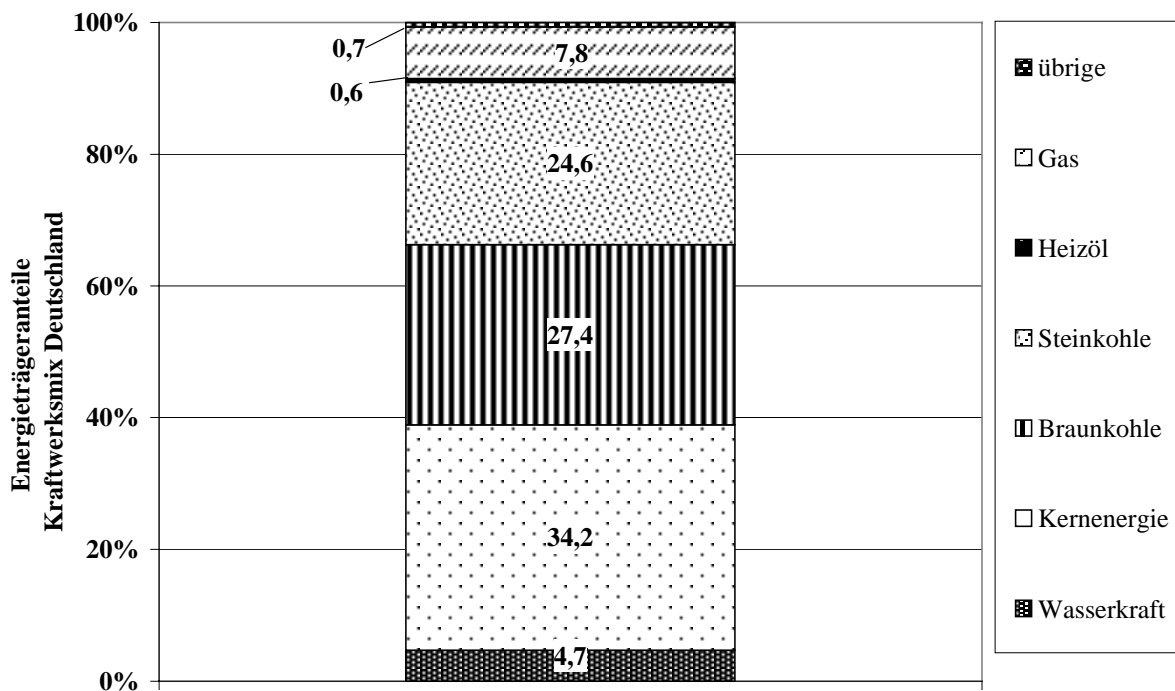
Zum Betrieb der Wärmeerzeuger sowie der Wärmeverteilung ist i. Allg. zusätzlich elektrische Hilfsenergie erforderlich, die mit den Gleichungen (5-1) und (5-2) nicht erfasst wird, für die Berechnung des Endenergiebedarf und der übrigen Sachbilanzgrößen aber berücksichtigt wird.

Ermittlung des Kraftwerksmix

Für die Bestimmung des Kraftwerksmix, der für die Ökobilanzierung von Heizungssystemen und insbesondere Wärmepumpen zugrundegelegt werden soll, sind unterschiedliche Vorschläge unterbreitet worden. /Heidleck et al. 1999b/ unterscheiden drei Modelle, wie dem Strombedarf von Wärmepumpenanlagen ein Kraftwerksmix zugeordnet werden kann.

- Das *Verbrauchsmodell* geht davon aus, dass die Bedarfsstruktur von Wärmepumpensystemen sehr heterogen ist, da jeder Eigentümer je nach seinen persönlichen Bedürfnissen seine Wärmepumpenanlage betreibt. Einschränkungen ergeben sich nur aus dem üblicherweise vereinbarten Stromvertrag, der dem Energieversorgungsunternehmen Sperrzeiten von bis 3 mal 2 Stunden am Tag erlaubt, wodurch Wärmepumpenanlagen einen wichtigen Beitrag leisten, Kraftwerke kontinuierlicher und mit geringeren Anfahrverlusten zu betreiben. Im allgemeinen kann daher davon ausgegangen werden, dass Wärmepumpenanlagen während des gesamten Tages betrieben werden, wobei sich sogar ungünstige Spitzenlastzeiten vermeiden lassen. Aufgrund dieser ausgeglichenen Bedarfsstruktur kann der Strommix der öffentlichen Versorgung auch für Wärmepumpenanlagen angewendet werden.
- Das *Zuwachsmmodell* basiert auf der Überlegung, dass durch Wärmepumpenanlagen ein zusätzlicher Strombedarf in Zeiten mit ohnehin hoher Stromnachfrage (Wintermonate) entsteht. Diese zusätzliche Stromnachfrage im Mittel- bzw. Spitzenlastbereich wird nach /Fischedick et al. 1997/ heute im wesentlichen von Steinkohlekraftwerken abgedeckt und der Betrieb von Steinkohlekraftwerken sollte daher für den Strombezug von Wärmepumpenanlagen zugrundegelegt werden. Nach Ansicht von /Heidelck et al. 1999b/ ist der kausale Zusammenhang zwischen Stromerzeugung aus Steinkohlekraftwerken und Wärmepumpenanlagen jedoch nicht hinreichend gegeben. Aber selbst wenn er für heute gültig wäre, ist zu bedenken, dass innerhalb der Lebensdauer neuer Wärmepumpenanlagen Strom in der Mittellast zunehmend durch neue gasgefeuerte GuD-Anlagen erzeugt werden wird – zumindest nach derzeitiger Einschätzung. Außerdem ist davon auszugehen, dass in diesem Zeitraum vielfältige andere Faktoren die Stromnachfrage beeinflussen werden, so dass das Zuwachsmmodell wohl eine unzulässige Verkürzung darstellt.
- Das *Primärenergiemodell* geht davon aus, dass Energieumwandlungssysteme am besten miteinander verglichen werden können, wenn der gleiche Primärenergieträger eingesetzt wird, da Primärenergieträger unterschiedliche CO₂-Emissionen haben. Sollen technische Eigenschaften konkurrierender Systeme bezogen auf Energieaufwand und Schadstoffemissionen verglichen werden, bietet sich das Primärenergiemodell an, da nur noch technische Unterschiede berücksichtigt werden. In der vorliegenden Studie sollen jedoch nicht nur technische Eigenschaften verglichen werden, sondern der tatsächliche Beitrag zu Klimaschutz und Ressourcenschonung ermittelt werden. Daher erscheint dieses Modell auch eher weniger geeignet.

Die Bilanzierung des Strombezugs von Wärmepumpen und anderen Heizungssystemen wird daher im folgenden entsprechend dem Verbrauchsmodell mit den Energieträgeranteile am gesamtdeutschen Kraftwerksmix für das Jahr 2000 durchgeführt. Diese Energieträgeranteile am deutschen Kraftwerksmix sind in Abb. 5-3 dargestellt.



Quelle: /VDEW 2001a/

Abb. 5-3: Energeträgeranteile am Kraftwerksmix Deutschland - Bereitstellung elektrischer Energie (öffentliche Versorgung) 2000

Um eine Beurteilung des Einflusses alternativer Annahmen zu ermöglichen, wird jedoch in Kapitel 7 eine Sensitivitätsanalyse bzgl. der CO₂-Intensität des Strommixes durchgeführt.

5.2 Ergebnisse

Im folgenden werden für die Versorgungssysteme der untersuchten Versorgungsaufgaben EFH 95, MFH 95, EFH 80 und MFH 80 die Ergebnisse der Bilanzierung des Endenergiebedarfs sowie die Energie- und Emissionsbilanzen im Verlauf der gesamten Anlagenlebensdauer einschließlich aller vorgelagerten Prozesse dargestellt.

5.2.1 Endenergiebedarf

Abb. 5-4 bis Abb. 5-7 zeigen den Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für die Fälle EFH 95, MFH 95, EFH 80 bzw. MFH 80, jeweils untergliedert in den Endenergiebedarf zur Raumwärmebereitstellung und zur Trinkwassererwärmung sowie den Hilfsenergiebedarf. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist im Anhang in den Tabellen C-1 bis C-4 zu finden.

Betrachtet man die einzelnen Versorgungsaufgaben, so spiegeln die Ergebnisse der Berechnung des Endenergiebedarfes im wesentlichen die Unterschiede in den Systemnut-

zungsgraden bzw. –aufwandszahlen der verschiedenen Versorgungssysteme wider. Entsprechend weisen die Systeme mit den höchsten Aufwandszahlen, d. h. Holzpellet-Systeme mit Plattenheizkörpern HP/PHK, den größten Endenergieverbrauch auf und Systeme mit den niedrigsten Aufwandszahlen, das sind Wärmepumpenanlagen mit Fußbodenheizung, insbesondere WW/FBH, haben auch den geringsten Endenergieverbrauch. Etwa 80 % des Endenergiebedarfs werden dabei für die Bereitstellung der Raumwärme und ca. 15 % für die Trinkwassererwärmung aufgewendet; der Anteil der Hilfsenergie am Endenergieverbrauch ist mit rund 5 % vergleichsweise gering.

Die Differenzen zwischen vergleichbaren Systemen bei unterschiedlichen Versorgungsaufgaben, z. B. zwischen den Sole-Wasser-Wärmepumpen-Systemen mit Plattenheizkörpern BWK/PHK-E95 und BWK/PHK-E80, gehen hingegen zumeist auf Unterschiede im flächenbezogenen Wärmeverbrauch bei den Versorgungsaufgaben zurück.

Für eine gesamtenergetische oder ökologische Bewertung der untersuchten Optionen ist allerdings der Vergleich des Endenergieverbrauches von öl-, gas- oder biomassebefeuerten Systemen mit dem Endenergieverbrauch von Wärmepumpen-Systemen nicht ausreichend, da Umwandlungs- und Verteilungsverluste bei der Bereitstellung der Brennstoffe bzw. elektrischen Energie nicht berücksichtigt werden. Dies kann vor allem bei Wärmepumpenanlagen mit erheblichen Verlusten im vorgelagerten Kraftwerkspark zu einer Missinterpretation der Ergebnisse führen. Zweckmäßiger ist daher ein Vergleich der diskutierten Versorgungssysteme z. B. anhand des Bedarfes erschöpflicher Energieträger wie er in Kapitel 5.1.2 definiert wurde.

5.2.2 Bedarf an erschöpflichen Energieträgern

In Abb. 5-8 bis Abb. 5-11 ist der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern für die untersuchten Versorgungssysteme der Fälle EFH 95, MFH 95, EFH 80 und MFH 80 dargestellt. Die entsprechenden Tabellen und Zahlenwerte sind im Anhang in den Tabelle D-1 zu finden.

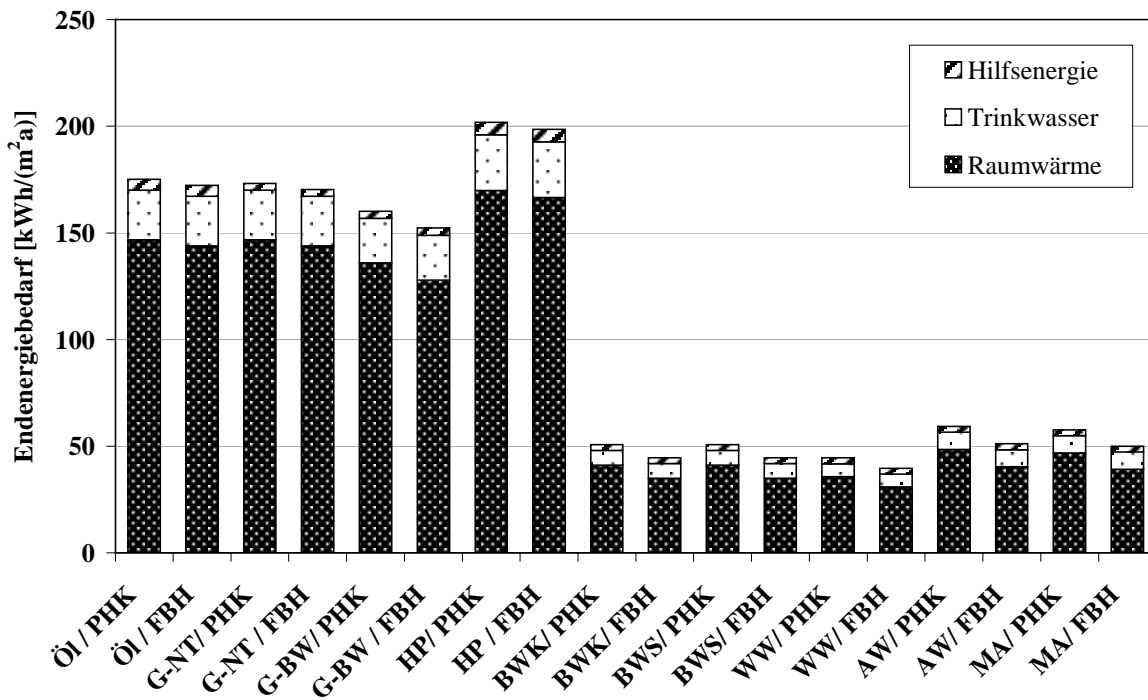


Abb. 5-4 : Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das EFH 95

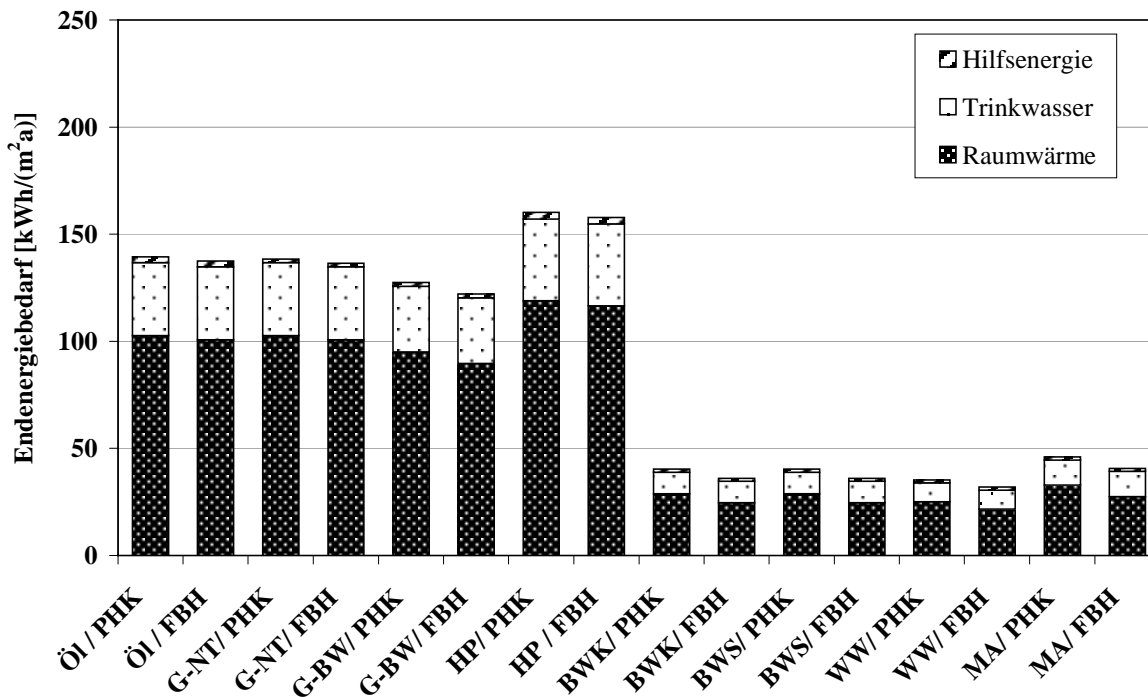


Abb. 5-5: Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das MFH 95

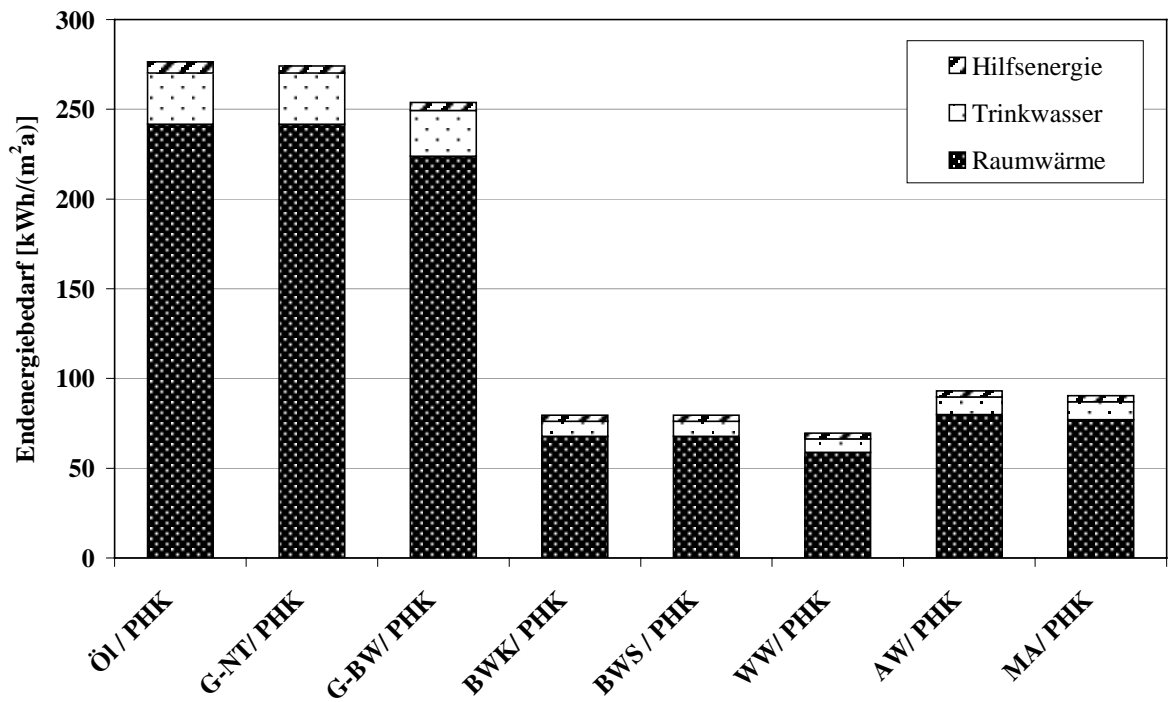


Abb. 5-6: Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das EFH 80

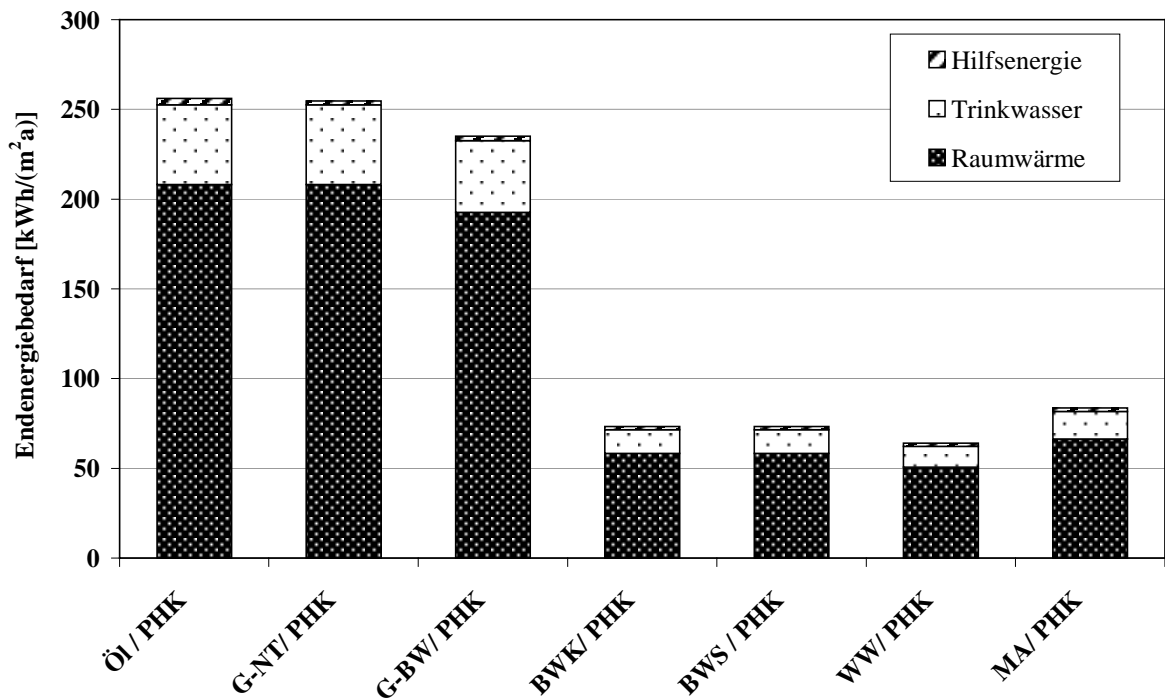


Abb. 5-7: Endenergiebedarf der Versorgungssysteme für das MFH 80

Die Ergebnisse der Bilanzierung des Bedarfs an erschöpflichen Energieträgern werden dabei getrennt für die Bereiche „Herstellung und Entsorgung“; „Brennstoffbereitstellung und Energieinhalt Brennstoff“ sowie „Nutzung Sonstiges“ dargestellt. „Herstellung und Entsorgung“ erfasst den gesamten Bedarf an erschöpflichen Energieträgern für den Bau des Heizungssystems und dessen Anlagenkomponenten (u. a. Wärmeerzeuger, Leitungssystem) sowie den Abriss und die Entsorgung der Systemkomponenten am Ende ihrer Nutzungsdauer. „Brennstoffbereitstellung und Energieinhalt Brennstoff“ berücksichtigt neben dem Energiegehalt des Brennstoffes die Aufwendungen für die Bereitstellung des jeweiligen Energieträgers (z. B. Förderung und Raffination von Erdöl, Transport des Heizöls zum Verbraucher). Unter „Nutzung Sonstiges“ werden bei den mit Heizöl, Erdgas und Holzpellets befeuerten Systemen der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern für die Bereitstellung der elektrischen Hilfsenergie sowie der Aufwand für Wartung und Instandhaltung der Systemkomponenten zusammengefasst. Bei den diskutierten Wärmepumpen-Systemen ist der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern für die Bereitstellung der Hilfsenergie demgegenüber in der „Brennstoffbereitstellung und Energieinhalt Brennstoff“ enthalten.

Bei allen Versorgungsaufgaben ist der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern bei den mit fossilen Brennstoffen befeuerten Anlagen ÖL, G-NT und G-BW am höchsten, da diese Energieträger während des Betriebes eingesetzt werden und der Betrieb i. Allg. die Bilanzen dieser Anlagen dominiert. Den geringsten Verbrauch erschöpflicher Energieträger zeigen demgegenüber mit Holzpellets befeuerte Systeme HP.

Der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern von Wärmepumpen-Systemen liegt durchweg unterhalb des Bedarfs an erschöpflichen Energieträgern von ölbefeuerten Systemen, zum Teil werden hier Einsparungen von 30 % und mehr erreicht, etwa beim Wasser-Wasser-Wärmepumpen-System mit Fußbodenheizung WW/FBH-E95 im Vergleich zum entsprechenden ölbefeuerten System ÖL/FBH-E95. Auch im Vergleich zu erdgasbefeuerten Systemen weisen die Wärmepumpen-Systeme tendenziell günstigere Werte auf. Allerdings sind hier deutliche Unterschiede je nach verwendeter Wärmequelle zu beobachten.

Der Haupteinflussfaktor auf die dargestellten Ergebnisse von Wärmepumpenanlagen ist die Jahresarbeitszahl und damit der Anteil der zugeführten elektrischen Antriebsenergie an der gesamten Wärmeerzeugung. Wärmepumpenanlagen mit systembedingt niedrigeren Arbeitszahlen (vor allem Außenluftanlagen) sind entsprechend durch deutlich höhere Aufwendungen an erschöpflichen Energieträgern gekennzeichnet als Systeme mit hoher Arbeitszahl (z. B. Systeme mit Erdkollektor).

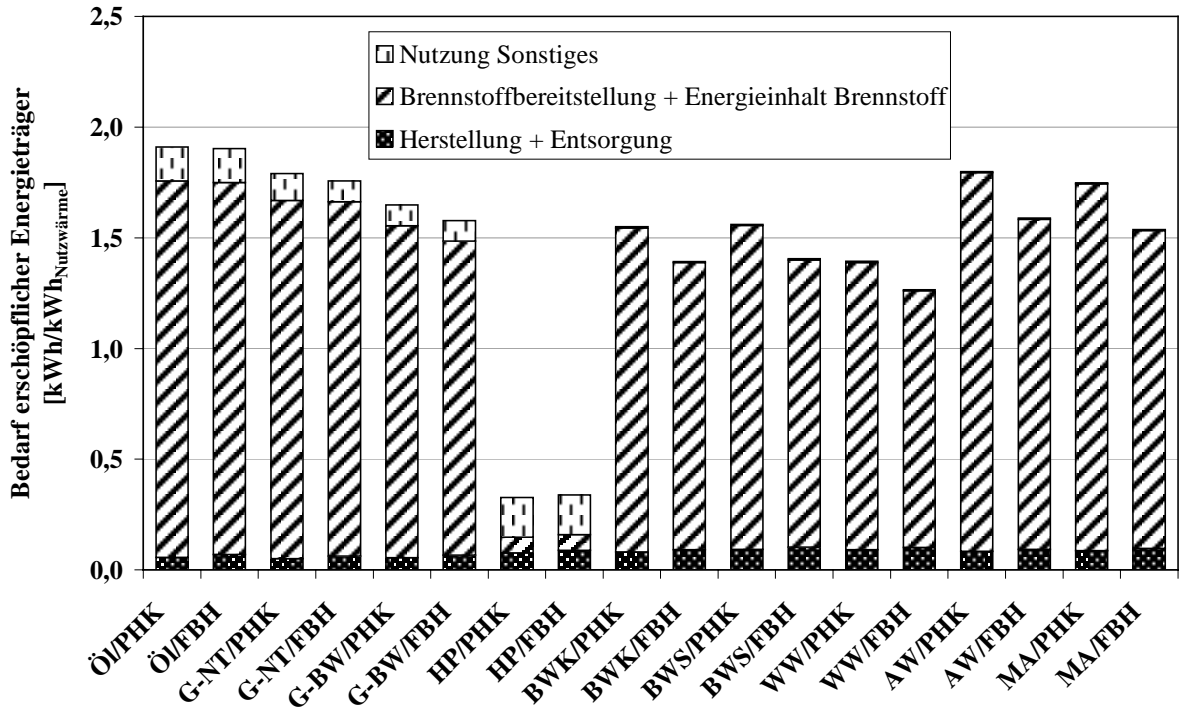


Abb. 5-8: Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das EFH 95

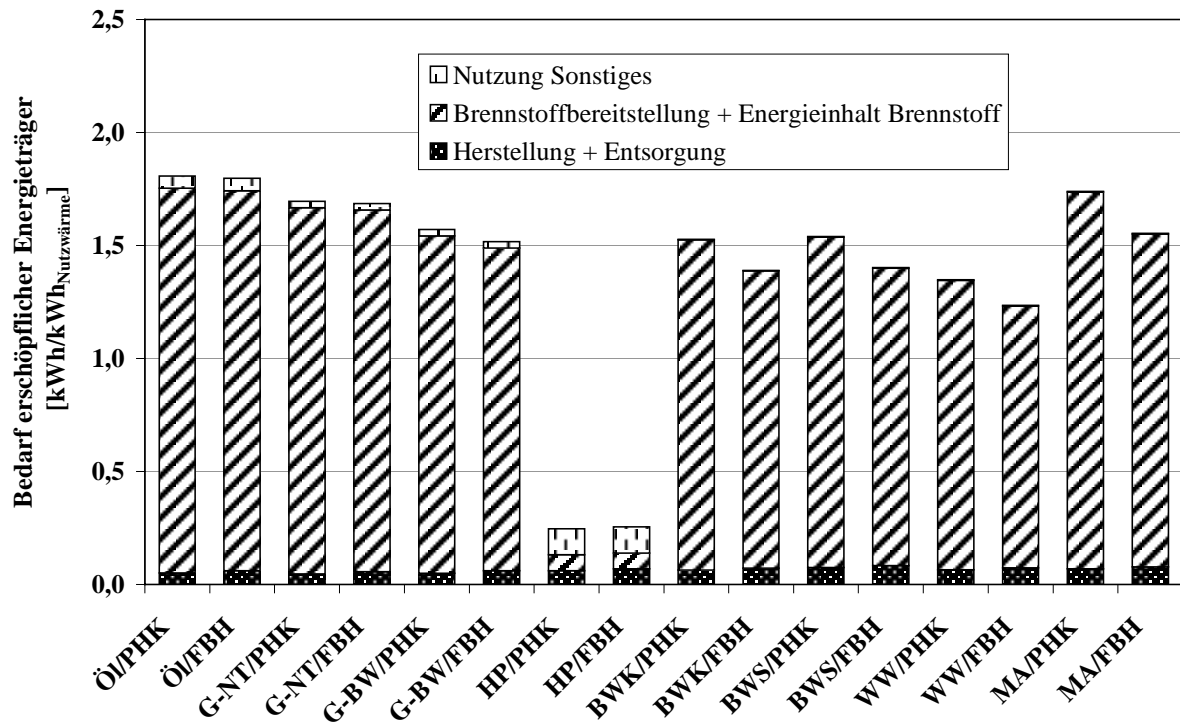


Abb. 5-9: Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das MFH 95

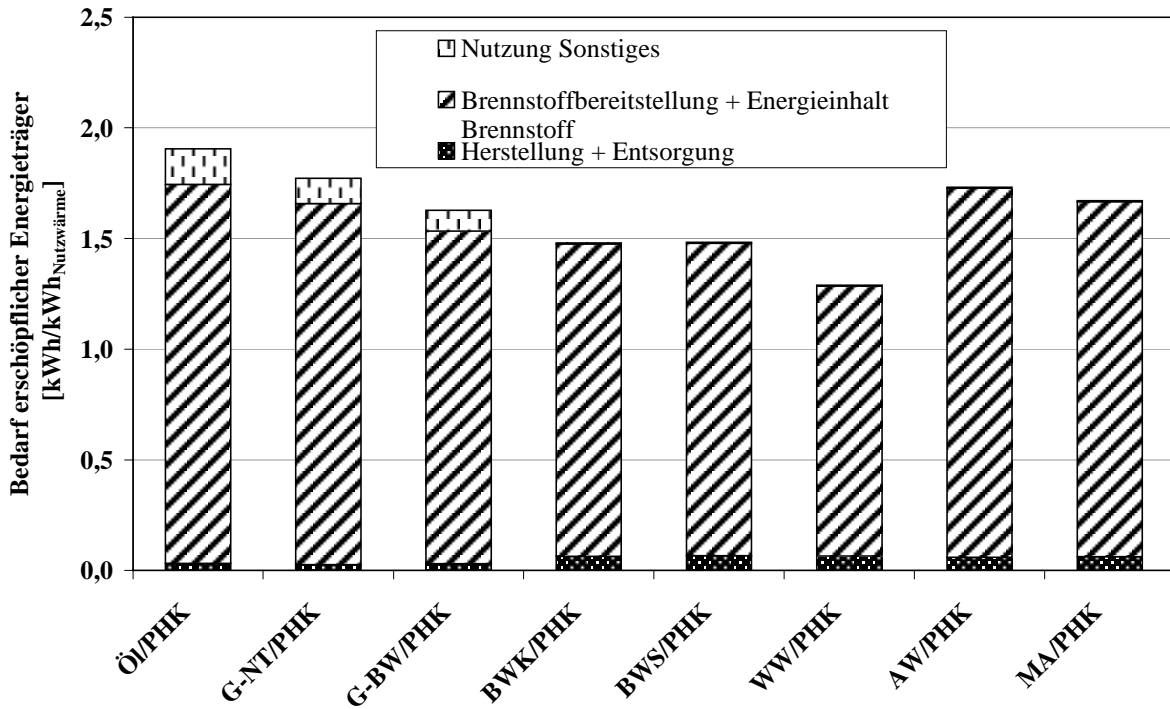


Abb. 5-10: Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das EFH 80

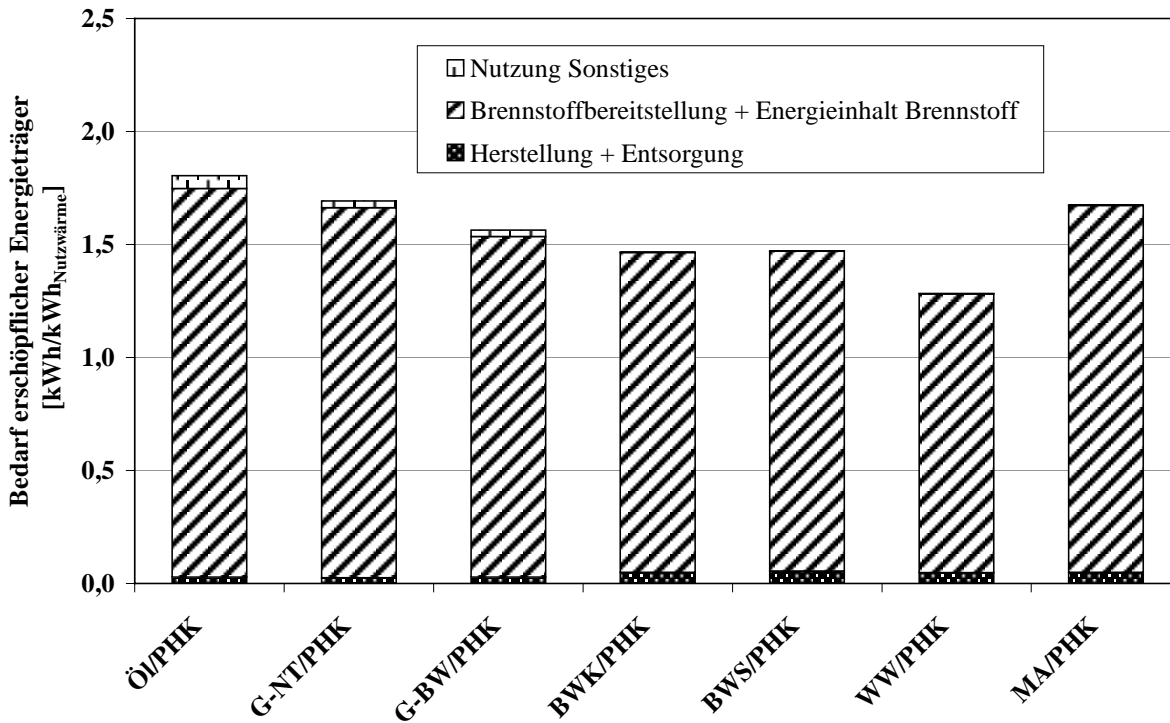


Abb. 5-11: Bedarf an erschöpflichen Energieträgern der Versorgungssysteme für das MFH 80

Der um etwa 10 bis 15 % geringere Bedarf an erschöpflichen Energieträgern von Wärmepumpen-Systemen mit Fußbodenheizung gegenüber vergleichbaren Systemen mit Platten-

heizkörpern resultiert in erster Linie aus den, aufgrund des geringeren Temperaturniveaus erreichbaren, höheren Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen in diesen Systemen.. Bei konventionellen bzw. pelletbefeuerten Heizsystemen sind diese Einsparungen z. T. deutlich geringer, da sich hier die Nutzungsgrade der Wärmeerzeuger nicht oder weniger als bei Wärmepumpen ändern. Bei den öl-befeuerten Anlagen ÖL, den Gas-Niedertemperatur-Kesseln G-NT sowie den Holzpellet-Systemen HP sind die Unterschiede zwischen Fußbodenheizung und Plattenheizkörpern allein auf die etwas niedrigeren Verteilungsverluste der Wärmeverteilung zurückzuführen (vgl. Tabelle 4-15). Diese fließen zwar auch in die Bilanzierung der Wärmepumpen-Systeme ein, spielen dort aber eine untergeordnete Rolle verglichen mit der durch die niedrigeren Vorlauftemperaturen erzielbaren Verbesserungen der Arbeitszahlen um 10 % und mehr (vgl. Tabelle 4-16). Bei Gas-Brennwert-Geräten G-BW verbessert sich der Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers ebenfalls bei Verwendung von Fußbodenheizungen, die Verbesserung beträgt jedoch nur 4 %.

5.2.3 Beitrag zum Treibhauseffekt – CO₂-Äquivalent-Emissionen

Die bezüglich dem Verbrauch an erschöpflichen Energieträgern diskutierten Zusammenhänge gelten grundsätzlich auch für die CO₂-Äquivalent-Emissionen. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen der untersuchten Versorgungssysteme für die verschiedenen Versorgungsaufgaben sind in Abb. 5-12 bis Abb. 5-15 dargestellt. Dabei werden wiederum die Bereiche „Herstellung und Entsorgung“, „direkte Emissionen“, „Brennstoffbereitstellung“ und „Nutzung Sonstiges“ unterschieden. Die Zahlenwerte sind im Anhang in der Tabelle D-2 aufgeführt.

Die untersuchten Wärmepumpen-Systeme mit Fußbodenheizung weisen 1 % bis 20 % günstigere CO₂-Äquivalent-Emissionen auf als das jeweilige Gas-Brennwert-System mit Fußbodenheizung G-BW/FBH. Vergleicht man die Wärmepumpen-Systeme mit Ölheizungen, so ergeben sich sogar Einsparungen der CO₂-Äquivalent-Emissionen zwischen 29 % und 43 %. Diese Ergebnisse beruhen, wie in Kapitel 5.1.3 erläutert, auf dem bundesdeutschen Kraftwerksmix, der sich aus den entsprechenden Anteilen der unterschiedlichen Energieträger an der Stromerzeugung ableitet (vgl. Abb. 5-3). Im Rahmen der Schlussbetrachtung (Kapitel 7) werden die Auswirkungen alternativer Annahmen untersucht.

Von den Wärmepumpen-Systemen mit Fußbodenheizung hat das System mit Wärmequelle Wasser WW/FBH die geringsten und das System mit Wärmequelle Luft AW/FBH bei allen Versorgungsaufgaben die höchsten CO₂-Äquivalent-Emissionen. Die Systeme mit der Wärmequelle Erdreich BWK/FBH und BWS/FBH weisen CO₂-Äquivalent-Emissionen auf, die um 9% bis 11 % über denen der jeweiligen Systeme mit Wärmequelle Wasser liegen. Wärmepumpen-Systeme mit Plattenheizkörpern sind durch bis zu 13 % höhere CO₂-Äquivalent-Emissionen als ein Wärmepumpen-System mit Fußbodenheizung gekennzeichnet.

net, resultierend aus den geringeren Jahresarbeitszahlen für die Heizsysteme mit Plattenheizkörpern.

Der Anteil der „direkten Emissionen“ an den gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen liegt bei den konventionellen Systemen zwischen 68 % und 75 %. Dabei gilt der niedrigste Wert für Gas-Brennwert-Systeme mit Fußbodenheizung G-BW/FBH, während der höchste Anteil beim System mit Ölheizung und Plattenheizkörper Öl/PHK auftritt. Die „Brennstoffbereitstellung“ trägt bei den konventionellen Systemen zwischen 14 % und 19 % zu den CO₂-Äquivalent-Emissionen. Bei den Wärmepumpen-Systemen entfällt mit 87 % bis 92 % der größte Anteil an den CO₂-Äquivalent-Emissionen auf die die „Brennstoffbereitstellung“, d. h. die Stromerzeugung mit den vorgelagerten Ketten. Zwischen 8 % und 13 % der CO₂-Äquivalent-Emissionen kommen aus der „Herstellung und Entsorgung“. Bei den Holzpellet-Systemen HP weisen die „Nutzung Sonstiges“ etwa 43 % und die „Herstellung und Entsorgung“ ca. 32 % an den CO₂-Äquivalent-Emissionen auf. Die „direkten Emissionen“ umfassen hier nur CH₄- und N₂O-Emissionen, da die direkten CO₂-Emissionen der Holzpellet-Systeme, wie in Kapitel 5.1.2 erläutert, als nicht-relevant für den Treibhauseffekt einzustufen sind. Auf die direkten Emissionen entfällt damit bei den Holzpellet-Systemen ein Anteil von rund 7 % an den gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen.

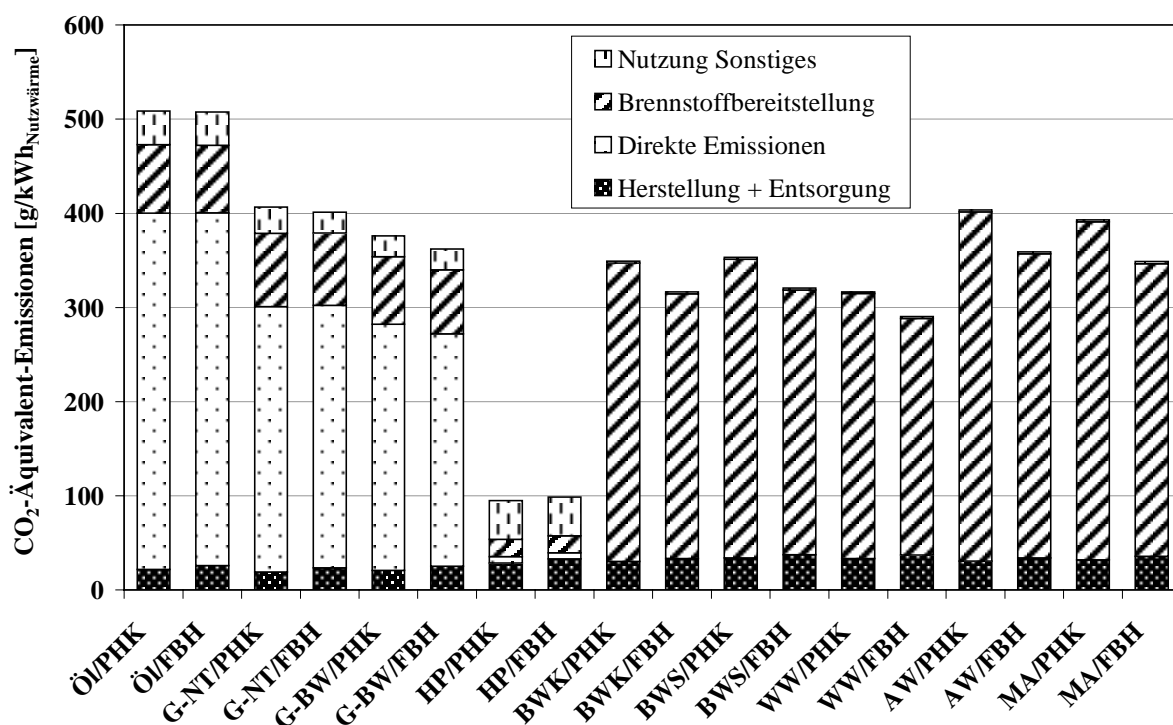


Abb. 5-12: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 95

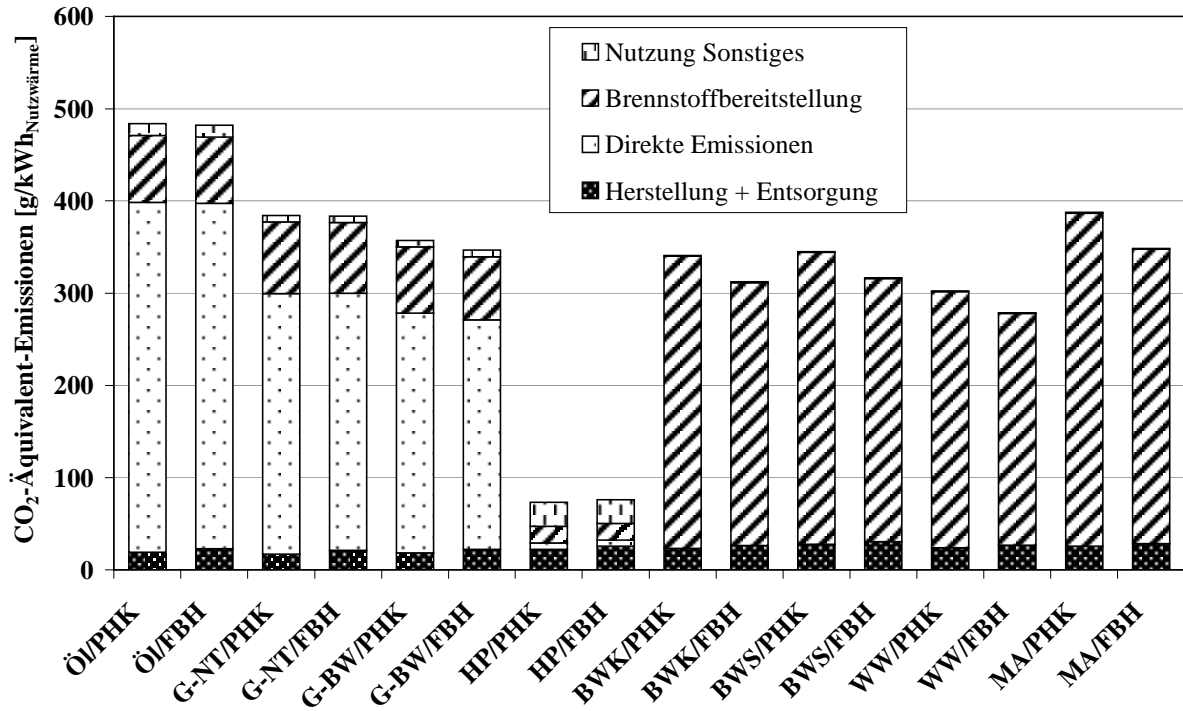


Abb. 5-13: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 95

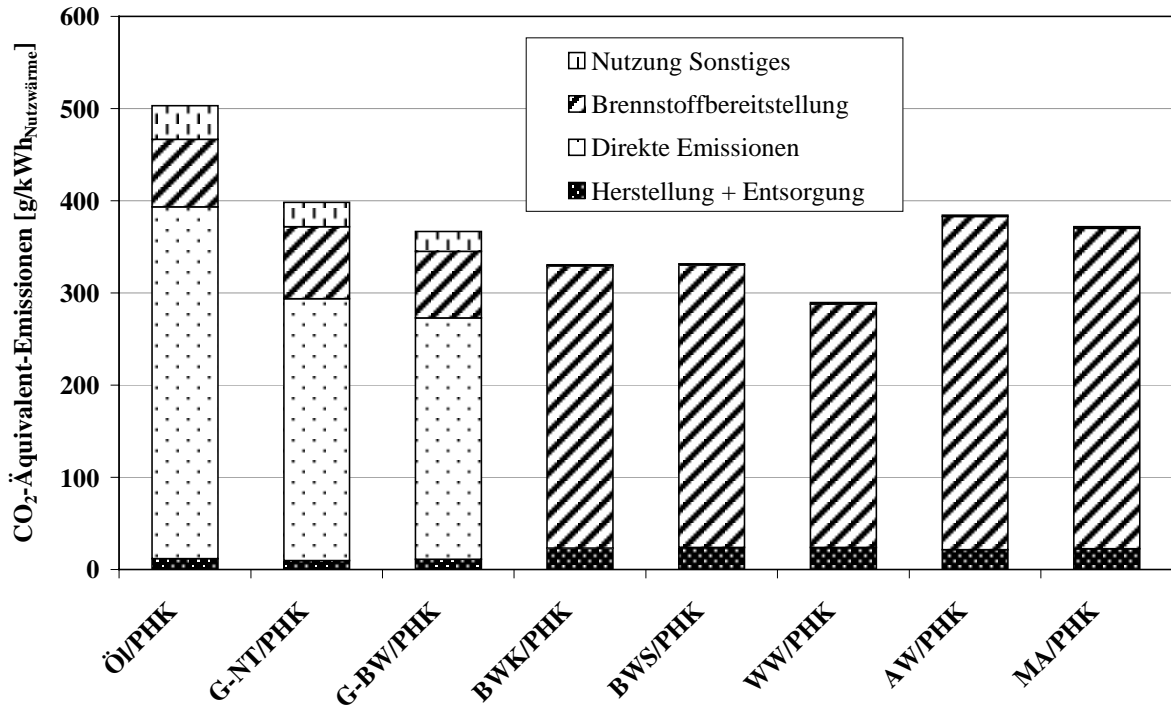


Abb. 5-14: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 80

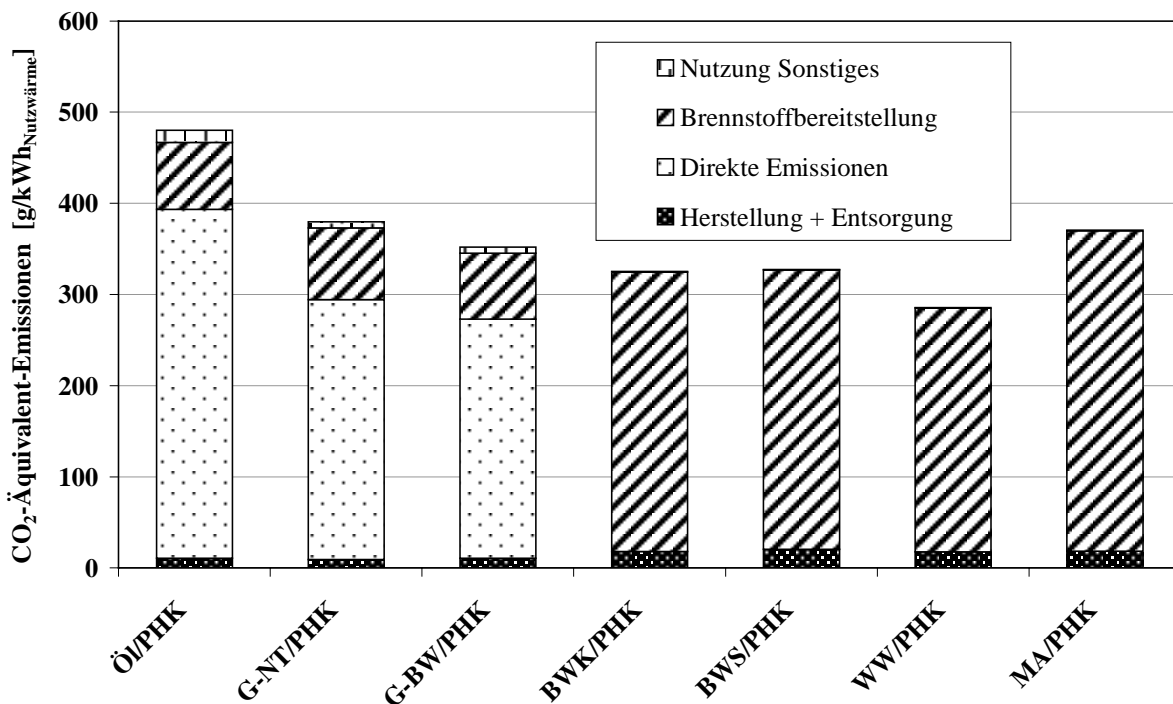


Abb. 5-15: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 80

5.2.4 Versauerungspotenzial - SO₂-Äquivalent-Emissionen

Die SO₂-Äquivalent-Emissionen der untersuchten Versorgungssysteme als Maß für das mit den Systemen verbundene Versauerungspotenzial sind in den Abb. 5-16 bis Abb. 5-19 dargestellt. Die Zahlenwerte sind im Anhang in der Tabelle D-3 aufgeführt.

Bei den SO₂-Äquivalent-Emissionen treten aufgrund der brennstoffbedingt hohen direkten Emissionen im Anlagenbetrieb und der hohen Emissionen bei der Brennstoffbereitstellung die höchsten Werte bei den ölbefeuerten-Systemen auf. Auch bei den Holzpellet-Systemen werden erhebliche Emissionen freigesetzt. Die gasbefeuerten Heizsysteme weisen hingegen die geringsten SO₂-Äquivalent-Emissionen auf.

Für die Wärmepumpen-Systeme liegen die SO₂-Äquivalent-Emissionen geringfügig über bzw. im Bereich von erdgasbefeuerten Systemen. Die SO₂-Äquivalent-Emissionen der Wärmepumpen-Systeme ergeben sich dabei primär aus der Bereitstellung der für den Betrieb benötigten elektrischen Energie in dem - der Bilanzierung zugrunde gelegten - bundesdeutschen Kraftwerkspark.

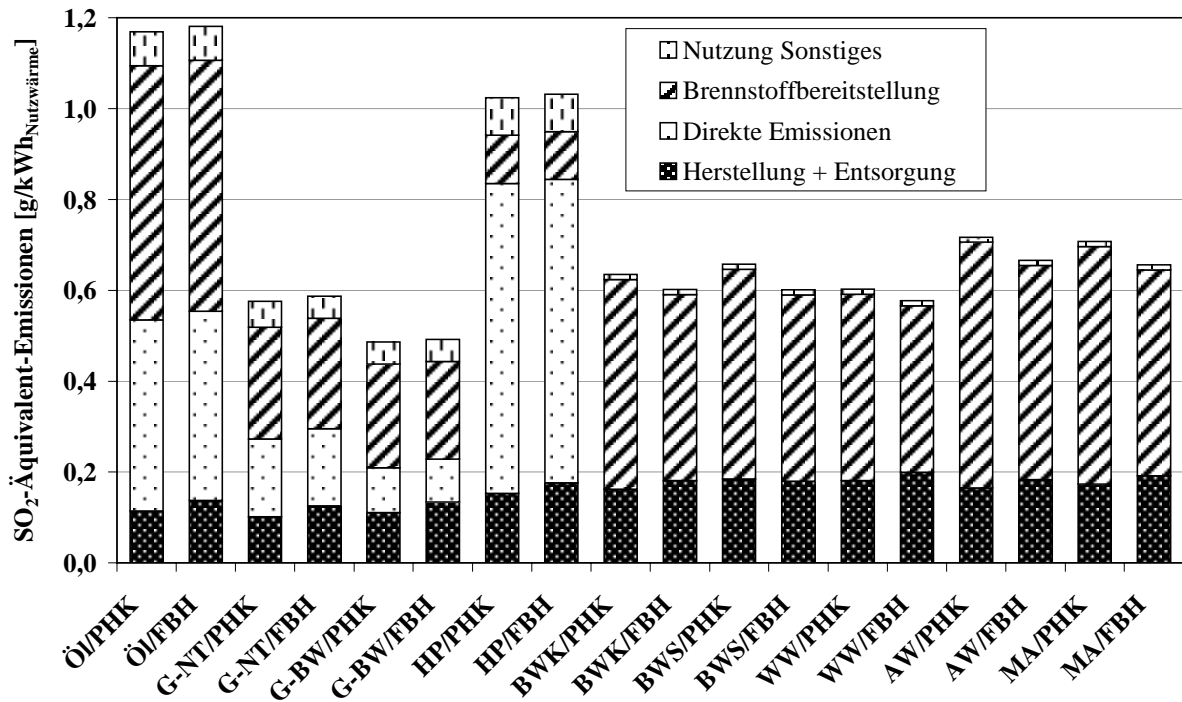


Abb. 5-16: SO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 95

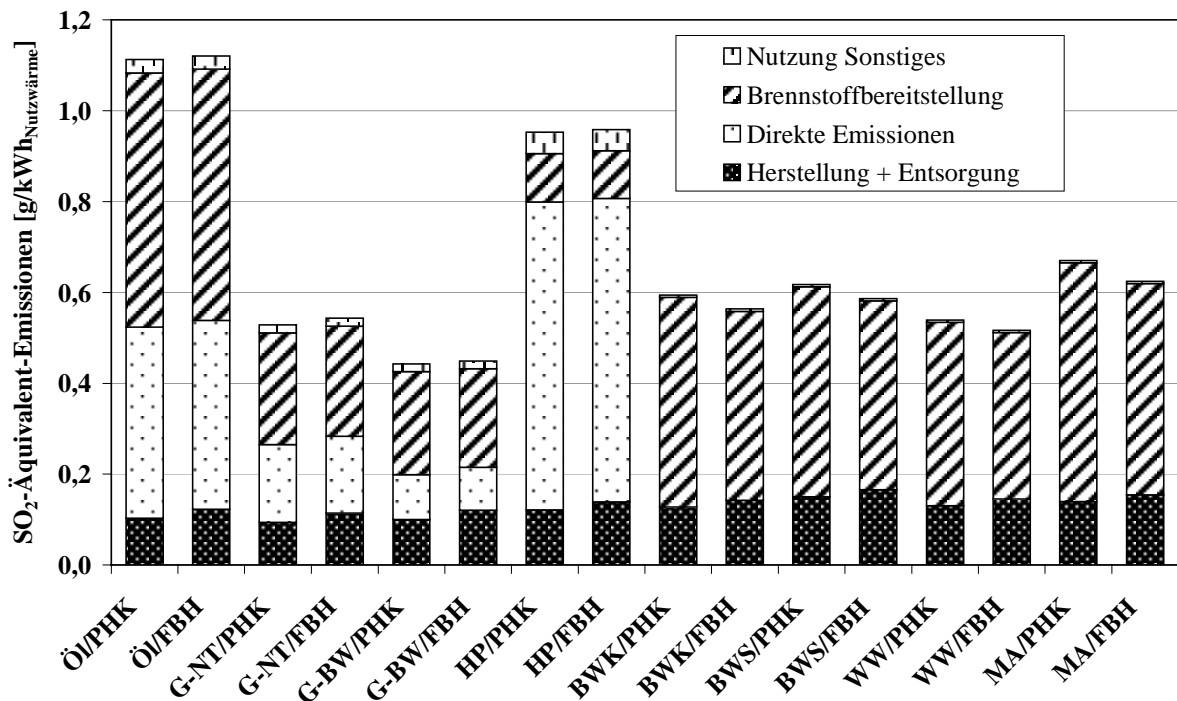


Abb. 5-17: SO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 95

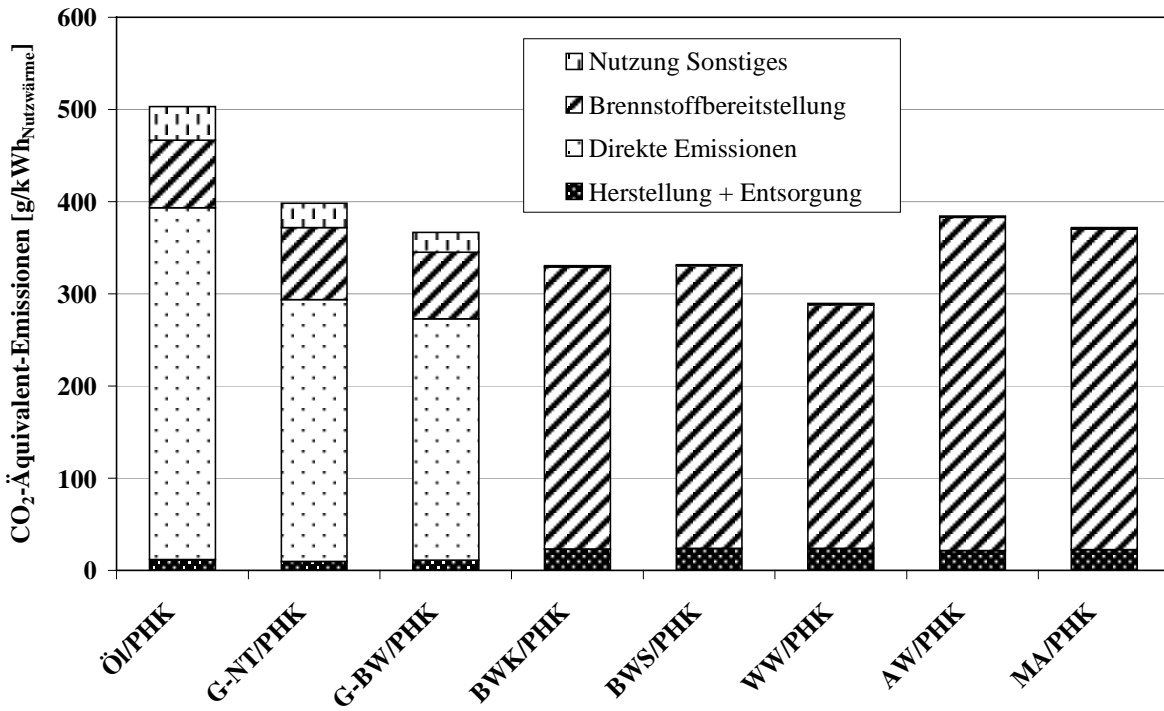


Abb. 5-18: SO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 80

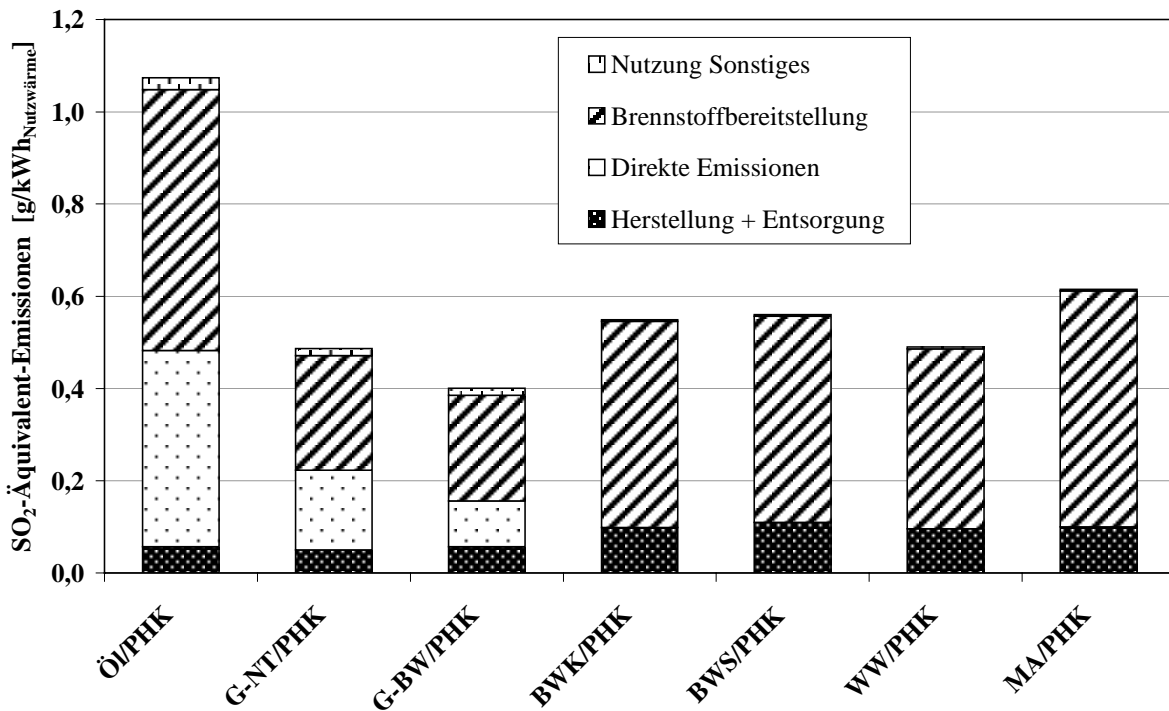


Abb. 5-19: SO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das MFH 80

Gegenüber konventionellen Gas-Brennwert-Systemen mit Plattenheizkörpern G-BW/PHK haben Wärmepumpen-Systeme mit niedrigen Arbeitszahlen (u. a. AW) bis zu 51 % höhere SO₂-Äquivalent-Emissionen; Wärmepumpen-Systeme mit vergleichsweise hohen Jahresarbeitszahlen (u. a. WW) zeigen demgegenüber SO₂-Äquivalent-Emissionen, die etwa im Bereich von erdgasbefeuerten Systemen liegen. Im Vergleich mit ölbeheizten Systemen mit Fußbodenheizung ÖL/FBH sind die SO₂-Äquivalent-Emissionen der untersuchten Wärmepumpen-Systeme mit Fußbodenheizung zwischen 40 % und 53 % niedriger, während im Vergleich mit den Holzpellet-Systemen HP/FBH die SO₂-Äquivalent-Emissionen von Wärmepumpensysteme bis zu 45 % niedriger liegen.

5.3 Zusammenfassung der ökologischen Analyse

Die ökologische Analyse der betrachteten Versorgungssysteme für die untersuchten Versorgungsaufgaben wurde anhand ausgewählter Kenngrößen als Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Es wurden die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung der einzelnen Referenzanlagen einhergehenden Energie- und Materialeinsätze, die mit der Bereitstellung dieser Energien und Materialien verbundenen Schadstoffemissionen sowie die ggf. direkten Emissionen am Anlagenstandort berücksichtigt. Dabei zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Die Wärmepumpen-Systeme mit den Wärmequellen Erdreich (BWK und BWS) und Grundwasser (WW) sind in Bezug auf den Bedarf an erschöpflichen Energieträgern sowie hinsichtlich der CO₂-Äquivalent-Emissionen im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen als günstiger einzustufen.
- Hinsichtlich des Bedarfs an erschöpflichen Energieträgern sowie den CO₂-Äquivalent-Emissionen liegen die Wärmepumpen-Systeme mit Massivabsorber (MA) bzw. Außenluftwärmepumpe (AW) im Bereich der Gas-Niedertemperatur-Systeme. Gegenüber einer Gasbrennwertheizung haben diese Systeme nur bei neuen Einfamilienhäusern leichte Vorteile. Hingegen sind der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern sowie die CO₂-Äquivalent-Emissionen auch bei diesen Systemen niedriger als bei den ölbefeuerten Heizsystemen.
- Die SO₂-Äquivalent-Emissionen der Wärmepumpen-Systeme liegen unter günstigen Voraussetzungen etwa im Bereich der Gasheizungen; sie sind im Vergleich zu den betrachteten Ölheizsystemen aber deutlich niedriger. Wird der Trend der letzten Jahre einer kontinuierlichen Reduzierung der SO₂-Äquivalent-Emissionen im bundesdeutschen Kraftwerkspark weiter fortgesetzt /VDEW 2001b/, ist allerdings zu erwarten, dass die SO₂-Äquivalent-Emissionen von Wärmepumpen-Systemen zukünftig auch niedriger als jene von gasbefeuerten Systemen liegen werden.
- Aufgrund der hohen Jahresarbeitszahl zeigt das Wärmepumpen-System mit Wärmequelle Wasser und Fußbodenheizung die günstigsten Ergebnisse aller untersuchten

Wärmepumpen-Systeme in Bezug auf Endenergiebedarf, Bedarf an erschöpflichen Energieträgern sowie den CO₂- und SO₂-Äquivalent-Emissionen.

- Die Fußbodenheizung ist insbesondere bei Wärmepumpen-Systemen ökologisch vorteilhaft: Wärmepumpen-Systeme mit Fußbodenheizung zeigen gegenüber Systemen mit Plattenheizkörpern durchweg Einsparungen bei den betrachteten Kenngrößen, die größer sind als bei den konventionellen Heizsystemen.

6 Ökonomische Analyse

Neben der ökologischen Betrachtung stellt die ökonomische Betrachtung der Versorgungssysteme ein wesentliches Kriterium für die Investitionsentscheidung dar. Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung lassen sich in statische und dynamische Verfahren gliedern. Die dynamischen Verfahren sind zwar aufwendiger, führen jedoch insbesondere bei langen Nutzungsdauern von Anlagen zu sinnvolleren Ergebnissen.

Ein übliches dynamisches Verfahren zur Berechnung der „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ ist in /VDI 2067-1 1999/ beschrieben. Das dort dargestellte Berechnungsverfahren nach der *Annuitätsmethode* wird im folgenden zur ökonomischen Analyse der ausgewählten Versorgungssysteme angewendet.

Zunächst wird das methodische Vorgehen bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung erläutert. Nach der Darstellung der Annahmen und der kapital-, bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten werden in einem Vollkostenvergleich jeweils die Gesamtannuität und die Wärmegestehungskosten für alle Versorgungssysteme und Gebäude gegenübergestellt.

6.1 Methodik der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird für die ausgewählten Versorgungssysteme in Anlehnung an /VDI 2067-1 1999/ durchgeführt. Die Kosten sind unterteilt in

- kapitalgebundene Kosten,
- bedarfsgebundene Kosten,
- betriebsgebundene Kosten und
- sonstige Kosten.

Für die Berechnungen der Versorgungssysteme werden die sonstigen Kosten, die beispielsweise Versicherungen, Steuern, allgemeine Abgaben und Verwaltungskosten beinhalten, vernachlässigt. Die Berechnung erfolgt in konstanten Preisen, da zukünftige relative Preisänderungen nur schwer abzuschätzen sind. Auf die zugrundegelegten Kosten und Preise wird in Kapitel 6.2.1 und Kapitel 6.3.1 näher eingegangen. Da relative Preisänderungen unberücksichtigt bleiben, entsprechen die Ergebnisse der folgenden Analyse direkt den Ergebnissen bei einer Rechnung in nominalen Preisen, wie in /VDI 2067-1 1999/ vorgesehen.

Zur Berechnung der kapital-, bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten werden folgende Annahmen getroffen:

- Zinsfaktor $q = 1,05$
- Betrachtungszeitraum $T = 20$ Jahre

Der Betrachtungszeitraum entspricht damit der Lebensdauer der kapitalintensiven Anlagenkomponenten. Für die Berechnung des Zinsfaktors wird von einem langfristigen durchschnittlichen nominalen Zinssatz von 7 % für Hypothekenkredite und einer erwarteten Infla-

tionsrate von 2 % ausgegangen. Damit ergibt sich der obengenannte Zinsfaktor in konstanten Preisen und ein *Annuitätsfaktor* von $a = 0,0802$ für die Investitionskosten.

6.2 Kapitalgebundene Kosten

Für die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten werden zunächst für alle Anlagenkomponenten der Versorgungssysteme die Investitionskosten A_0 , die Nutzungsdauer T_N , die Ersatzhäufigkeit n im Betrachtungszeitraum T und der Instandsetzungsfaktor ermittelt. Hierauf aufbauend wird die Annuität der kapitalgebundenen Kosten berechnet.

6.2.1 Investitionskosten

Im folgenden werden die Investitionskosten der einzelnen Versorgungssysteme mit den zu Grunde liegenden Annahmen dargestellt. Hierzu werden die Systemkomponenten in Gruppen eingeteilt. Für die Berechnung werden die in Tabelle 6-1 dargestellten Systemkomponenten berücksichtigt.

Tabelle 6-1: Systemkomponenten der Versorgungssysteme

Nr.	Systemkomponente	Bemerkung bzw. Beispiele	System
1	Wärmeerzeuger	Heizkessel bzw. Wärmepumpe	alle
2	Wärmequellenanlage	Bohrarbeiten, Erschließung des Bohrlochs usw.	nur WP ^a
3	Regelung	Thermostatventile, PI-Regelung	alle
4	Leitungssystem	Verbindungsleitungen zu den Heizflächen	alle
5	Heizflächen	Plattenheizkörper oder Fußbodenheizung	alle
6	Öltank	Speicher im Haus	nur Öl
7	Pufferspeicher	Stehender Speicher aus Stahl	HP ^b , WP / PHK ^c
8	Schornstein, Heizraum, Brennstofflager	Neubau der Komponente, Kosten der Schornsteinsanierung im Altbau	alle (bei WP eingeschränkt)
9	Installation	Einbau des Heizsystems	alle
10	Anschlusskosten	Anschlusskosten an Gasleitung Heizkostenverteilung	nur Gas nur MFH 95

^aWP: Wärmepumpe

^bHP: Holzpellet

^cPHK: Plattenheizkörper

Besonderheiten ergeben sich bei den Altbauten, da hier bereits ein Heizungssystem besteht, das durch ein neues ersetzt werden soll. Bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung für die *Altbauten* (EFH 80 und MFH 80) werden folgende Annahmen getroffen:

- Bei Einbau einer Ölheizung war auch zuvor eine Ölheizung installiert (d. h. dass z. B. der Tankraum vorhanden ist).
- Bei der Installation eines Gasheizungssystems war auch zuvor ein mit Gas befeuertes Heizungssystem installiert (d. h. dass z. B. der Gasanschluss vorhanden ist).
- Für die Systemkomponenten Rohrleitungssystem, Schornstein, Heizraum und Brennstofflager ist kein Austausch bzw. Ersatz erforderlich, da die rechnerische Nutzungsdauer die Summe aus bisheriger Nutzungsdauer und den Betrachtungszeitraum übersteigt.
- Für Gas- und Ölheizungssysteme ist aufgrund der geringeren Abgasvolumenströme und –temperaturen eine Anpassung des Schornsteins erforderlich.⁴
- Bei Einbau eines Wärmepumpen-Systems war zuvor ein Ölheizungssystem installiert.

Im folgenden sind die für die Berechnungen angenommenen *Investitionskosten* gegliedert nach Bauteilgruppen für alle Versorgungssysteme und Gebäude dargestellt (vgl. Abb. 6-1 bis Abb. 6-4). Die Werte wurden in Anlehnung an /IFO 1998/, /LGA 2000a/, /LGA 2000b/, /Kletzander 2001/ und Preisangaben von Anlagenherstellern (u. a. /AEG 1999/, /Hautec 1999/, /Viessmann 1999/) festgelegt (s. Anhang E). Hierbei ist zu beachten, dass

- die Kosten je nach tatsächlicher Gestaltung des Gebäudes deutlich variieren können,
- die Preisangaben der Hersteller deutliche Streuungen aufweisen.

Für die folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden die Investitionskosten so gewählt, dass sie für alle Versorgungssysteme etwa im mittleren Bereich liegen. Die Preisrelationen der Systeme zueinander entspricht etwa denen nach /IFO 1998/ und /LGA 2000b/.

⁴ Gegenüber herkömmlichen Kesseltypen sinken beim Einbau moderner Niedertemperatur- und Brennwertanlagen die Temperatur und der Massenstrom des Abgases. In einem dann überdimensionierten Schornstein kann es leicht zur Kondensatbildung insbesondere in Kaltbereichen (z. B. Dachboden) kommen. Kondensat und Abgasbestandteile schlagen sich an den mineralischen Schornsteinwänden nieder und können deren Durchfeuchtung bzw. Versottung bewirken. Es werden daher Innenrohre aus Edelstahl, hochwertiger Keramik, Kunststoff oder Glas in den Schornstein eingesetzt.

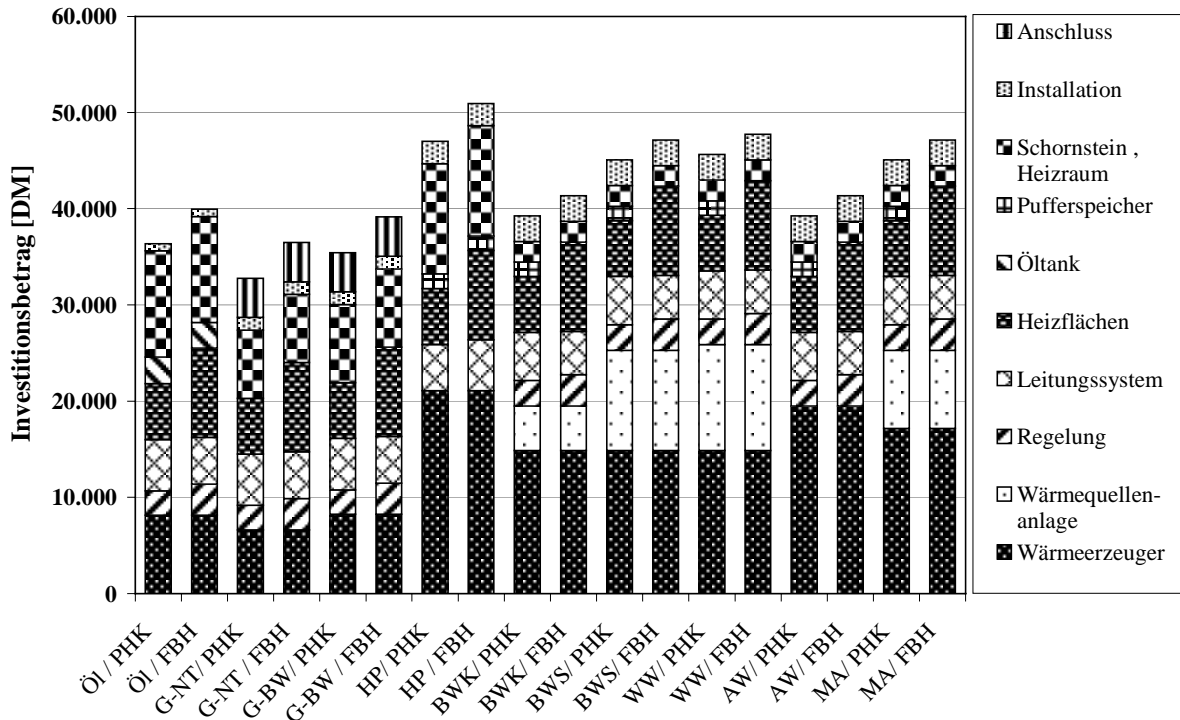


Abb. 6-1: Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das EFH 95 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)

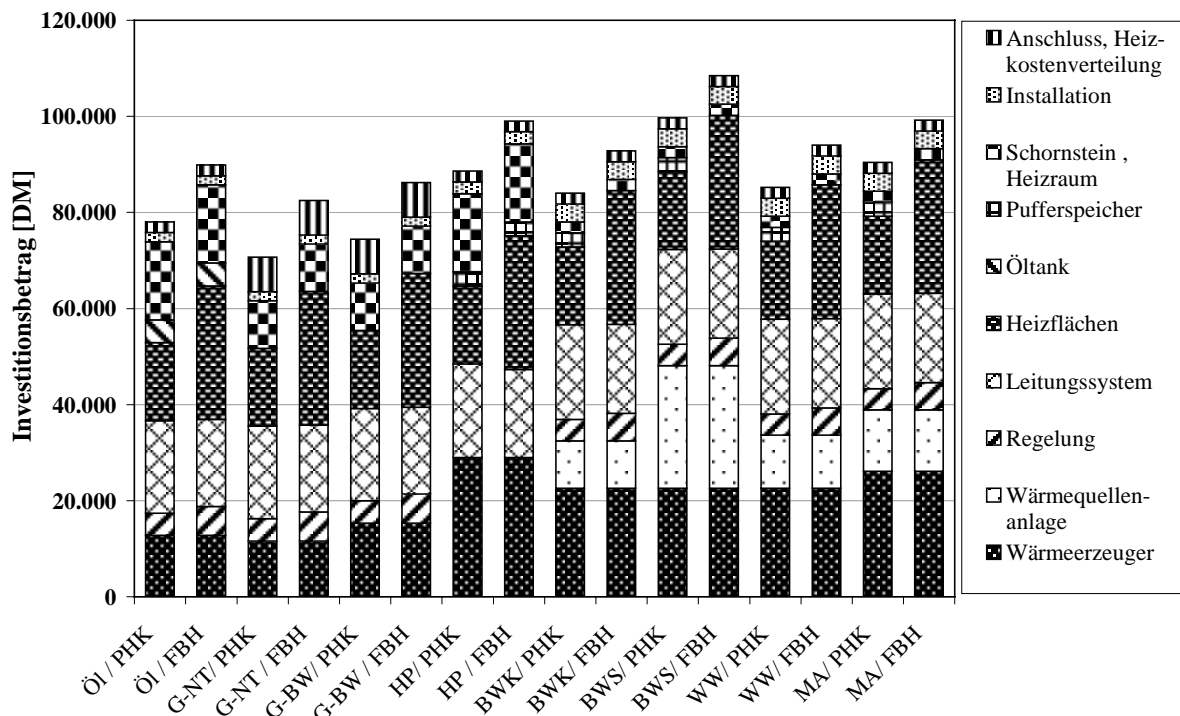


Abb. 6-2: Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das MFH 95 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)

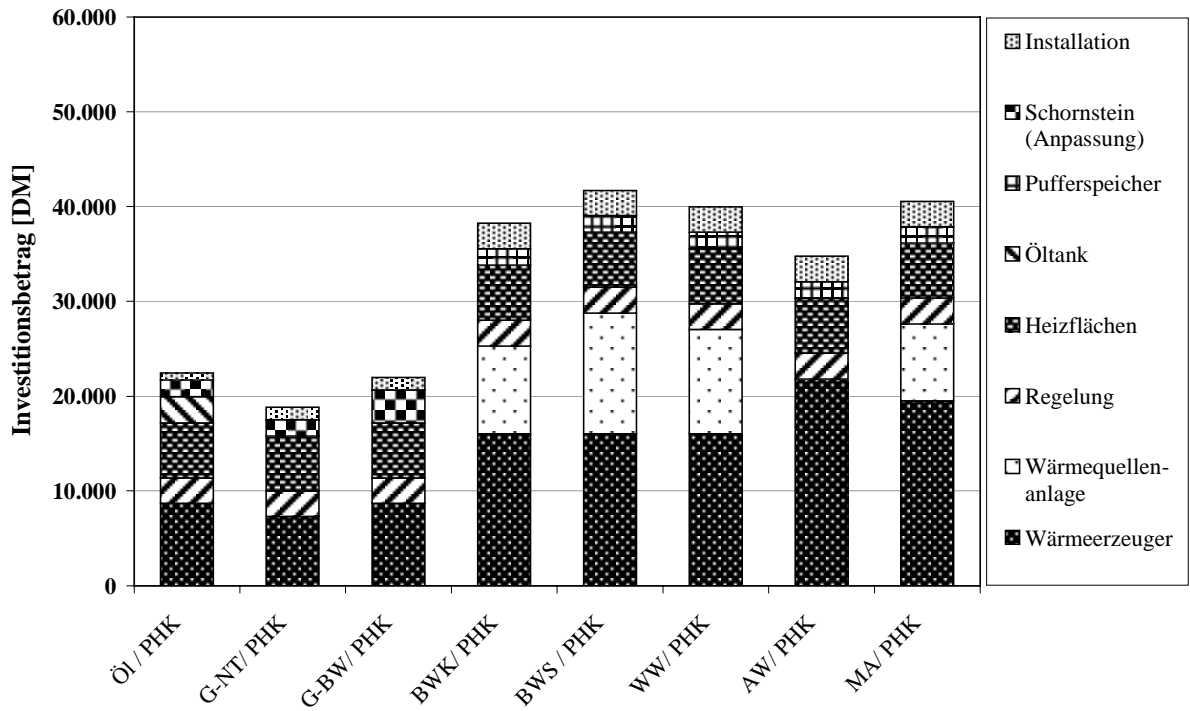


Abb. 6-3: Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das EFH 80 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)

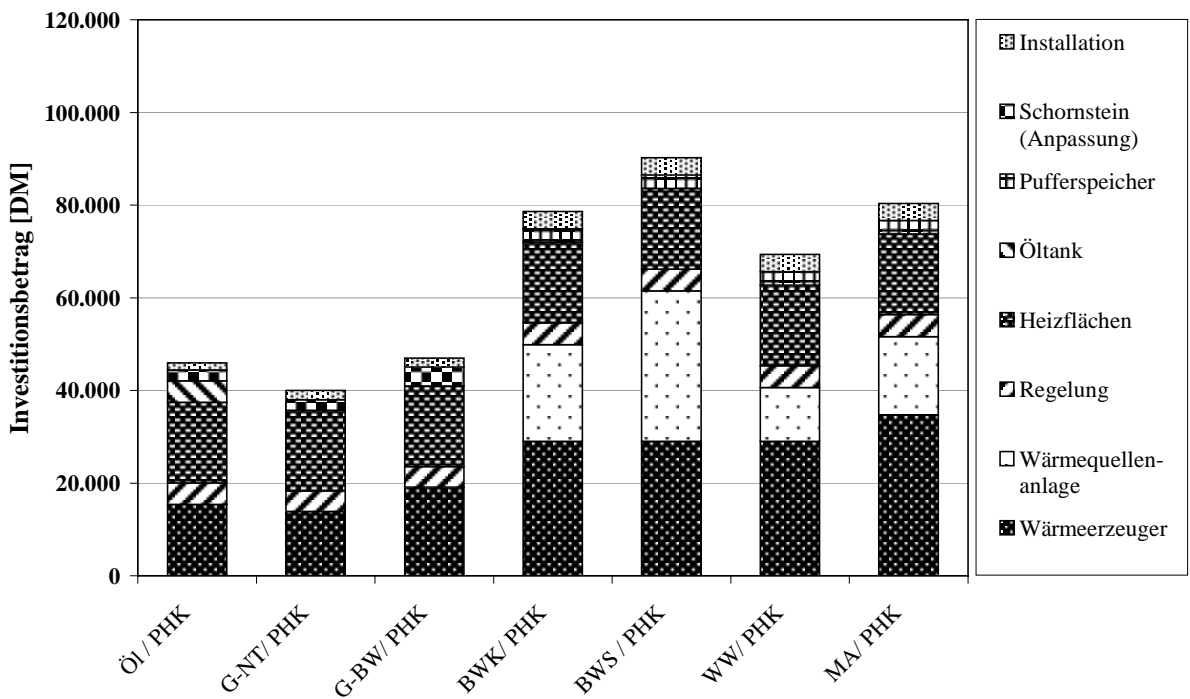


Abb. 6-4: Investitionskosten (inkl. MwSt.) der Versorgungssysteme für das MFH 80 (Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung)

Aus den Abbildungen wird folgendes deutlich:

- Bei den Altbauten sind die Investitionskosten der fossil beheizten Systeme geringer als die der Wärmepumpen. Dies ist u. a. auf bereits im Gebäude vorhandene Anlagenteile zurückzuführen.
- In Neubauten ist der Unterschied der Investitionskosten von fossil beheizten und Wärmepumpen-Systemen deutlich geringer. Dies ist u. a. durch die Einsparung des Schornsteins, des Brennstofflagerraums, des Heizöltanks und der Anschlussgebühren bei Gasversorgung bedingt.
- Die Holzpellet-Systeme weisen im EFH 95 die höchsten Investitionskosten auf; im MFH 95 liegen sie in der gleichen Größenordnung wie die Wärmepumpensysteme.
- Bei den Wärmepumpen-Systemen stellen die Wärmepumpen und die Wärmequellenanlage die dominierenden Kostenanteile dar.
- Die Systeme mit Fußbodenheizung sind gegenüber denen mit Plattenheizkörpern um rund 10 bis 20 % teurer.

6.2.2 Annuität der kapitalgebundenen Kosten

Basierend auf den Investitionskosten kann für jede Systemkomponente die Annuität der kapitalgebundenen Kosten $A_{N,K}$ in [DM/a] berechnet werden:

$$A_{N,K} = (A_0 - R_w) \cdot a + f_K \cdot A_0 \quad (6-1).$$

mit	A_0	Investitionskosten	[DM]
	R_w	Barwert des Restwerts am Ende des Betrachtungszeitraums T	[DM]
	a	Annuitätsfaktor	[-]
	f_K	Faktor für Instandsetzung gemäß Tabelle A2 der /VDI 2067-1 1999/	[%]

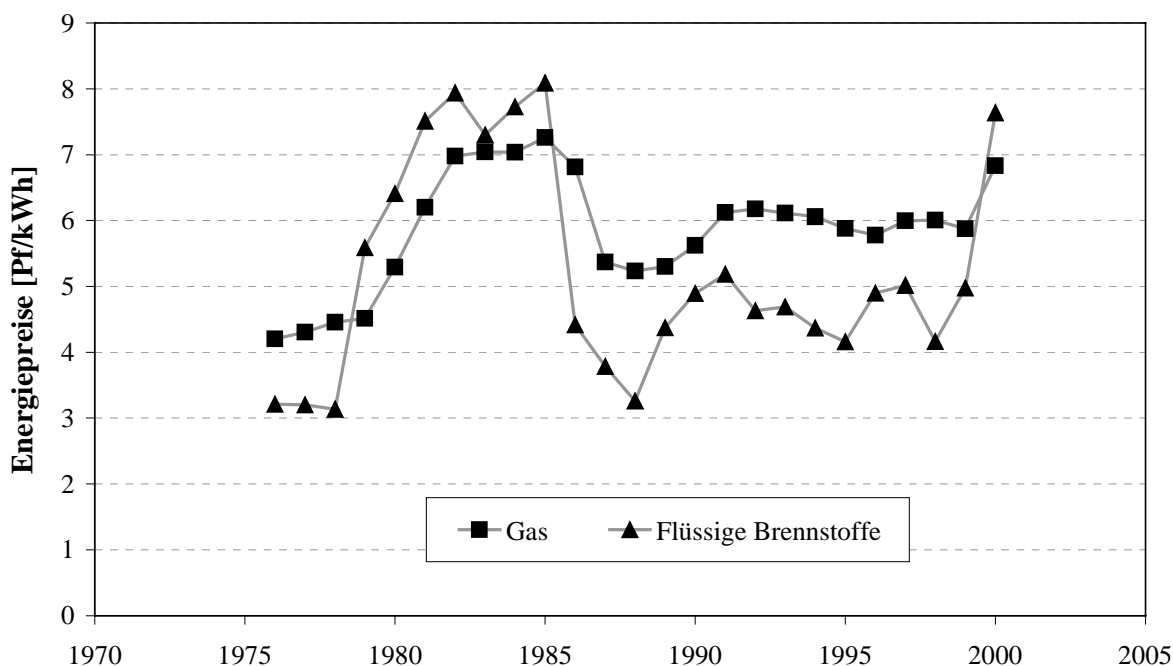
Wie aus Gleichung (6-1) ersichtlich ist, wird hierbei der Restwert der Bauteile am Ende des Betrachtungszeitraums und die Instandhaltung mit berücksichtigt. Für Bauteile, deren Nutzungsdauer T_N geringer ist als der Betrachtungszeitraum T, werden die Barwerte der Ersatzbeschaffung gemäß /VDI 2067-1 1999/ berechnet. Die Ergebnisse sind in Anhang E und in Abb. 6-6 bis Abb. 6-9 dargestellt.

6.3 Bedarfsgebundene Kosten

Die bedarfsgebundenen Kosten enthalten die Brennstoffkosten und die Kosten für Strom inkl. der Hilfsenergie. Im Folgenden wird die zunächst auf die Festlegung der verwendeten Energiepreise eingegangen.

6.3.1 Energiepreise

Die zeitliche Entwicklung der Energiepreise, insbesondere für Öl und Gas, weist deutliche Schwankungen auf (vgl. Abb. 6-5). Neben der Förderpolitik der OPEC und dem Wechselkurs von Euro zu Dollar ist zunehmend die nationale Steuer- und Energiepolitik von Bedeutung. Von letzterer sind alle Energieträger, aber insbesondere die Elektrizität betroffen.



eigene Berechnungen nach /BMWi 2000/ und /Statistisches Bundesamt 2000b/

Abb. 6-5: Entwicklung der Preise von Gas und flüssigen Brennstoffen für Haushalte in Deutschland

In Tabelle 6-2 ist die Entwicklung der Öko- und Mehrwertsteuer in Deutschland dargestellt /VDI-Nachrichten 1999/.

Tabelle 6-2: Entwicklung der Öko- und Mehrwertsteuer in Deutschland

Zeitpunkt	Ökosteuer (Regelsatz)			Mehrwertsteuer
	Strom	Heizöl L	Erdgas	
bis 31.03.99	-	8 Pf/l	0,36 Pf/kWh	15 %
ab 01.04.99	2,0 Pf/kWh	12 Pf/l	0,68 Pf/kWh	16 %
ab 01.01.00	2,5 Pf/kWh	12 Pf/l	0,68 Pf/kWh	16 %
ab 01.01.01	3,0 Pf/kWh	12 Pf/l	0,68 Pf/kWh	16 %
ab 01.01.02	3,5 Pf/kWh	12 Pf/l	0,68 Pf/kWh	16 %
ab 01.01.03	4,0 Pf/kWh	12 Pf/l	0,68 Pf/kWh	16 %

nach /VDI-Nachrichten 1999/

Strom wird durch die Ökosteuer deutlich höher belastet als andere Energieträger. Dies gilt, wenn man die Besteuerung auf eine kWh_{Endenergie} bezieht, aber auch je kWh_{Primärenergie}. Auch hinsichtlich der Besteuerung je t_{CO2} weist derzeit Strom den höchsten Steuersatz auf. Darüber hinaus verteuert sich Elektrizität aufgrund des /Erneuerbare-Energien-Gesetz 2000/ und /Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2000/. Insbesondere beim Sondertarif für die Stromversorgung von Wärmepumpen haben diese Steuern und Abgaben einen signifikanten Einfluss auf den Preis. Ob dies im Sinne einer nachhaltigen Wämbereitstellung zweckmäßig bzw. politisch wünschenswert ist, soll hier nicht weiter erörtert werden.

Für die folgenden Wirtschaftlichkeitsrechnungen werden aufgrund der Preisschwankungen keine Marktpreise eines bestimmten Zeitpunktes verwendet, sondern es werden mittlere Energiepreise mehrerer Jahre berechnet. Ausgehend von den Energiepreisen für Haushalte von Gas, flüssigen Brennstoffen und Elektrizität (Tarifkunden) des Jahres 1995 /BMWi 2000/ werden für die Jahre 1996 bis 2000, mit den entsprechenden Preisindizes aus /Statistisches Bundesamt 2000b/, die Verbraucherpreise der einzelnen Energieträger berechnet. Hiervon werden Mehrwert- und Ökosteuer sowie die Ausgleichsabgabe abgezogen und anschließend wird der *Mittelwert dieser Energiepreise über die letzten fünf Jahre* gebildet. Zum jeweiligen Mittelwert wird sodann die *Öko- und Mehrwertsteuer für das Jahr 2000* addiert. Die sich ergebenden Preise sind Durchschnittswerte für Haushalte und enthalten bereits die jährlich anfallenden Grundkosten. Die verwendeten Preise zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der bedarfsgebundenen Kosten sind in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Energiepreise für die Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten

Energieträger	Einheit	Preise inkl. MwSt und Ökosteuer
Gas (bezogen auf Brennwert)	Pf/kWh	6,37
Heizöl (leicht)	Pf/kWh	6,62
Elektrizität (Tarifkunden)	Pf/kWh	28,68
Elektrizität (Wärmepumpe)	Pf/kWh	14,95
Holzpellets	Pf/kWh	6,29

Für den *Sondertarif Wärmepumpe* wird auf Preise für das Jahr 1998 nach /VDEW 1998a/ zurückgegriffen (vgl. Anhang E)⁵. Für den Hochtarif (kurz: HT) ergibt sich ein über die Zahl der Sonderabkommen gewichteter Mittelwert des Arbeitspreises von knapp 13 Pf/kWh, für den Niedertarif (kurz: NT) rund 10 Pf/kWh. Für den Tarif HT werden 34 % des Energiebe-

⁵ Eine Zeitreihe zur Entwicklung des Sondertarifs für Wärmepumpen ist nicht verfügbar. Nach Aussagen mehrerer Energieversorgungsunternehmen sind diese jedoch seit Einführung nahezu konstant geblieben. Preissteigerungen ergaben bzw. ergeben sich nur durch die oben genannten Steuern und Abgaben.

zugs, für NT 66 % angenommen. Für die Grundgebühr wird 90 DM/a angesetzt. Die entsprechenden Preise für das Jahr 2000 werden unter Berücksichtigung der relevanten Öko- und Mehrwertsteuer berechnet.

Für *Holzpellets* ist noch kein flächendeckendes Versorgungsnetz in Deutschland vorhanden. So ergeben sich deutliche regionale Preisunterschiede. Für die weiteren Berechnungen wird in Anlehnung an /Heizung Klima Kälte 1999/ in Preis von rund 310 DM/t (inkl. MwSt. bei einem Heizwert von 4,9 kWh/kg angenommen; dies entspricht 6,29 Pf/kWh.

6.3.2 Jährliche bedarfsgebundene Kosten

Die jährlichen bedarfsgebundenen Kosten werden gemäß /VDI 2067-1 1999/ berechnet und sind in Anhang E und in den Abbildungen der Gesamtannuität (Abb. 6-6 bis Abb. 6-9) dargestellt.

Bei der Ermittlung der bedarfsgebundenen Kosten der gasbeheizten Systeme ist zu berücksichtigen, dass der Nutzungsgrad auf den Heizwert H_U und der Gaspreis auf den Brennwert H_O bezogen wird. Aus diesem Grund ist bei der Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten der Quotient aus Heizwert und Brennwert ($H_U/H_O = 0,90$) eingerechnet.

Bei der Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten der Wärmepumpensysteme werden 50 % der Hilfsenergie (Anteil für Heizungsumwälzpumpe) mit dem Strompreis des Wärmepumpensondertarifs berechnet. Für die restlichen 50 % (Anteil für Regelung) wird der Strompreis für Tarifkunden berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die Holzpellet-Systeme die höchsten bedarfsgebundenen Kosten aufweisen. Die untersuchten Wärmepumpen-Systeme weisen durchweg geringere bedarfsgebundene Kosten als die konventionellen Systeme auf. Am günstigsten schneiden die Wasser-Wasser-Wärmepumpen aufgrund ihrer hohen Arbeitszahl ab.

6.4 Betriebsgebundene Kosten

Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören u. a. Kosten für Wartung und Reinigung. Für die vier Versorgungsaufgaben mit den jeweiligen Versorgungssystemen sind die jährlichen betriebsgebundenen Kosten im Anhang E zusammengefasst.

Die geringsten Annuitäten der betriebsgebundenen Kosten weisen die Wärmepumpen-Systeme auf, während sich für die konventionellen Heizsysteme und die Holzpellet-Systeme höhere Aufwendungen für Wartung und Reinigung (z. B. Schornsteinfeger) ergeben. Allerdings erweisen sich die betriebsgebundenen Kosten als von eher untergeordneter Bedeutung im Vergleich zu den kapital- und bedarfsgebundenen Kosten.

6.5 Vollkostenvergleich

Ein Vollkostenvergleich unter Berücksichtigung der kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten wird im folgenden anhand der Gesamtannuitäten der jeweiligen Versorgungssysteme durchgeführt. Anschließend werden die Wärmegestehungskosten der Versorgungssysteme der vier Versorgungsaufgaben dargestellt.

6.5.1 Gesamtannuität aller Kosten

Die Gesamtannuität stellt die Summe der kapital-, bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten der Versorgungssysteme dar (Kapitel 6.2 bis 6.4). Sie entspricht dem Betrag, der pro Jahr für die Bereitstellung der Nutzwärme durch das Versorgungssystem zu entrichten ist. Die Ergebnisse für die einzelnen Versorgungssysteme und Versorgungsaufgaben sind in Abb. 6-6 bis Abb. 6-9 dargestellt, die Zahlenwerte im Anhang E.

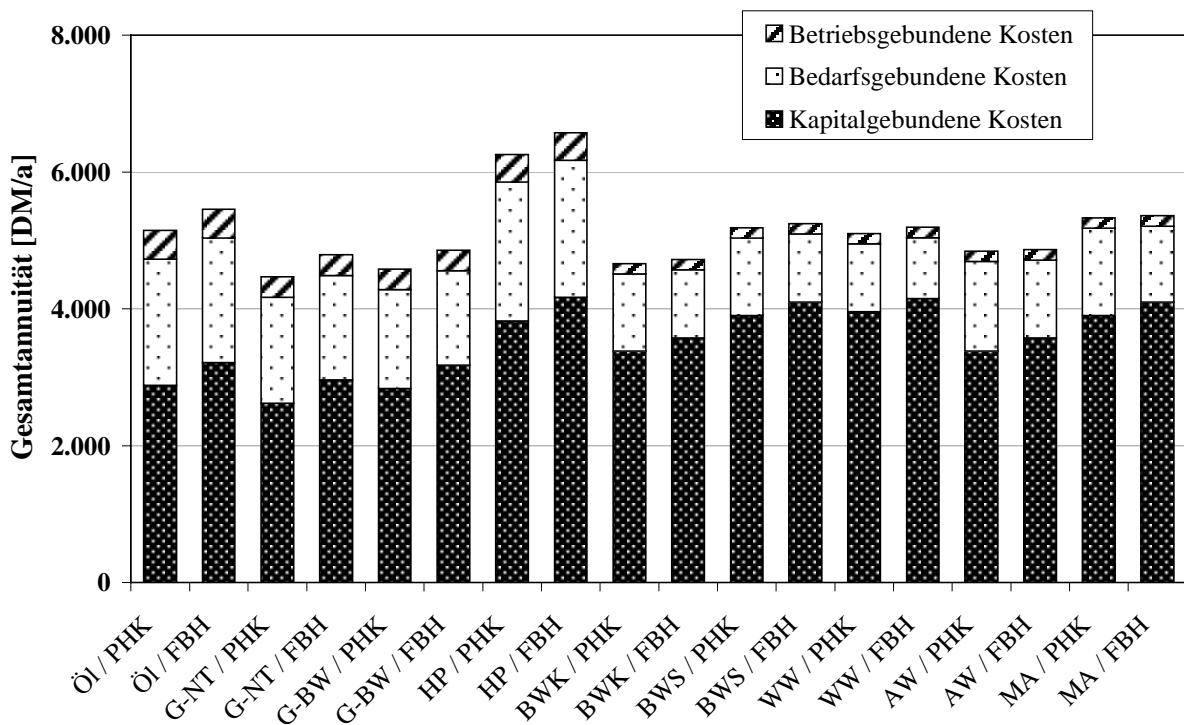


Abb. 6-6: Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das EFH 95

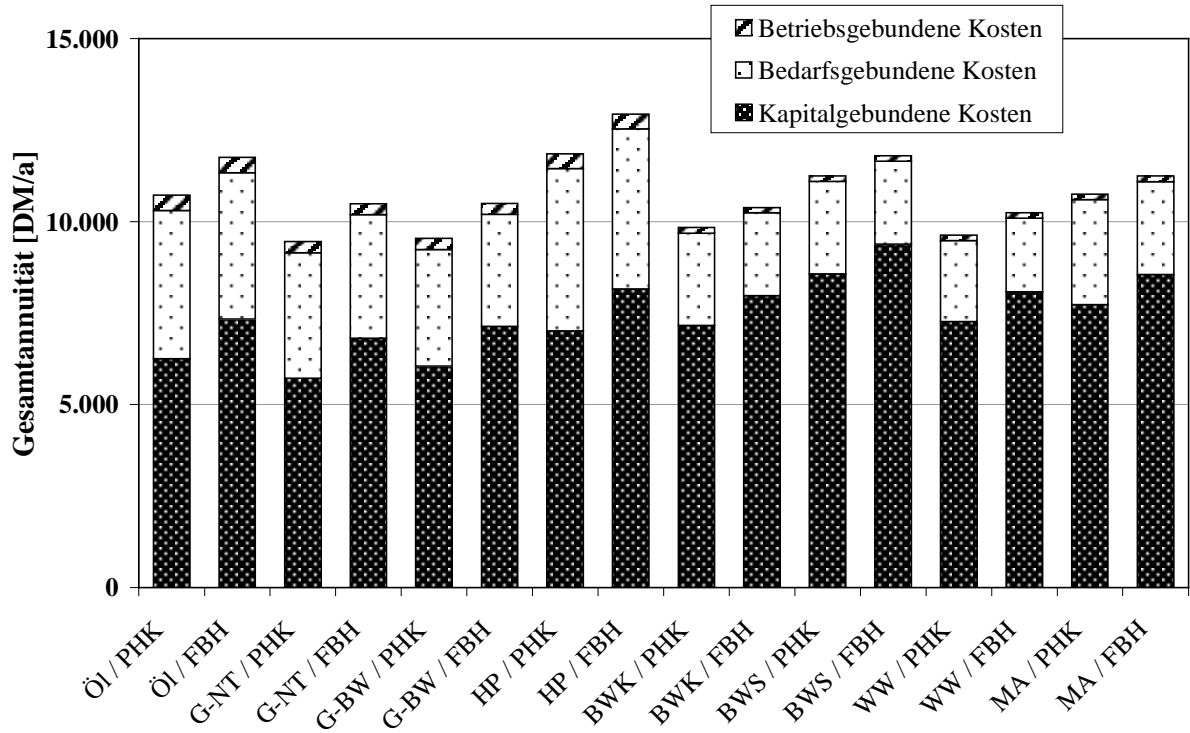


Abb. 6-7: Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das MFH 95

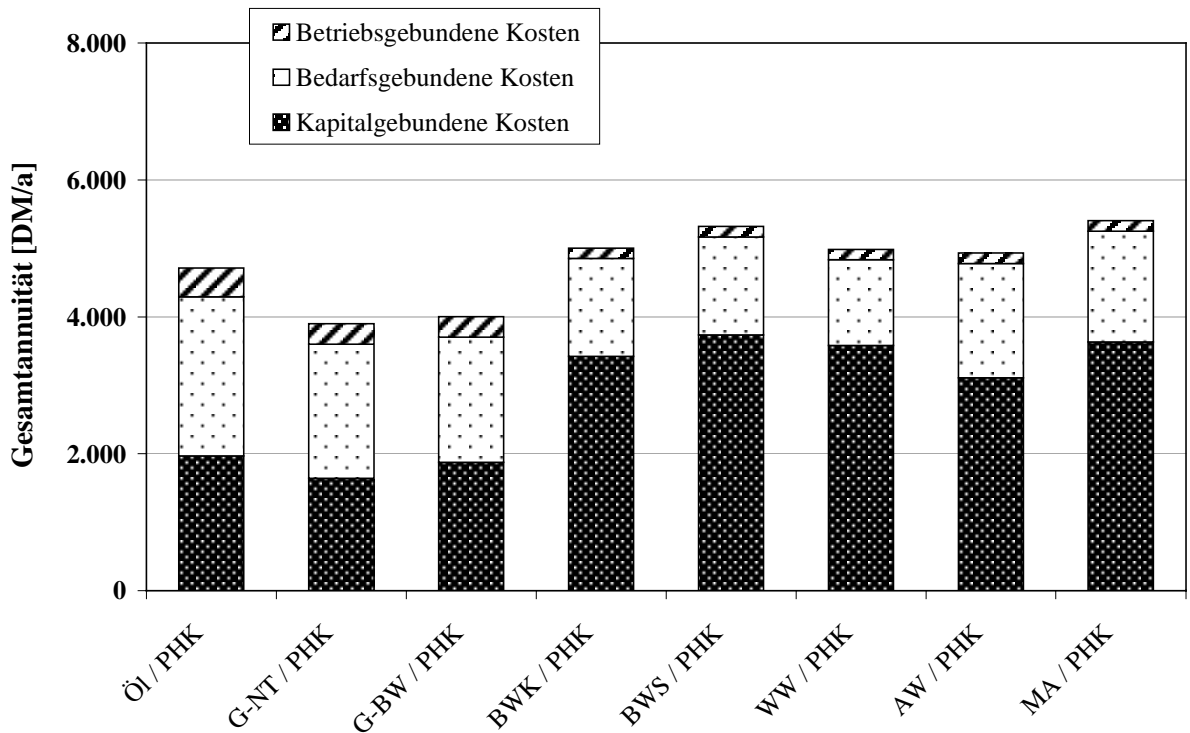


Abb. 6-8: Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das EFH 80

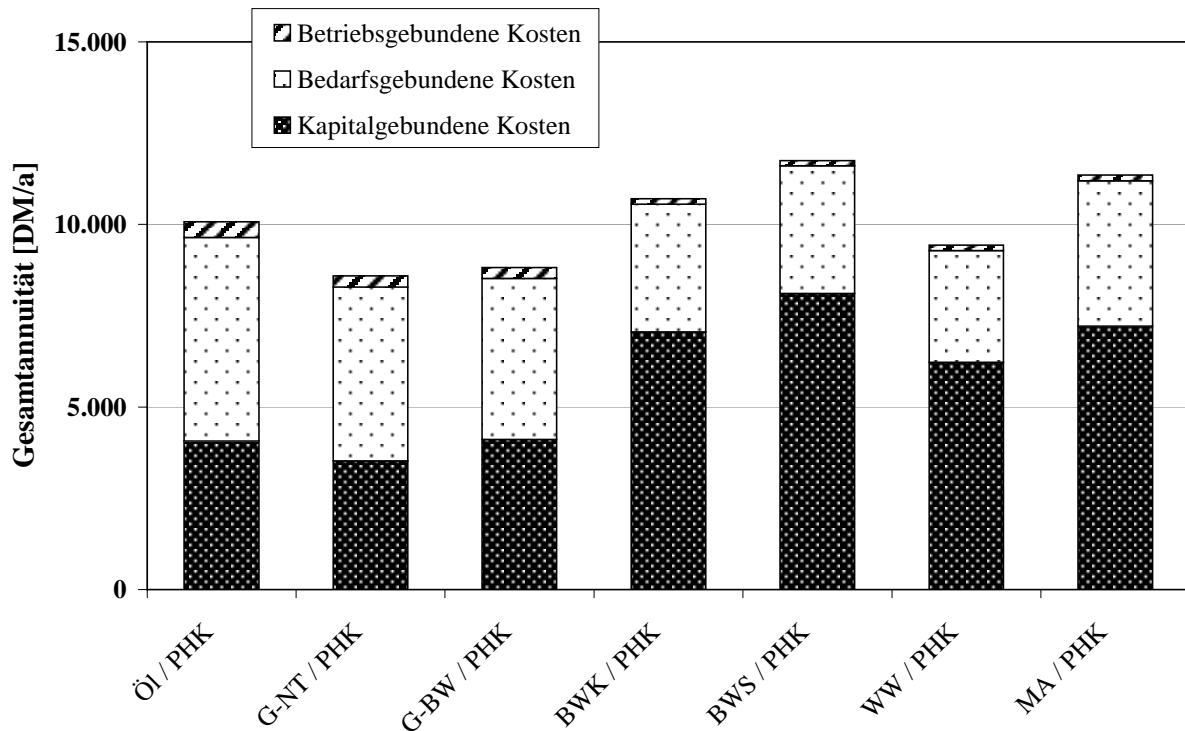


Abb. 6-9: Gesamtannuität der Versorgungssysteme für das MFH 80

Aus den Abbildungen wird folgendes deutlich:

- Die Holzpellet-Systeme haben die höchsten Gesamtannuitäten (d. h. die höchsten Kosten pro Jahr), die mit Gas beheizten Systeme haben die geringste Gesamtannuität.
- Der Unterschied der Gesamtannuitäten von gasbeheizten und Wärmepumpen-Systemen ist deutlich geringer als der Unterschied in den Investitionskosten. Der Grund besteht darin, dass die bedarfsgebundenen Kosten bei den Wärmepumpen-Systemen deutlich niedriger sind als bei den fossil beheizten Systemen.
- Bei den Neubauten ist die Gesamtannuität der mit Öl beheizten Systeme höher als die einiger Wärmepumpen-Systeme. Besonders günstig sind hier die Systeme mit Erdkollektor und das Grundwassersystem.
- Bei den Altbauten haben die Wärmepumpen-Systeme insbesondere beim MFH nahezu gleiche Gesamtannuitäten wie die Ölheizsysteme (und dies obwohl für die Ölheizung bereits Anlagenteile vorhanden sind).
- Beim Neubau eines kleinen Mehrfamilienhauses mit Fußbodenheizung (MFH 95) sind die Wärmepumpen-Systeme mit Erdkollektor oder Wärmequelle Wasser genauso kostengünstig wie Gasheizungs-Systeme.
- Der Unterschied der Gesamtannuitäten aufgrund der Fußbodenheizung bzw. der Plattenheizkörper ist bei den Wärmepumpen- und beim Gas-Brennwert-Systeme relativ gering, da sich bei diesen Systemen die niedrige Vorlauftemperatur vorteilhaft auf die Jahresarbeitszahl und damit die bedarfsgebundenen Kosten auswirkt. Dennoch ist in beiden Fällen die Ausführung mit Plattenheizkörpern noch kostengünstiger.

6.5.2 Wärmegestehungskosten

Die Wärmegestehungskosten ergeben sich aus dem Verhältnis der Gesamtannuitäten bezogen auf den Nutzwärmebedarf der Versorgungsaufgaben (d. h. Jahresheizwärmebedarf und Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung). Somit entsprechen für eine gegebene Versorgungsaufgabe die Relationen der Gesamtannuitäten der Versorgungssysteme denen der Wärmegestehungskosten zueinander.

Die Ergebnisse sind in Abb. 6-10 bis Abb. 6-13 sowie im Anhang E dargestellt. Es wird deutlich, dass die Wärmegestehungskosten im Neubau bei Mehrfamilienhäusern um rund fünf Pfennig per kWh_{Nutzwärme} niedriger liegen als im Einfamilienhaus. Aufgrund bereits vorhandener Anlagenteile ist das Preisniveau bei der Heizungsrenovierung in Altbauten rund acht Pfennig niedriger als bei den entsprechenden Neubauten.

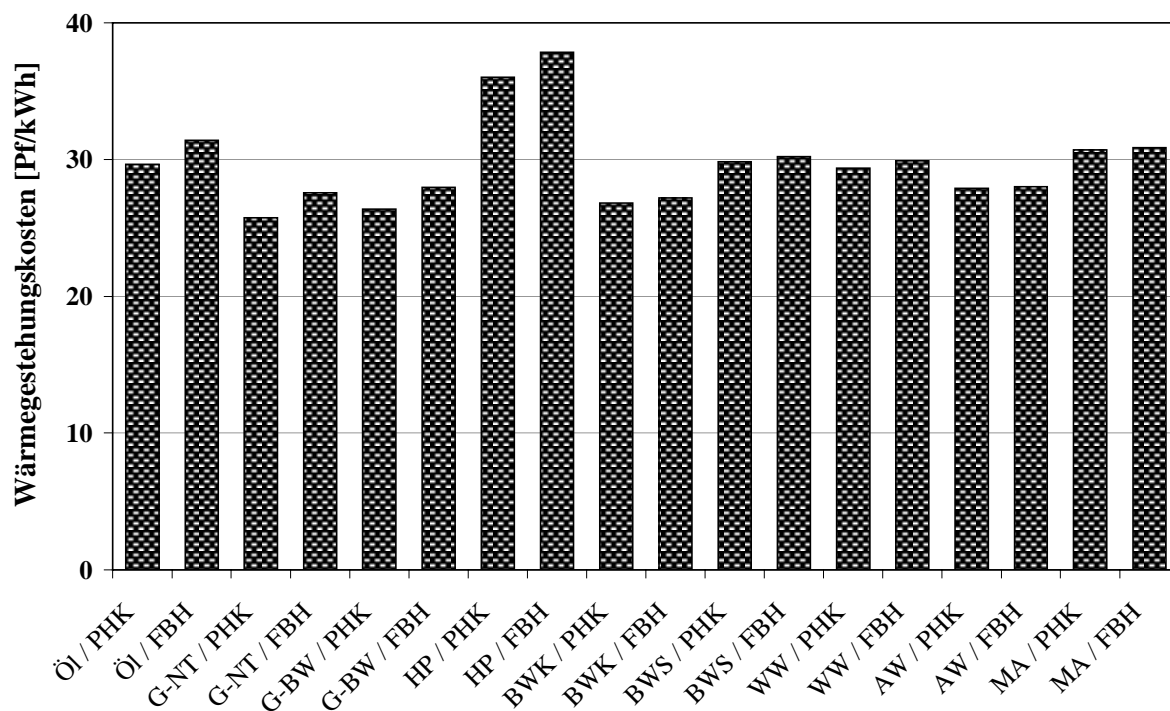


Abb. 6-10: Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das EFH 95

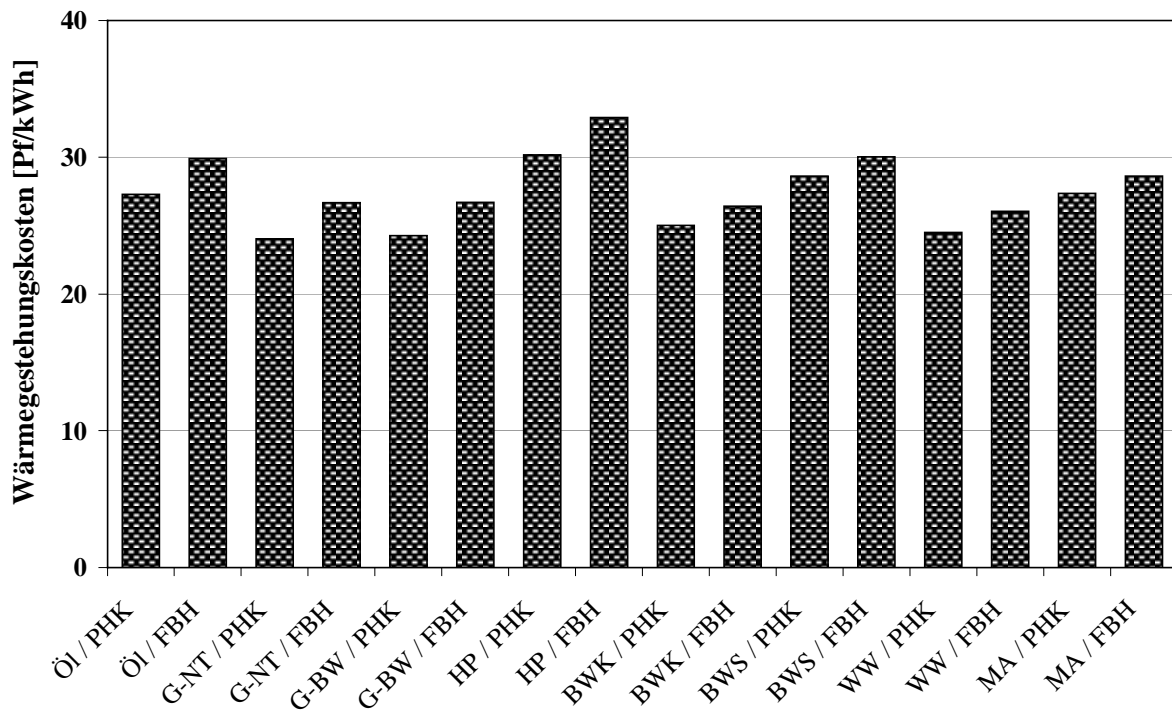


Abb. 6-11: Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das MFH 95

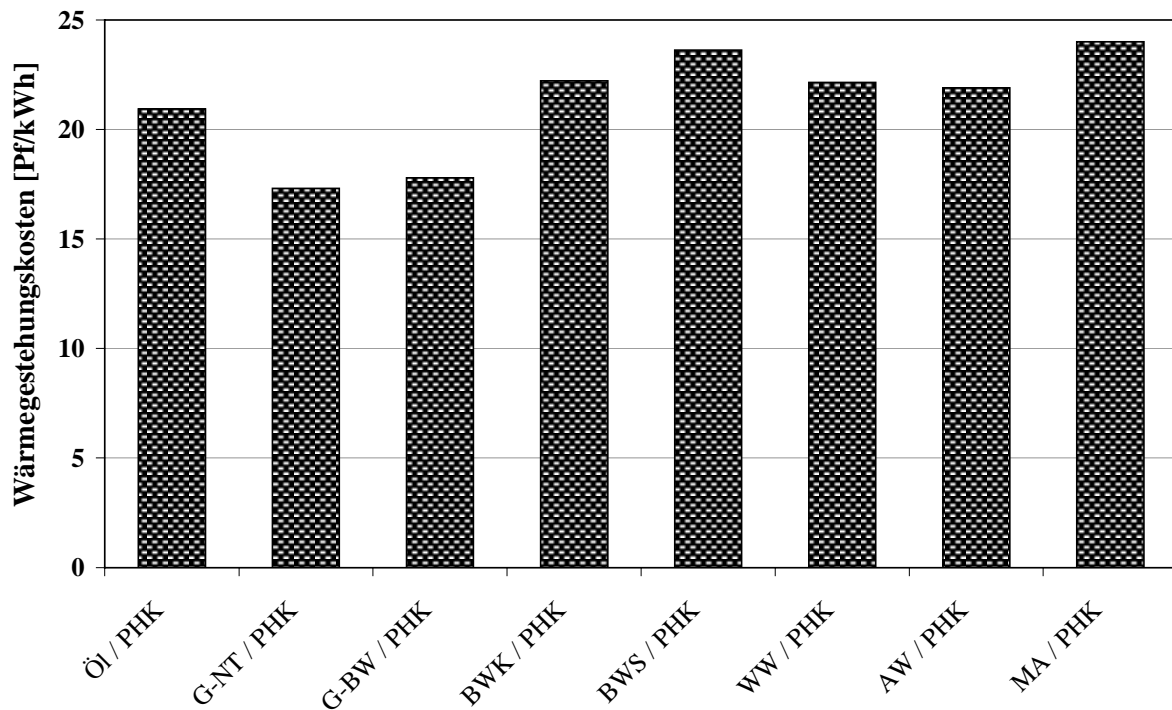


Abb. 6-12: Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das EFH 80

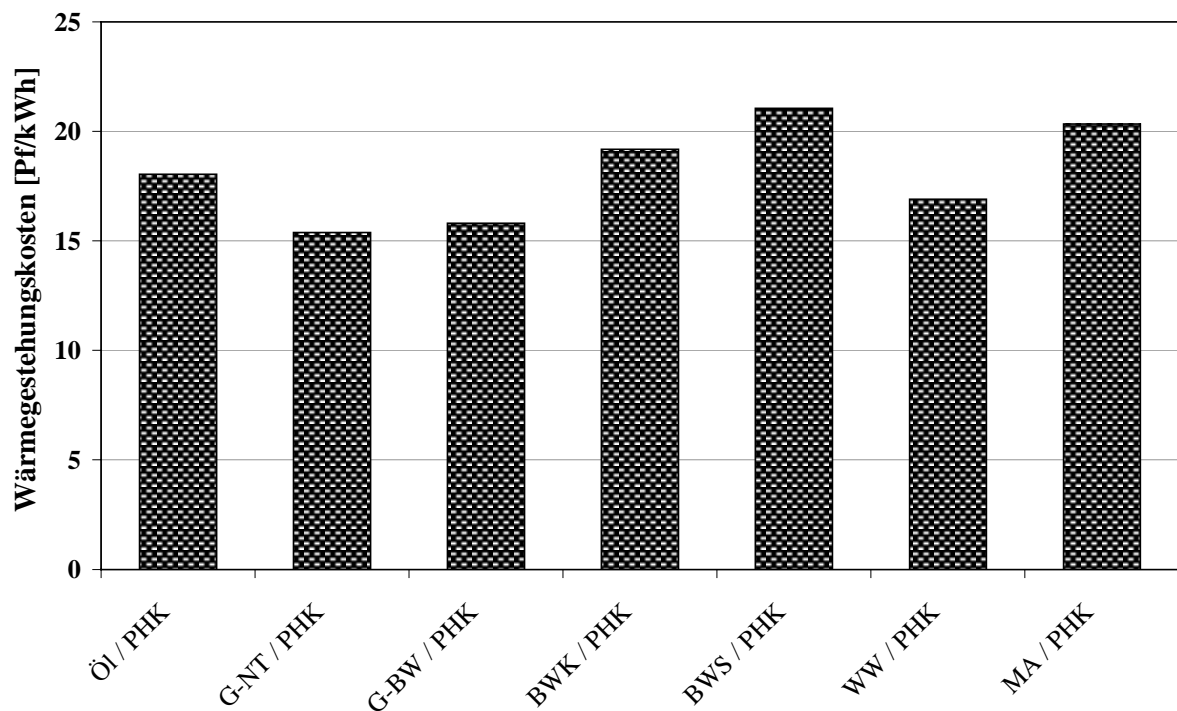


Abb. 6-13: Wärmegestehungskosten für die einzelnen Versorgungssysteme für das MFH 80

6.6 Zusammenfassung der ökonomischen Analyse

Die ökonomische Betrachtung mit Hilfe der Annuitätsmethode und des Vollkostenvergleichs zeigt für die Versorgungssysteme der betrachteten Versorgungsaufgaben folgende Ergebnisse:

- In Neubauten weisen die untersuchten Wärmepumpen-Systeme ebenso wie die Ölheizungssysteme im Vergleich zu den gasbefeuerten Heizsystemen höhere Investitionskosten für Heizungsanlage und Trinkwassererwärmung auf. Die Holzpellet-Systeme sind hier in den Investitionskosten mit den teuersten Wärmepumpenanlagen vergleichbar.
- Im Altbau liegen die Investitionskosten der Wärmepumpen-Systeme im Vergleich zu den konventionellen Heizsystemen beim Ersatz des Wärmeerzeugers etwa doppelt so hoch.
- Im Neubau und im MFH 80 liegen die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen-Systeme im Bereich der ölbefeuerten Heizsysteme, während die gasbefeuerten Systeme die günstigsten jährlichen Kosten aufweisen. Die höchsten Wärmegestehungskosten ergeben sich für die Holzpellet-Systeme. Im EFH 80 liegen die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen-Systeme geringfügig über den fossil beheizten Systemen.
- Die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen-Systeme mit Fußbodenheizung sind bei Neubauten teilweise bereits ebenso günstig wie bei Gasheizungen. Hingegen sind

die die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen-Systeme mit Plattenheizkörpern zumeist höher als bei den entsprechenden fossil beheizten Systemen.

- Von den betrachteten Wärmepumpen-Systemen erweist sich bei den Neubauten nach WSVÖ 1995 für das Einfamilienhaus das System mit Erdkollektor als die günstigste Variante. Beim Mehrfamilienhaus hat das Wärmepumpen-System mit Wärmequelle Grundwasser ebenso günstige Wärmegestehungskosten.

7 Schlussbetrachtung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde für vier ausgewählte Versorgungsaufgaben im Neu- und Altbereich ein ökologischer und ökonomischer Vergleich von Wärmepumpensystemen mit anderen Systemen zur Raumwärmebereitstellung und Warmwasserbereitung durchgeführt. Für die ökologische Analyse der Versorgungssysteme wurden der Endenergiebedarf, der Bedarf an erschöpflichen Energieträgern sowie die CO₂- und SO₂-Äquivalent-Emissionen betrachtet. Die Bestimmung dieser Größen erfolgte über Lebenswegbilanzen der untersuchten Versorgungssysteme, wobei die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Systeme einhergehenden Energieverbräuche und Materialeinsätze, die mit der Bereitstellung dieser Energien und Materialien verbundenen Schadstoffemissionen sowie die ggf. am Anlagenstandort auftretenden direkten Emissionen berücksichtigt wurden.

Die ökonomische Analyse wurde anhand des Vergleichs der Wärmegestehungskosten der Versorgungssysteme durchgeführt. Dabei wurden auf Basis der Annuitätenmethode die kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten berechnet.

Die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Betrachtung können nun auch gemeinsam als ökologisch/ökonomische Analyse dargestellt werden. Dadurch ist es möglich eine zusammenfassende Aussage über ökologische und ökonomische Kenngrößen der jeweiligen Versorgungssysteme zu treffen. Abb. 7-1 zeigt dies exemplarisch für die CO₂-Äquivalent-Emissionen und die Wärmegestehungskosten der Versorgungssysteme für ein neugebautes Einfamilienhaus (EFH 95). Die CO₂-Äquivalent-Emissionen wurden hier als maßgebliche ökologische Kenngröße ausgewählt, da derzeit dem Treibhauseffekt eine zentrale Bedeutung in der politischen Diskussion der mit der Energienutzung verbundenen Umweltfolgen zugemessen wird.

Bei dieser ökologisch-ökonomischen Analyse zeigt sich, dass die gasbefeuerten Versorgungssysteme und die Wärmepumpen-Systeme eine Gruppe mit ähnlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen bilden, wobei die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpen-Systeme tendenziell höher liegen. Jedoch sind die CO₂-Äquivalent-Emissionen bei Wärmepumpen mit Wärmequelle Wasser oder Erdreich niedriger als bei entsprechenden Gas-Brennwert-Systemen. Die ölbefeuerten Heizsysteme haben von allen untersuchten Versorgungssystemen der Versorgungsaufgabe EFH 95 die höchsten CO₂-Äquivalent-Emissionen, wobei die Wärmegestehungskosten über denen der Wärmepumpen-Systeme liegen. Holzpellet-Systeme weisen demgegenüber die mit Abstand niedrigsten CO₂-Äquivalent-Emissionen auf, jedoch sind ihre Wärmegestehungskosten deutlich höher. Zu beachten ist außerdem, dass die Holzpellet-Systeme hinsichtlich der ebenfalls untersuchten SO₂-Äquivalent-Emissionen deutlich schlechter abschneiden.

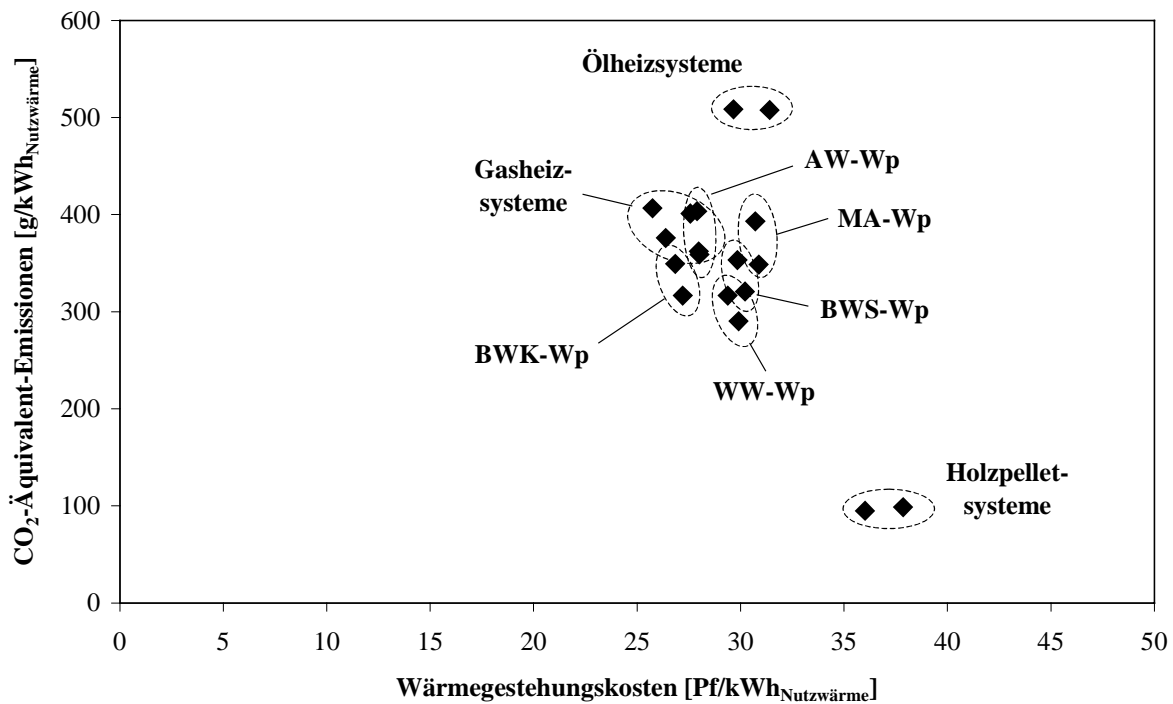


Abb. 7-1: Ökologische/ökonomische Analyse der Wärmegestehungskosten und der CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme für das EFH 95

Da Wärmepumpen mit Strom betrieben werden, ist die Festlegung des Strommixes, d. h. die verwendete Primärenergie bzw. der Kraftwerkstyp zur Bereitstellung der elektrischen Energie, von zentraler Bedeutung für die Bewertung der Wärmepumpen-Systeme. Um die Sensitivität der erzielten Ergebnisse hinsichtlich dieser Kenngröße zu untersuchen, wurde eine Parametervariation durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Annahmen hinsichtlich der CO₂-Äquivalent-Emissionen des Strommix frei Verbraucher untersucht und die Auswirkungen auf die CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme ermittelt. Abb. 7-2 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für ein neugebautes Einfamilienhaus (EFH 95).

Die über den gesamten Lebenszyklus summierten CO₂-Äquivalent-Emissionen des Strommix frei Verbraucher werden dabei auf der Abszisse (x-Achse) dargestellt. Der Wert für den „Strommix Deutschland“ entspricht dem im Kapitel 5 zugrundegelegten Wert und resultiert aus der Energieträgerzusammensetzung der deutschen Stromerzeugung der Jahre 2000 (siehe Abb. 5-3). Der Wert für „Kernkraft“ gilt für den Fall, dass der gesamte Strom für die Wärmepumpe in Kernkraftwerken bereitgestellt wird. Entsprechend liegt auch bei den anderen Strombereitstellungsvarianten Wasserkraft, Steinkohle, Braunkohle und GuD (Gas- und Dampf) die Annahme zugrunde, dass der Strom zu 100 % aus dem jeweiligen Energieträger in Kraftwerken nach heutigem Stand der Technik produziert wird.

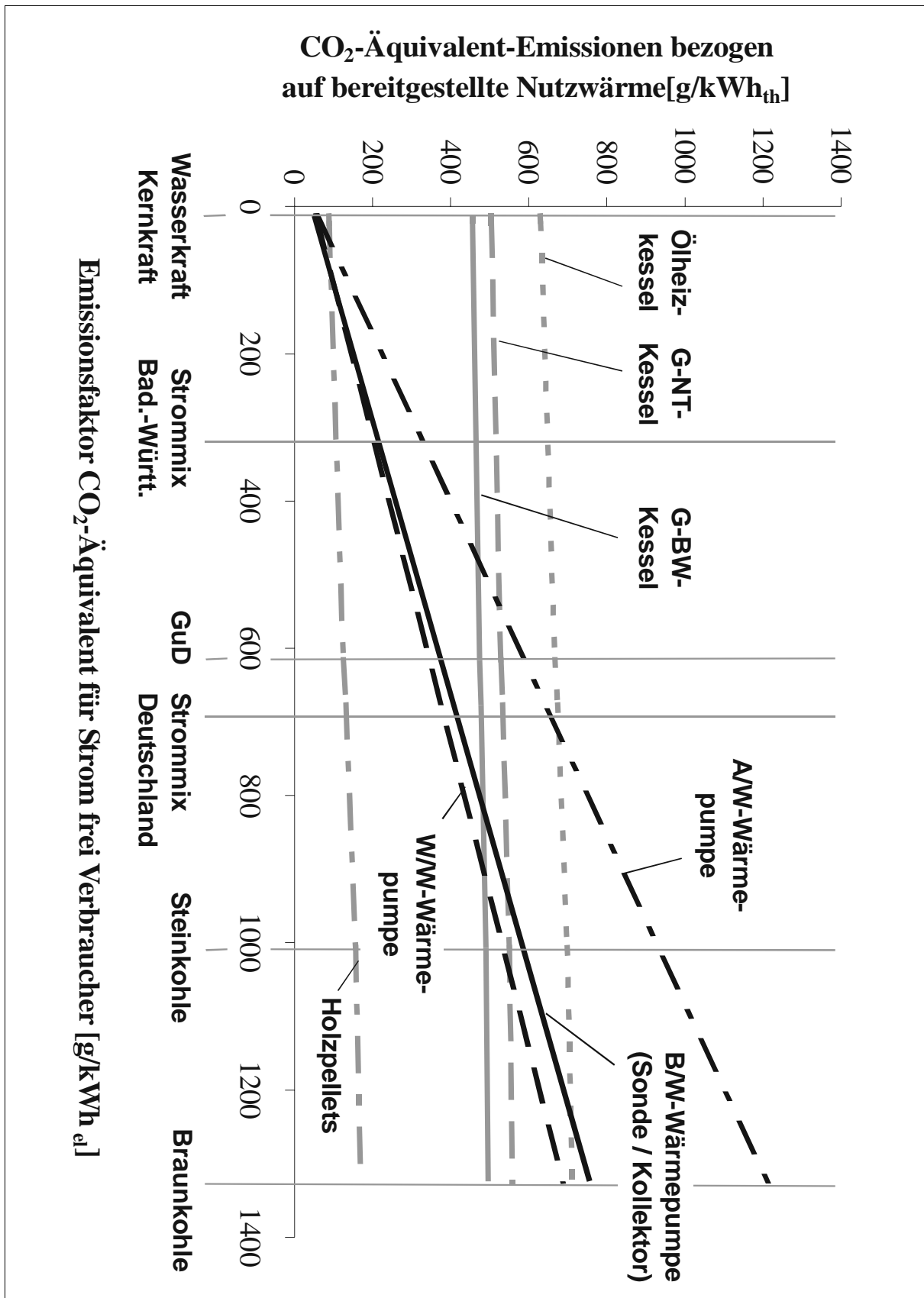


Abb. 7-2: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Versorgungssysteme in Abhängigkeit des Strommix am Beispiel des EFH 95

Auch bei einer vollständig CO₂-freien Stromerzeugung sind die CO₂-Äquivalent-Emissionen für die Wärmepumpen-Systeme von Null verschieden, da beispielsweise aus Herstellung und Entsorgung der Anlage Emissionen resultieren, die hier berücksichtigt sind. Der steil ansteigende Verlauf der Kurven für die Wärmepumpen-Systeme ergibt sich daraus, dass Strom hier als alleiniger Energieträger genutzt wird, während bei den anderen Versorgungssystemen der Strom nur als Hilfsenergie eingesetzt wird. So resultieren für die konventionellen Versorgungssysteme und das Holzpellet-System aufgrund der geringeren Abhängigkeit von der Strombereitstellung nur sehr schwach ansteigende Kurven.

Die verschiedenen möglichen Annahmen über die Strombereitstellung für den Betrieb von Wärmepumpen (vgl. Kapitel 5.1.3) lassen sich anhand von Abb. 7-2 vergleichend diskutieren. Wird der „Strommix Deutschland“ für die Strombereitstellung bei den Wärmepumpen-Systemen zugrunde gelegt - wie von /Heidelck et al. 1999b/ vorgeschlagen und in der vorliegenden Studie umgesetzt - so ergeben sich für alle Wärmepumpen-Systeme mit Ausnahme der Außenluftwärmepumpe geringere CO₂-Äquivalent-Emissionen als für die öl- und gasbefeuerten Heizsysteme. Bei der Stromerzeugung in Steinkohlekraftwerken – wie von /Fischedick et al. 1997/ angenommen – erhält man für das Wärmepumpen-System mit der Wärmequelle Grundwasser CO₂-Äquivalent-Emissionen im Bereich des Gas-Brennwert-Systems. Die CO₂-Äquivalent-Emissionen der Wärmepumpen-Systeme mit der Wärmequelle Erdreich (Kollektor und Sonde) liegen im Bereich des Gas-Niedertemperatur-Systems während die CO₂-Äquivalent-Emissionen des Außenluft-Wärmepumpen-Systems deutlich höher liegen als beim ölbefeuerten Heizsystem. Werden in Zukunft in zunehmenden Maße gasbefeuerte GuD-Kraftwerke - wie u. a. in /Fischedick et al. 1997/ prognostiziert - zur Strombereitstellung eingesetzt, so zeigen sich ähnliche Verhältnisse wie beim Strommix „Deutschland“, wobei das Außenluft-Wärmepumpen-System nun im Bereich der CO₂-Äquivalent-Emissionen der Gas-Niedertemperatur-Systeme liegt. Legt man den Strommix „Baden Württemberg“ zugrunde, so zeigen sich für alle Wärmepumpen-Systeme deutliche Einsparungen der CO₂-Äquivalent-Emissionen gegenüber den konventionellen Heizsystemen.

Daraus wird deutlich, dass die Wärmepumpen-Systeme, unabhängig von der zugrunde gelegten Art der Strombereitstellung, in absehbarer Zukunft niedrigere oder zumindest tendenziell gleiche CO₂-Äquivalent-Emissionen aufweisen werden wie die konventionellen Heizsystemen.

Literaturverzeichnis

/1. BmSchV 1997/

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen – 1. BImSchV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 490).

/AEG 1999/

AEG Hausgeräte GmbH: Typenübersicht und Nettopreisliste 1999 für den Fachhandel - SOLAR THERM-Anlagen, Heiz-Wärmepumpen, Klimaanlage, Nürnberg 1999.

/Bach et al. 1998/

Bach, H., Bauer, M.: MEDUSA – Minimierung des Energiebedarfs von Gebäuden durch Simulation von Heizanlagen, Universität Stuttgart, IKE Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik, Endbericht Stuttgart 1998.

/BINE 1998/

FIZ CD-ROM Energiedatenbank Volume 4, Wärmepumpen. Dokumentierte Objekte des Informationszentrums Wärmepumpen, Karlsruhe 1998.

/BGBl. I A. 1090 1994/

Bundesgesetzblatt I A. 1090; S. 1416: Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen (FCKW-Halon-Verbots-Verordnung) vom 6. Mai 1991.

/BMWi 1999/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Bonn, Münster, Stuttgart, Wuppertal 1999.

/BMWi 2000/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energiedaten 2000 – Nationale und internationale Entwicklung; Bonn, Juli 2000.

/Böhmer 1998/

Böhmer, T.: Marktsituation der elektrischen Wärmepumpe in Deutschland. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998), Heft 20

/DIN EN 255-2 1997/

DIN EN 255-2: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Heizen. Teil 2: Prüfungen und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten für die Raumheizung. Berlin: Beuth 1997

/DIN 4108-4 1998/

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4108-4 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 1998.

/DIN 4108-6 1995/

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4108-6 Wärmeschutz im Hochbau - Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 1995.

/DIN 4701 1995/

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4701-1 Regeln für die Berechnung der Heizlast von Gebäuden - Grundlagen der Berechnungen, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 1995.

/DIN 7003/

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 7003 Kälteanlagen und Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln der Gruppe L3 nach DIN EN 378-3; Beuth-Verlag GmbH, Berlin.

/DIN 33926 1996/

Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (NAGUS) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 33926: Produktbezogene Ökobilanzen, Standardberichtsbogen, Berlin, 1996.

/DIN EN 255 1989/

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 255 Anschlußfertige Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zum Heizen oder zum Heizen und Kühlen; Europäische Norm 255, Normenausschuss Kältetechnik im DIN, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 1989.

/DIN EN 832 1998/

Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude, Deutsche Fassung 1998.

/EN ISO 14040 1997/

European Committee for Standardization: EN ISO 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, Brüssel 1997.

/Energiesparen 2000/

Energiesparen: Energiesparen - Heizung, Dämmung Solarsysteme, Trend Medien Verlag GmbH, Sonderheft 4, Stuttgart 2000.

/Erneuerbare-Energien-Gesetz 2000/

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2000 Teil I Nr. 13, Bonn 29.03.2000

/Eyerer 1996/

Eyerer, P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, Springer, Berlin, 1996.

/Faninger 2000/

Faninger, G.: Der Wärmepumpenmarkt in Österreich 1999. Bundesverband Wärmepumpe. Interuniversitäres Institut für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung (IFF) der Universitäten Klagenfurt, Wien, Innsbruck, Graz 2000

/Feist 1997/

Feist, W. (Hrsg.): Das Niedrigenergiehaus - das Energiesparkonzept im Wohnungsbau, C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg 1997, 4. Auflage.

/Feist, Baffia 1998/

Feist, W.; Baffia, E.: Heizung im Niedrigenergiehaus – ein Systemvergleich. Passivhausinstitut, Darmstadt 1998

/Feist 1998/

Feist, W.: Heizung im Niedrigenergiehaus - ein Systemvergleich. Fachinformation PHI-1998/2, Darmstadt 1998.

/Fishedick et al. 1997/

Fishedick, M.; Schmutzler, T.; Wolters, D.: Elektrische Wärmepumpen - Eine Analyse aus ökologischer Sicht. Wuppertal Papers, Nr. 77, August 1997.

/Frehn 1998/

Frehn, B.: Berechnungskurzverfahren zur Ermittlung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen, 1998.

/Frischknecht et al. 1996/

Frischknecht R. et al.: Ökoinventare von Energiesystemen - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, Schlussbericht des BEW/NEFF-Forschungsprojektes „Umweltbelastung der End- und Nutzenergiebereitstellung“. Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich/PSI, Villigen, 1996, 3. Auflage.

/FWS 2000/

Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz: Statistiken - Neuer Absatzrekord für die Wärmepumpen-Heizung. www.fws.ch/aktuell_stat.htm: 06.02.2000.

/GEMIS 1998/

Öko-Institut; Gesamthochschule Kassel: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme v3.08. Erstellt im Auftrage des Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, 1998.

/Gerbert 1991/

Gerbert H.: Vergleich verschiedener Erdkollektor-Systeme; 1. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen (Tagungsband), Karlsruhe, 1991.

/Göricke 2000/

Göricke, P. (Initiativkreis Wärmepumpe): Persönliche Mitteilungen. Duisburg 2000

/Greßmann 1999/

Greßmann, A. et. al.: Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. IER-Forschungsbericht, Band 61, IER, Stuttgart 1999

/Hackensellner, Dünnwald 1996/

Hackensellner T.; Dünnwald G.: Wärmepumpen; Teil VII der Reihe Regenerative Energien; VDI; Düsseldorf, 1996.

/Halozan, Holzapfel 1987/

Holozan H.; Holzapfel K.: Heizen mit Wärmepumpen; TÜV Rheinland; Köln, 1987.

/Hautec 1999/

HAUTEC AG: HAUTEC Wärmepumpen Heizsysteme - Wir heizen mit Umweltwärme. Und womit heizen Sie?, Bedburg-Hau 1999.

/Heidelck et al. 1999a/

Heidelck, R., Laue, H. J.: Untersuchung von Praxisdaten zum Primärenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen, Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik - IZW e.V.; erstellt im Auftrage des Fachinformationszentrum Karlsruhe; Hannover/Karlsruhe, April 1999.

/Heidelck et al. 1999b/

Heidelck, R.; Laue, H. J.: Aktualisierung der Basisdaten im Gebäudesektor zur ganzheitlichen Bewertung verschiedener Heizsysteme, Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik - IZW e.V.; erstellt im Auftrage des Fachinformationszentrum Karlsruhe; Hannover/Karlsruhe, April 1999.

/Heijungs et al. 1992/

Heijungs R. et al.: Environmental Life Cycle Assessment of Products, Guide (Part 1) and Backgrounds (Part 2). CML, INO and B&G, Leiden 1992.

/HeizAnIV 1998/

Heizungsanlagen-Verordnung – HeizAnIV: Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Warmwasseranlagen vom Mai 1998.

/Heizung Klima Kälte 1999/

Heizung Klima Kälte: Fachzeitschrift für Wärme-, Kälte-, Luft- und Umwelttechnik, Energieanwendung - Heizen mit Holzpellets (S. 52), AZ – Fachverlage AG, Aarau, März 1999.

/HELENA 3.0 2000/

HELENA 3.0: PC-Software für Architekten und Planer. RWE-Energie AG, Anwendungstechnik, Essen 2000.

/HLH 1997/

Heizung Lüftung / Klima Haustechnik: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure - Strombedarf moderner Heiz- und Warmwasseranlagen (S. 40-45), Springer - VDI-Verlag GmbH & CO. KG, September 1997

/HLH 1999/

Heizung Lüftung / Klima Haustechnik: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure - Energetische Modernisierung des Gebäudebestandes mit Niedertemperatur- und Brennwertkesseln (S. 26), Springer - VDI-Verlag GmbH & CO. KG, Juni 1999.

/Hoffmann, Frey, Klipfel 1999/

Hoffmann, E.; Frey, H.; Klipfel, V.: Ökologischer Vergleich verschiedener Heizsysteme für Wohngebäude. EnBW Energie 1999

/IFO 1998/

Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung: Kostenvergleich der Raumheizung und Warmwasserbereitung in Neubauten; Aktualisierung zum Preisstand Winter 1997/98; München, Mai 1998.

/II. BV 1996/

Verordnung über Wohnungswirtschaftliche Berechnungen (Zweite Berechnungsverordnung – II. BV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. Oktober 1990 (BGBl. I S: 2178), zuletzt geändert am 23. Juni 1996 (BGBl. I S. 1167).

/IPCC 1995/

Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC): Greenhouse Gas Inventory Manual, Volume 3. Genf 1995.

/IWP 1996/

Initiativkreis WärmePumpe (IWP) (Hg.): Arbeitsordner Wärmepumpe. Marketing + Wirtschaft, München 1996

/IWP 2000/

Initiativkreis WärmePumpe (IWP): IWP-Wärmepumpen-Statistik für die Bundesrepublik Deutschland. Fax vom 03.07.2000

/IWU 1990/

Institut Wohnen und Umwelt: Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Hrsg.: Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik, Darmstadt 1990.

/Kaltschmitt et al. 1996/

Kaltschmitt M. et al.: Ganzheitliche Bilanzierung am Beispiel einer Bereitstellung elektrischer Energie aus regenerativen Energien. in: Zeitschrift für Energiewirtschaft 20 (1996), S. 177 – 197

/Kaltschmitt et al. 1999/

Kaltschmitt, M. et al. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999

/Kaltschmitt, Reinhardt 1997/

Kaltschmitt M., Reinhardt G. A.(Hrsg.): Nachwachsende Energieträger - Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Viewag, Braunschweig, 1997.

/Kletzander 2001/

Kletzander, J.: E-Mail vom 26.02.2001

/Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2000/

Gesetz zum Schutz der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2000 Teil I Nr.22. Bonn 17.05.2000

/Leven 1998/

Leven, B.: Analyse zum Energieverbrauch und zum Nutzerverhalten bei Niedrigenergie-Mehrfamilienhäusern in Essen-Gerschede, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ökologisch Verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1998.

/LGA 2000a/

Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, IE Informationszentrum Energie (Hg.): Energie sparen durch Wärmepumpenheizanlagen (1. Auflage), Stuttgart 2000.

/LGA 2000b/

Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, IE Informationszentrum Energie (Hg.): Energiesparende Heizung und Trinkwassererwärmung in wärmegeprägten Wohngebäuden (2. Auflage), Stuttgart 2000.

/Marheineke 2000/

Marheineke, T.: Balance 3.0 - Ein Softwareprogramm zur ganzheitlichen Bilanzierung. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart 2000.

/Neubarth, Kaltschmitt 2000/

Neubarth, J.; Kaltschmitt, M.: Erneuerbare Energien in Österreich – Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer Verlag Wien, 2000.

/Ochsner 1999/

Ochsner, K.: Handbuch Wärmepumpen - Optimales Wohnklima für Wärmepumpen, 2. erweiterte Auflage, Linz 1999.

- /Österreichisches Statistisches Zentralamt 1999/
Österreichisches Statistisches Zentralamt: Energieversorgung Österreich - Jahresheft 1998. Wien: 1999
- /Primus 1997/
Primus, I.-F.: Einsatz von Massivabsorber-Wärmepumpen in Wohnanlagen, Betonbau GmbH Sonderdruck, Energiewirtschaftliche Tagesfragen Jahrgang 47, Heft 7/1997, Special S. 35-38.
- /Riedel 1997/
Riedel, M. K.: Energiewirtschaftliche und umweltliche Analyse von erdgekoppelten Wärmepumpen zur Raumklimatisierung. Studienarbeit am IER, Band 283, IER, Stuttgart 1997
- /RWE 1998/
RWE Energie AG: Bau-Handbuch (12. Auflage). Energie-Verlag, Heidelberg 1998.
- /Sanner 1992/
Sanner, B.: Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation; Fachinformationszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1992.
- /Sanner, Knoblich 1991/
Sanner, B.; Knoblich K.: Umwelteinfluß erdgekoppelter Wärmepumpen; Symposium Erdgekoppelter Wärmepumpen; Fachinformationszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 1991.
- /Schramek et al. 1995/
Schramek E. R. et al.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; R. Oldenbourg Verlag, München, 1995, 67. Auflage.
- /Schraps 1999/
Schraps, S.: Zukünftige Wärmeversorgungskonzepte im Wohnhausbereich. Kl Luft- und Kältetechnik, 35, 1999.
- /Statistisches Bundesamt 1995/
Statistisches Bundesamt: Fachserie 5. Heft 1: Bautätigkeit und Wohnungen – 1%-Gebäude- und Wohnungsstichprobe 1993. Wiesbaden 1995
- /Statistisches Bundesamt 2000/
Statistisches Bundesamt: Stat. Jahrbuch 2000. S. 223
- /Statistisches Bundesamt 2001/
Statistisches Bundesamt: Preisindex für die Lebenshaltung aller privaten Haushalte Online-Lieferdienst: Segment 4201 und Segment 5286. Wiesbaden 2001
- /Stelzer 1992/
Stelzer, L.: Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen – Anwendungsmöglichkeiten für die Unternehmen der Elektrizitätswirtschaft. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992), Heft 16
- /Töss 1999/
WPZ-Bulletin: Mitteilungsblatt des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss, Liste der geprüften Wärmepumpen, Nr. 19, Stand 12.02.1999.
- /Töss 2000/
Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss: Mitteilungsblatt Nr.23. Internetttext: www.wpz.ch, 2000.

/UBA 1995/

UBA: Methodik der produktbezogenen Ökobilanz - Wirkungsbilanz und Bewertung; Texte 23/95. Umweltbundesamt, Berlin 1995.

/VDEW 1995/

VDEW-AK „Nutzenergiebilanzen: Wohnungen nach Heizenergie und Heizungs-Endenergieverbrauch 1993 (Westdeutschland). 1995

/VDEW 1998a/

Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. (VDEW): Wärmepumpenerhebung 1998. Elektrizitätswirtschaft VDEW-Verlag, Frankfurt 1999.

/VDEW 1998b/

Fichtner Development Engineering: VDEW-GEMIS Stammdatensatz 3.0. Erstellt im Auftrag der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke - VDEW e.V., Frankfurt im Main, 1998.

/VDEW 2000/

Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. (VDEW): Energieträgeranteile Kraftwerksmix Deutschland 1997 und 1998, Persönliche Mitteilung von Herrn B. Stehle, (Telefax vom 12.09.00).

/VDEW 1999/

VDEW: VDEW: Ergebnisse der Erhebung über elektrische Wärmepumpen zur Raumheizung 1998. Frankfurt: Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke 1999

/VDEW 2001a/

VDEW: Fax von Hr. Bernd Stehle. 13.02.2001.

/VDEW 2001b/

Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. (VDEW): VDEW-Materialien M-03/2001- Emissionsentwicklung bei EVU-Kraftwerken. Frankfurt 2001

/VDI 2067 1999/

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Düsseldorf: VDI 1999.

/VDI 2067-1 1999/

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenrechnung. Düsseldorf: VDI 1999

/VDI 2067-2 1999/

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 2067 Blatt 2 – Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen; Raumwärme. Düsseldorf: VDI 1999

/VDI 2067-6 1999/

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 2067 Blatt 6 – Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen; Wärmepumpen. Düsseldorf: VDI 1999

/VDI 2067-12 2000/

VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2067 Blatt 12: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Blatt 12: Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung; Düsseldorf: VDI 2000.

/VDI 4640-1 1998/

VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1 (Entwurf): Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte; Düsseldorf: VDI 1998.

/VDI 4650 2000/

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 4650 – Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeits- und Jahresheizzahlen von Wärmepumpen. Düsseldorf: VDI 2000

/VDI 6025 1996/

Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Richtlinie 6025 – Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. Düsseldorf: VDI 1996

/VDI-Nachrichten 1999/

VDI-Nachrichten: Energiesteuern klettern. 03.12.1999

/Viessmann 1999/

Viessmann Werke GmbH & Co: Preisliste Wärmepumpen, Allendorf 1999.

/VSE 2000/

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen: Stromproduktion nach Kraftwerkstypen.

http://www.strom.ch./deutsch/infomittel/z-f_stromproduktion_kraftwerktypen.asp
25.01.2001

/WSVO 1995/

Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - Wärmeschutz V) vom 16. August 1994.

/Wirtschaftsministerium BW 1999/

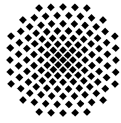
Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg: Energetische Modernisierung von Wohngebäuden, Stuttgart 1999 (unveränderter Nachdruck August 2000).

/WPZ 2000/

Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum (WPZ): WPZ-Bulletin Nr. 22. Winterthur-Töss: 2000

/Zaugg 1993/

Zaugg, J.: Marktsituation der Wärmepumpe in der Schweiz, Deutschland und Österreich. In: Elektrowärme International 51 (1993) A 2 – Juni. S. 72 – 76

Anhang A: Fragebogen für die Herstellerbefragung

Universität Stuttgart
 Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
 Prof. Dr.-Ing. A. Voß

IER

Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy-Institut d'Economie Energétique et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie

IER · Universität Stuttgart · D-70550 Stuttgart

«Beschreibung_Betrieb»

«StraßePostfach»

«PLZ» «Ort»

IER · Abteilung REN
 Universität Stuttgart
 Heßbrühlstr. 49a
 D-70550 Stuttgart
 Telefon +49 711 780 61-0 (Sekretariat)
 Telefax +49 711 780 3953
 e-mail: BL@ier.uni-stuttgart.de

Ihr Zeichen/Ihre Nachricht vom

Unser Zeichen/Bearbeiter(in)

Telefon-Durchwahl

Stuttgart

BL / Dipl.-Ing. Bernd Leven

07 11 / 7 80 61 - 32

28.03.2000

Herstellerrumfrage Wärmepumpe

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Rahmen des Projekts „Ökologische und ökonomische Bewertung der Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizsystemen“, finanziert durch die Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, führt unser Institut eine Recherche zu Wärmepumpensystemen und -herstellern durch. Ziel ist die Erstellung einer praxisnahen Datenbasis zu Leistungszahlen und Kosten als Grundlage für spätere Berechnungen und den Vergleich mit anderen Systemen.

Ich würde mich deshalb freuen, wenn Sie die beiliegenden Datenblätter ausfüllen und nach Möglichkeit bis zum **20. April 2000** an mich zurücksenden würden.

Für Ihre Mühe danke ich Ihnen recht herzlich im voraus und verbleibe

mit freundlichen Grüßen

Allgemeine Fragen:

Werden in Ihrem Unternehmen Wärmepumpen hergestellt? Ja Nein

Falls Nein: Von welchen Herstellern vertreiben Sie Wärmepumpen?

.....

Wie lange und in welchem Umfang geben Sie Garantien auf Ihre Produkte?

.....

Bieten Sie einen Wartungsvertrag an? Ja Nein

Falls Ja: Zu welchen Konditionen (Umfang, Kosten)?

.....

Anmerkungen:

Bitte machen Sie nur Angaben zu Serienprodukten, nicht zu Prototypen oder Einzelanfertigungen.

Falls die im Datenblatt angegebenen Daten nicht nach DIN-EN 255 ermittelt wurden, machen Sie dies bitte kenntlich.

Geben Sie die Kosten bitte als unverbindliche Preisempfehlung ab Werk zzgl. MwSt. an.

Bei den Leistungszahlen sind Temperaturpaare vorgegeben, die Sie gerne um weitere ergänzen können.

Geben Sie bitte auch zusätzlich erforderliche Bauteile mit ihren Kosten an.

Alternativ oder ergänzend können Sie uns auch Prospekte, Preislisten oder Kopien der Prüfberichte (z.B. des Prüfzentrums in Töss) zusenden.

Abkürzungen:

Q Quellenseite

N Nutzerseite

W Wasser

B Sole

A Umgebungsluft

Luft-Wasser Wärmepumpen

Firma	
Anschrift	
Internetadresse	

Bearbeiter	
Telefon	
e-mail	

Allgemeine Angaben:	Einheit	Beispiel	1	2	3	4	5	6
Gerätetyp	[-]	XY 15 Z						
Aufstellung	[-]	innen						
Kältemittel	[-]	R290						
Kältemittelmenge	[kg]	1,8						
Volumenstrom Q	[m³/h]	1,5						
Volumenstrom N	[m³/h]	1,9						
ΔT bei A7/W35 am Verflüssiger	[K]	6,3						
Angaben gemäß EN 255	j / n	j						
Einsatzgrenzen (A / W)	[°C]	-20 / 65						

Leistungsdaten:								
A-7/W35	Heizleistung	[kW]	7890					
	Leistungszahl	[-]	2,7					
A-7/W50	Heizleistung	[kW]	7652					
	Leistungszahl	[-]	2,4					
A2/W35	Heizleistung	[kW]	9840					
	Leistungszahl	[-]	3,0					
A2/W50	Heizleistung	[kW]	9198					
	Leistungszahl	[-]	2,5					
A7/W35	Heizleistung	[kW]	13810					
	Leistungszahl	[-]	4,2					
A7/W50	Heizleistung	[kW]	12500					
	Leistungszahl	[-]	3,2					
weitere:	Heizleistung	[kW]						
	Leistungszahl	[-]						
	Heizleistung	[kW]						
	Leistungszahl	[-]						

Anhang B: Nutzungsgrade und Arbeitszahlen von Heizungssystemen**Tabelle B-1:** Nutzungsgrade bzw. Jahresarbeitszahlen von Heizsystemen

System	Jahresnutzungsgrad		Quelle
	Fußbodenheizung (35/25°C)	Plattenheizkörper(55/45°C)	
Ölheizkessel	0,93	0,93	/LGA 2000b/
	0,85	0,85	/VDEW 1998b/
	0,85	0,85	/GEMIS 1998/
	0,93	0,93	/Neubarth 2000/
	0,91	0,90	/IFO 1998/
Gas-NT-Kessel	0,93	0,93	/LGA 2000b/
	0,85	0,85	/VDEW 1998b/
	0,85	0,85	/GEMIS 1998/
	0,93	0,93	/Neubarth 2000/
	0,91	0,90	/IFO 1998/
	-	0,91	/Feist 1998/
Gas-BW-Kessel	1,04	1,04	/LGA 2000b/
	1,00	1,00	/VDEW 1998b/
	1,00	1,00	/GEMIS 1998/
	1,04	1,04	/Neubarth 2000/
	1,03	0,98	/IFO 1998/
	1,08	1,06	/Schrapf 1999/
	1,04	1,02	/Heidelck et al. 1999a/
	1,05	1,05	/Fischedick et al. 1997/
1,04	1,04	/Feist 1998/	
System	Jahresarbeitszahl		Quelle
	Fußbodenheizung (35/25°C)	Plattenheizkörper(55/45°C)	
B/W-Wp (Kollektor)	3,62	2,94	Messdaten 90-94 IZW
	3,82	3,33	Messdaten 95-98 IZW
	3,99	3,25	/Schrapf 1999/
	4,20	3,62	/Frehn 1998/, /Töss 1999/
	3,80	3,30	/VDEW 1998b/
	3,80	3,30	/Heidelck et al. 1999a/
B/W-Wp (Sonde)	3,62	2,94	Messdaten 90-94 IZW
	3,82	3,33	Messdaten 95-98 IZW
	3,99	3,25	/Schrapf 1999/
	4,20	3,62	/Frehn 1998/, /Töss 1999/
	3,80	3,30	/VDEW 1998b/
	3,80	3,30	/Heidelck et al. 1999a/
W/W Wp	3,84	-	Messdaten 90-94 IZW
	4,32	-	Messdaten 95-98 IZW
	4,09	3,64	/Schrapf 1999/
	4,77	4,02	/Frehn 1998/, /Töss 1999/
	4,30	3,80	/Heidelck et al. 1999a/
A/W Wp	3,03	2,67	Messdaten 90-94 IZW
	3,32	-	Messdaten 95-98 IZW
	3,40	2,90	/Schrapf 1999/
	3,10	2,80	/Frehn 1998/, /Töss 1999/
	3,30	2,80	/Heidelck et al. 1999a/
Massiv-absorber-Wp	3,20	-	/BINE 1998/
	3,20	-	/Primus 1997/

Anhang C: Endenergiebedarf der Gebäude

Tabelle C-1: Endenergiebedarf des EFH 95

EFH 95	Raumwärme						Trinkwasser					Elektrischer Hilfsenergiebedarf	Endenergiebedarf
	Jahresheizwärmebedarf (EN 832) Q_H KWh/a	Übergabeaufwandszahl e_1	Verteilungsaufwandszahl e_2	Erzeugungsaufwandszahl e_3	Gesamtaufwandszahl e	Energieaufwand $Q_{ED,R}$ KWh/a	Energiebedarf für Warmwasser $Q_{N,a}$ KWh/a	Verteilungsaufwandszahl $e_{1,TW}$	Erzeugungsaufwandszahl $e_{2,TW}$	Gesamtaufwandszahl e_{TW}	Energieaufwand $Q_{ED,TW}$ KWh/a	Q_S KWh/a	Q_{ED} KWh/a
Öl / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	1,08	1,40	21.282	2.204	1,10	1,39	1,53	3.370	740	24.652
Öl / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	1,08	1,38	20.873	2.204	1,10	1,39	1,53	3.370	740	24.242
G-NT / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	1,08	1,40	21.282	2.204	1,10	1,39	1,53	3.370	460	24.652
G-NT / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	1,08	1,38	20.873	2.204	1,10	1,39	1,53	3.370	460	24.242
G-BW / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	1,00	1,30	19.705	2.204	1,10	1,25	1,38	3.031	500	22.736
G-BW / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	0,96	1,22	18.553	2.204	1,10	1,25	1,38	3.031	500	21.584
HP / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	1,25	1,63	24.632	2.204	1,10	1,56	1,72	3.782	850	28.414
HP / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	1,25	1,59	24.158	2.204	1,10	1,56	1,72	3.782	850	27.940
BWK / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	0,30	0,39	5.971	2.204	1,10	0,41	0,45	994	400	6.965
BWK / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	0,26	0,34	5.086	2.204	1,10	0,45	0,45	994	400	6.080
BWS / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	0,30	0,39	5.971	2.204	1,10	0,41	0,45	994	400	6.965
BWS / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	0,26	0,34	5.086	2.204	1,10	0,41	0,45	994	400	6.080
WW / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	0,26	0,34	5.186	2.204	1,10	0,36	0,40	873	400	6.058
WW / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	0,23	0,30	4.494	2.204	1,10	0,36	0,40	873	400	5.367
AW / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	0,36	0,46	7.038	2.204	1,10	0,48	0,53	1.164	400	8.201
AW / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	0,30	0,39	5.856	2.204	1,10	0,48	0,53	1.164	400	7.020
MA / PHK-E95	15.158	1,25	1,04	0,34	0,45	6.795	2.204	1,10	0,48	0,53	1.164	400	7.959
MA / FBH-E95	15.158	1,25	1,02	0,29	0,37	5.684	2.204	1,10	0,48	0,53	1.164	400	6.848

Tabelle C-2: Endenergiebedarf des MFH 95

MFH 95	Raumwärme						Trinkwasser						Endenergiebedarf Q _{ED} kWh/a
	Jahresheizwärmebedarf (EN 832) Q _H kWh/a	Übergabeaufwandszahl e ₁	Verteilungsaufwandszahl e ₂	Erzeugungsaufwandszahl e ₃	Gesamtaufwandszahl e	Energieaufwand Q _{ED,R} kWh/a	Energiebedarf für Warmwasser Q _{N,a} kWh/a	Verteilungsaufwandszahl e _{1,TW}	Erzeugungsaufwandszahl e _{2,TW}	Gesamtaufwandszahl e _{TW}	Energieaufwand Q _{ED,TW} kWh/a	Elektrischer Hilfsenergiebedarf Q _S kWh/a	
Öl / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	1,08	1,40	42.303	9.164	1,10	1,39	1,53	14.012	1.110	56.315
Öl / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	1,08	1,38	41.489	9.164	1,10	1,39	1,53	14.012	1.110	55.501
G-NT / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	1,08	1,40	42.303	9.164	1,10	1,39	1,53	14.012	690	56.315
G-NT / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	1,08	1,38	41.489	9.164	1,10	1,39	1,53	14.012	690	55.501
G-BW / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	1,00	1,30	39.169	9.164	1,10	1,25	1,38	12.601	750	51.770
G-BW / FBH-M5	30.130	1,25	1,02	0,96	1,22	36.939	9.164	1,10	1,25	1,38	12.601	750	49.539
HP / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	1,25	1,63	48.962	9.164	1,10	1,56	1,72	15.725	1.280	64.687
HP / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	1,25	1,59	48.020	9.164	1,10	1,56	1,72	15.725	1.280	63.746
BWK / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	0,30	0,39	11.868	9.164	1,10	0,41	0,45	4.133	600	16.001
BWK / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	0,26	0,34	10.109	9.164	1,10	0,45	0,45	4.133	600	14.242
BWS / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	0,30	0,39	11.868	9.164	1,10	0,41	0,45	4.133	600	16.001
BWS / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	0,26	0,34	10.109	9.164	1,10	0,41	0,45	4.133	600	14.242
WW / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	0,26	0,34	10.307	9.164	1,10	0,36	0,40	3.629	600	13.936
WW / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	0,23	0,30	8.934	9.164	1,10	0,36	0,40	3.629	600	12.563
MA / PHK-M95	30.130	1,25	1,04	0,34	0,45	13.506	9.164	1,10	0,48	0,53	4.839	600	18.345
MA / FBH-M95	30.130	1,25	1,02	0,29	0,37	11.299	9.164	1,10	0,48	0,53	4.839	600	16.137

Tabelle C-3: Endenergiebedarf des EFH 80

EFH 80	Raumwärme					Trinkwasser					Elektrischer Hilfsenergiebedarf Q_S kWh/a	Endenergiebedarf Q_{ED} kWh/a	
	Jahresheizwärmebedarf (EN 832) Q_H kWh/a	Übergabeaufwandszahl	Verteilungsaufwandszahl	Erzeugungsaufwandszahl	Gesamtaufwandszahl	Energieaufwand $Q_{ED,R}$ kWh/a	Energiebedarf für Warmwasser $Q_{N,a}$ kWh/a	Verteilungsaufwandszahl	Erzeugungsaufwandszahl	Gesamtaufwandszahl e_{TW}			Energieaufwand $Q_{ED,TW}$ kWh/a
		e_1	e_2	e_3	e			e_1,TW	e_2,TW				
Öl / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	1,08	1,40	28.513	2.204	1,10	1,39	1,53	3.370	740	31.883
G-NT / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	1,08	1,40	28.513	2.204	1,10	1,39	1,53	3.370	460	31.883
G-BW / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	1,00	1,30	26.401	2.204	1,10	1,25	1,38	3.031	500	29.431
BWK / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	0,30	0,39	7.999	2.204	1,10	0,41	0,45	994	400	8.993
BWS / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	0,30	0,39	7.999	2.204	1,10	0,41	0,45	994	400	8.993
WW / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	0,26	0,34	6.947	2.204	1,10	0,36	0,40	873	400	7.820
AW / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	0,36	0,46	9.429	2.204	1,10	0,48	0,53	1.164	400	10.593
MA / PHK-E80	20.308	1,25	1,04	0,34	0,45	9.104	2.204	1,10	0,48	0,53	1.164	400	10.267

Tabelle C-4: Endenergiebedarf des MFH 80

MFH 80	Raumwärme						Trinkwasser						Endenergiebedarf kWh/a
	Jahresheizwärmebedarf (EN 832) Q_H kWh/a	Übergabeaufwandszahl e_1	Verteilungsaufwandszahl e_2	Erzeugungsaufwandszahl e_3	Gesamtaufwandszahl e	Energieaufwand $Q_{ED,R}$ kWh/a	Energiebedarf für Warmwasser $Q_{N,a}$ kWh/a	Verteilungsaufwandszahl e_{ITW}	Erzeugungsaufwandszahl e_{2TW}	Gesamtaufwandszahl e_{TW}	Energieaufwand $Q_{ED,TW}$ kWh/a	Elektrischer Hilfsenergiebedarf Q_S kWh/a	
Ö1 / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	1,08	1,40	65.513	9.164	1,10	1,39	1,53	14.012	1.110	79.525
G-NT / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	1,08	1,40	65.513	9.164	1,10	1,39	1,53	14.012	690	79.525
G-BW / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	1,00	1,30	60.660	9.164	1,10	1,25	1,38	12.601	750	73.261
BWK / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	0,30	0,39	18.380	9.164	1,10	0,41	0,45	4.133	600	22.513
BWS / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	0,30	0,39	18.380	9.164	1,10	0,41	0,45	4.133	600	22.513
WW / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	0,26	0,34	15.963	9.164	1,10	0,36	0,40	3.629	600	19.592
MA / PHK-M80	46.662	1,25	1,04	0,34	0,45	20.917	9.164	1,10	0,48	0,53	4.839	600	25.755

Anhang D: Daten zur ökologischen Analyse**Tabelle D-1:** Bedarf an erschöpflichen Energieträgern

System		Herstellung, Entsorgung	Brennstoffbereitstellung, Energieinhalt Brennstoff	Nutzung, Sonstiges	Summe
		kWh/kWh _{Nutzwärme}	kWh/kWh _{Nutzwärme}	kWh/kWh _{Nutzwärme}	kWh/kWh _{Nutzwärme}
EFH 95	Öl/PHK-E95	0,06	1,70	0,15	1,91
	Öl/FBH-E95	0,07	1,68	0,15	1,90
	G-NT/PHK-E95	0,05	1,62	0,12	1,79
	G-NT/FBH-E95	0,06	1,60	0,09	1,76
	G-BW/PHK-E95	0,05	1,50	0,09	1,65
	G-BW/FBH-E95	0,07	1,42	0,09	1,58
	HP/PHK-E95	0,08	0,07	0,18	0,33
	HP/FBH-E95	0,09	0,07	0,18	0,34
	BWK/PHK-E95	0,08	1,46	0,01	1,55
	BWK/FBH-E95	0,09	1,30	0,01	1,39
	BWS/PHK-E95	0,09	1,46	0,01	1,56
	BWS/FBH-E95	0,10	1,30	0,01	1,41
	WW/PHK-E95	0,09	1,30	0,01	1,39
	WW/FBH-E95	0,10	1,16	0,01	1,27
	AW/PHK-E95	0,08	1,71	0,01	1,80
	AW/FBH-E95	0,09	1,49	0,01	1,59
	MA/PHK-E95	0,09	1,66	0,01	1,75
MA/FBH-E95	0,10	1,44	0,01	1,54	
MFH 95	Öl/PHK-M95	0,05	1,70	0,05	1,81
	Öl/FBH-M95	0,06	1,68	0,05	1,80
	G-NT/PHK-M95	0,05	1,62	0,03	1,70
	G-NT/FBH-M95	0,06	1,60	0,03	1,69
	G-BW/PHK-M95	0,05	1,49	0,03	1,57
	G-BW/FBH-M95	0,06	1,43	0,03	1,52
	HP/PHK-M95	0,06	0,07	0,11	0,25
	HP/FBH-M95	0,07	0,07	0,11	0,25
	BWK/PHK-M95	0,06	1,46	0,00	1,53
	BWK/FBH-M95	0,07	1,32	0,00	1,39
	BWS/PHK-M95	0,08	1,46	0,00	1,54
	BWS/FBH-M95	0,08	1,32	0,00	1,40
	WW/PHK-M95	0,07	1,28	0,00	1,35
	WW/FBH-M95	0,07	1,16	0,00	1,24
	MA/PHK-M95	0,07	1,67	0,00	1,74
MA/FBH-M95	0,08	1,47	0,00	1,55	
EFH 80	Öl/PHK-E80	0,03	1,71	0,16	1,91
	G-NT/PHK-E80	0,03	1,63	0,11	1,77
	G-BW/PHK-E80	0,03	1,50	0,09	1,63
	BWK/PHK-E80	0,06	1,41	0,00	1,48
	BWS/PHK-E80	0,07	1,41	0,00	1,48
	WW/PHK-E80	0,07	1,22	0,00	1,29
	AW/PHK-E80	0,06	1,67	0,00	1,73
	MA/PHK-E80	0,06	1,60	0,00	1,67
MFH 80	Öl/PHK-M80	0,03	1,72	0,06	1,81
	G-NT/PHK-M80	0,03	1,64	0,03	1,69
	G-BW/PHK-M80	0,03	1,51	0,03	1,56
	BWK/PHK-M80	0,05	1,41	0,00	1,47
	BWS/PHK-M80	0,06	1,41	0,00	1,47
	WW/PHK-M80	0,05	1,23	0,00	1,28
	MA/PHK-M80	0,05	1,62	0,00	1,67

Tabelle D-2: CO₂-Äquivalent-Emissionen

System		Herstellung, Entsorgung	Direkte Emissionen	Brennstoffbe- reitung	Nutzung, Sonstiges	Summe
		g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}
EFH 95	Öl/PHK-E95	21,6	378,8	72,5	35,5	508,4
	Öl/FBH-E95	25,9	374,5	71,7	35,5	507,6
	G-NT/PHK-E95	19,1	282,0	77,7	27,9	406,7
	G-NT/FBH-E95	23,5	278,9	76,8	21,9	401,1
	G-BW/PHK-E95	20,7	261,3	72,0	21,9	375,9
	G-BW/FBH-E95	25,1	247,0	68,0	21,9	362,0
	HP/PHK-E95	28,7	6,7	18,2	41,2	94,8
	HP/FBH-E95	33,0	6,6	17,9	41,2	98,7
	BWK/PHK-E95	30,1	0,0	317,1	2,0	349,2
	BWK/FBH-E95	33,5	0,0	281,2	2,0	316,7
	BWS/PHK-E95	34,2	0,0	317,1	2,0	353,3
	BWS/FBH-E95	37,6	0,0	281,2	2,0	320,8
	WW/PHK-E95	33,6	0,0	281,2	2,0	316,8
	WW/FBH-E95	37,0	0,0	251,3	2,0	290,3
	AW/PHK-E95	30,6	0,0	370,9	2,0	403,5
	AW/FBH-E95	34,0	0,0	323,0	2,0	359,0
MA/PHK-E95	32,1	0,0	358,9	2,0	393,0	
MA/FBH-E95	35,6	0,0	311,1	2,0	348,7	
MFH 95	Öl/PHK-M95	19,1	379,2	72,6	12,9	483,8
	Öl/FBH-M95	22,8	374,5	71,7	12,9	481,9
	G-NT/PHK-M95	17,3	282,3	77,8	7,0	384,4
	G-NT/FBH-M95	21,0	278,9	76,8	7,0	383,7
	G-BW/PHK-M95	18,5	260,0	71,6	7,0	357,1
	G-BW/FBH-M95	22,2	248,8	68,6	7,0	346,6
	HP/PHK-M95	22,5	6,7	18,2	25,9	73,3
	HP/FBH-M95	25,8	6,6	17,9	25,9	76,2
	BWK/PHK-M95	23,4	0,0	316,7	0,9	341,0
	BWK/FBH-M95	26,3	0,0	285,3	0,9	312,5
	BWS/PHK-M95	27,7	0,0	316,7	0,9	345,3
	BWS/FBH-M95	30,5	0,0	285,3	0,9	316,7
	WW/PHK-M95	24,0	0,0	277,4	0,9	302,3
	WW/FBH-M95	26,8	0,0	251,3	0,9	279,0
	MA/PHK-M95	25,6	0,0	361,2	0,9	387,7
	MA/FBH-M95	28,4	0,0	319,3	0,9	348,6
EFH 80	Öl/PHK-E80	11,9	381,5	73,1	36,8	503,3
	G-NT/PHK-E80	9,8	284,0	78,2	26,3	398,3
	G-BW/PHK-E80	11,1	261,8	72,1	21,6	366,6
	BWK/PHK-E80	23,3	0,0	306,0	1,5	330,8
	BWS/PHK-E80	24,2	0,0	306,0	1,5	331,7
	WW/PHK-E80	23,8	0,0	264,3	1,5	289,6
	AW/PHK-E80	21,4	0,0	361,6	1,5	384,5
	MA/PHK-E80	22,6	0,0	347,7	1,5	371,8
MFH 80	Öl/PHK-M80	10,4	383,2	73,4	13,0	480,0
	G-NT/PHK-M80	9,2	285,3	78,6	6,9	380,0
	G-BW/PHK-M80	10,4	262,4	72,3	6,9	352,0
	BWK/PHK-M80	18,1	0,0	306,6	0,6	325,3
	BWS/PHK-M80	20,2	0,0	306,6	0,6	327,4
	WW/PHK-M80	17,7	0,0	267,3	0,6	285,6
	MA/PHK-M80	18,3	0,0	351,5	0,6	370,4

Tabelle D-3: SO₂-Äquivalent-Emissionen

System		Herstellung, Entsorgung	Direkte Emissionen	Brennstoffbe- reitstellung	Nutzung, Sonstiges	Summe
		g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}	g/kWh _{Nutzwärme}
EFH 95	Öl/PHK-E95	0,11	0,42	0,56	0,08	1,17
	Öl/FBH-E95	0,14	0,42	0,55	0,08	1,18
	G-NT/PHK-E95	0,10	0,17	0,25	0,06	0,58
	G-NT/FBH-E95	0,13	0,17	0,24	0,05	0,59
	G-BW/PHK-E95	0,11	0,10	0,23	0,05	0,49
	G-BW/FBH-E95	0,13	0,09	0,22	0,05	0,49
	HP/PHK-E95	0,15	0,68	0,11	0,08	1,02
	HP/FBH-E95	0,18	0,67	0,11	0,08	1,03
	BWK/PHK-E95	0,16	0,00	0,46	0,01	0,64
	BWK/FBH-E95	0,18	0,00	0,41	0,01	0,60
	BWS/PHK-E95	0,18	0,00	0,46	0,01	0,66
	BWS/FBH-E95	0,18	0,00	0,41	0,01	0,60
	WW/PHK-E95	0,18	0,00	0,41	0,01	0,60
	WW/FBH-E95	0,20	0,00	0,37	0,01	0,58
	AW/PHK-E95	0,17	0,00	0,54	0,01	0,72
	AW/FBH-E95	0,18	0,00	0,47	0,01	0,67
	MA/PHK-E95	0,17	0,00	0,52	0,01	0,71
MA/FBH-E95	0,19	0,00	0,45	0,01	0,66	
MFH 95	Öl/PHK-M95	0,10	0,42	0,56	0,03	1,11
	Öl/FBH- M95	0,12	0,42	0,55	0,03	1,12
	G-NT/PHK-M95	0,09	0,17	0,25	0,02	0,53
	G-NT/FBH-M95	0,11	0,17	0,24	0,02	0,54
	G-BW/PHK-M95	0,10	0,10	0,23	0,02	0,44
	G-BW/FBH-M95	0,12	0,09	0,22	0,02	0,45
	HP/PHK-M95	0,12	0,68	0,11	0,05	0,95
	HP/FBH-M95	0,14	0,67	0,10	0,05	0,96
	BWK/PHK-M95	0,13	0,00	0,46	0,00	0,59
	BWK/FBH-M95	0,14	0,00	0,42	0,00	0,56
	BWS/PHK-M95	0,15	0,00	0,46	0,00	0,62
	BWS/FBH-M95	0,17	0,00	0,42	0,00	0,59
	WW/PHK-M95	0,13	0,00	0,40	0,00	0,54
	WW/FBH-M95	0,15	0,00	0,37	0,00	0,52
MA/PHK-M95	0,14	0,00	0,53	0,00	0,67	
MA/FBH-M95	0,15	0,00	0,47	0,00	0,62	
EFH 80	Öl/PHK-E80	0,06	0,42	0,56	0,07	1,12
	G-NT/PHK-E80	0,05	0,17	0,25	0,05	0,52
	G-BW/PHK-E80	0,06	0,10	0,23	0,04	0,43
	BWK/PHK-E80	0,13	0,00	0,45	0,01	0,58
	BWS/PHK-E80	0,13	0,00	0,45	0,01	0,59
	WW/PHK-E80	0,13	0,00	0,39	0,01	0,52
	AW/PHK-E80	0,12	0,00	0,53	0,01	0,65
	MA/PHK-E80	0,12	0,00	0,51	0,01	0,64
MFH 80	Öl/PHK-M80	0,06	0,43	0,57	0,03	1,07
	G-NT/PHK-M80	0,05	0,17	0,25	0,02	0,49
	G-BW/PHK-M80	0,06	0,10	0,23	0,02	0,40
	BWK/PHK-M80	0,10	0,00	0,45	0,00	0,55
	BWS/PHK-M80	0,11	0,00	0,45	0,00	0,56
	WW/PHK-M80	0,10	0,00	0,39	0,00	0,49
	MA/PHK-M80	0,10	0,00	0,51	0,00	0,62

Anhang E: Daten zur ökonomischen Analyse**Tabelle E-1:** Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 95

EFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
ÖI / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	4.600	2.400	8.120
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	1.900	300	2.552
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.400	5.336
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	2.400	0	2.784
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	9.500	0	11.020
	9	Installation			0	400	250	754
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				27.000	4.350	36.366
ÖI / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	4.600	2.400	8.120
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.400	4.872
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	2.300	0	2.668
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	9.500	0	11.020
	9	Installation			0	400	250	754
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				30.100	4.350	39.962
G-NT / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	3.300	2.400	6.612
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	1.900	300	2.552
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.400	5.336
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	6.100	0	7.076
	9	Installation			0	900	250	1.334
	10	Anschlußkosten			0	3.500	0	4.060
		Summe				23.900	4.350	32.770

Tabelle E-1: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 95

EFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
G-NT / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	3.300	2.400	6.612
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.400	4.872
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	6.100	0	7.076
	9	Installation			0	900	250	1.334
	10	Anschlußkosten			0	3.500	0	4.060
		Summe				27.100	4.350	36.482
G-BW / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	4.690	2.400	8.224
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	1.900	300	2.552
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.400	5.336
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	7.000	0	8.120
	9	Installation			0	900	250	1.334
	10	Anschlußkosten			0	3.500	0	4.060
		Summe			26.190	4.350	35.426	
G-BW / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	4.690	2.400	8.224
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.400	4.872
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	7.000	0	8.120
	9	Installation			0	900	250	1.334
	10	Anschlußkosten			0	3.500	0	4.060
		Summe			29.390	4.350	39.138	
HP / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger (inkl. Regelung)	20	1%	1	15.430	2.750	21.089
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	0	0	0
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.350	4.814
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	9.900	0	11.484
	9	Installation			0	1.740	250	2.308
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe			36.170	4.350	47.003	

Tabelle E-1: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 95

EFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
HP / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger (inkl. Regelung)	20	1%	1	15.430	2.750	21.089
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	0	0	0
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.350	5.278
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	9.900	0	11.484
	9	Installation			0	1.740	250	2.308
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				39.570	4.350	50.947
BWK / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.000	4.800	14.848
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	4.000	0	4.640
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.100	4.988
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				27.350	6.500	39.266
BWK / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.000	4.800	14.848
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	4.000	0	4.640
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.100	4.524
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				29.150	6.500	41.354
BWS / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.000	4.800	14.848
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.000	0	10.440
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.100	4.988
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				32.350	6.500	45.066

Tabelle E-1: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 95

EFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
BWS / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.000	4.800	14.848
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.000	0	10.440
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.100	4.524
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				34.150	6.500	47.154
WW / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.000	4.800	14.848
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.500	0	11.020
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.100	4.988
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				32.850	6.500	45.646
WW / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.000	4.800	14.848
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.500	0	11.020
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.100	4.524
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				34.650	6.500	47.734
AW / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	4.800	19.488
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.100	4.988
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				27.350	6.500	39.266

Tabelle E-1: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 95

EFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
AW / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	4.800	19.488
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.100	4.524
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				29.150	6.500	41.354
MA / PHK-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	10.000	4.800	17.168
	2	Wärmequellenanlage (Energierstern)	20	1%	1	7.000	0	8.120
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	3.200	1.100	4.988
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.300	0	1.508
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				32.350	6.500	45.066
MA / FBH-E 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	10.000	4.800	17.168
	2	Wärmequellenanlage (Energierstern)	20	1%	1	7.000	0	8.120
	3	Regelung	20	1%	1	2.500	300	3.248
	4	Leitungssystem	40	1%	0	2.800	1.100	4.524
	5	Heizflächen	20	1%	1	8.000	0	9.280
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	1.850	0	2.146
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				34.150	6.500	47.154

Tabelle E-2: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 95

MFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs- dauer	Instand- setzung	Ersatz- häufigkeit	Investition Raumheizung (o. MwSt)	Investition TWE (o. MwSt)	Gesamt- investition (inkl. MwSt)
			T_N a	f_K %	n -	I_R DM	I_{TWE} DM	A_0 DM
ÖI / PHK-M-95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	6.000	5.000	12.760
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	3.700	300	4.640
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	6.600	19.256
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	4.100	0	4.756
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	14.000	0	16.240
	9	Installation			0	1.400	250	1.914
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				53.950	13.350	78.068
ÖI / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	6.000	5.000	12.760
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	4.900	300	6.032
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	6.600	18.096
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	4.100	0	4.756
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	14.000	0	16.240
	9	Installation			0	1.400	250	1.914
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				64.150	13.350	89.900
G-NT / PHK-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	5.000	5.000	11.600
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	3.700	300	4.640
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	6.600	19.256
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	8.500	0	9.860
	9	Installation			0	1.400	250	1.914
	10	Anschlußkosten			0	5.000	1.200	7.192
		Summe				47.600	13.350	70.702

Tabelle E-2: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 95

MFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			T_N	f_K	n	I_R	I_{TWE}	A_0
			a	%	-	DM	DM	DM
G-NT / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	5.000	5.000	11.600
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	4.900	300	6.032
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	6.600	18.096
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	8.500	0	9.860
	9	Installation			0	1.400	250	1.914
	10	Anschlußkosten			0	5.000	1.200	7.192
		Summe				57.800	13.350	82.534
G-BW / PHK-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.200	5.000	15.312
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	3.700	300	4.640
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	6.600	19.256
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	8.500	0	9.860
	9	Installation			0	1.400	250	1.914
	10	Anschlußkosten			0	5.000	1.200	7.192
		Summe				50.800	13.350	74.414
G-BW / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	8.200	5.000	15.312
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	4.900	300	6.032
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	6.600	18.096
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	8.500	0	9.860
	9	Installation			0	1.400	250	1.914
	10	Anschlußkosten			0	5.000	1.200	7.192
		Summe				61.000	13.350	86.246
HP / PHK-M 95	1	Wärmeerzeuger (inkl. Regelung)	20	1%	1	16.700	8.300	29.000
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	0	0	0
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	6.800	19.488
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	14.000	0	16.240
	9	Installation			0	1.900	250	2.494
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				59.850	16.550	88.624

Tabelle E-2: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 95

MFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
HP / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger (inkl. Regelung)	20	1%	1	16.700	8.300	29.000
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	0	0	0
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	6.800	18.328
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	14.000	0	16.240
	9	Installation			0	1.900	250	2.494
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				68.850	16.550	99.064
BWK / PHK-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	7.500	22.620
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	8.500	0	9.860
	3	Regelung	20	1%	1	3.400	400	4.408
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	7.000	19.720
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				55.950	16.500	84.042
BWK / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	7.500	22.620
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	8.500	0	9.860
	3	Regelung	20	1%	1	4.500	400	5.684
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	7.000	18.560
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				63.550	16.500	92.858
BWS / PHK-EM 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	7.500	22.620
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	22.000	0	25.520
	3	Regelung	20	1%	1	3.400	400	4.408
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	7.000	19.720
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				69.450	16.500	99.702

Tabelle E-2: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 95

MFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			T_N	f_K	n	I_R	I_{TWE}	A_0
			a	%	-	DM	DM	DM
BWS / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	7.500	22.620
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	22.000	0	25.520
	3	Regelung	20	1%	1	4.500	400	5.684
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	7.000	18.560
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				77.050	16.500	108.518
WW / PHK-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	7.500	22.620
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.500	0	11.020
	3	Regelung	20	1%	1	3.400	400	4.408
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	7.000	19.720
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				56.950	16.500	85.202
WW / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	7.500	22.620
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.500	0	11.020
	3	Regelung	20	1%	1	4.500	400	5.684
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	7.000	18.560
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				64.550	16.500	94.018
MA / PHK-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	15.000	7.500	26.100
	2	Wärmequellenanlage (Energiestern)	20	1%	1	11.020	0	12.783
	3	Regelung	20	1%	1	3.400	400	4.408
	4	Leitungssystem	40	1%	0	10.000	7.000	19.720
	5	Heizflächen	20	1%	1	14.000	0	16.240
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	40	1%	0	2.500	0	2.900
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				61.470	16.500	90.445

Tabelle E-2: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 95

MFH 95	Nr.	Komponente	Nutzungs- dauer	Instand- setzung	Ersatz- häufigkeit	Investition Raumheizung (o. MwSt)	Investition TWE (o. MwSt)	Gesamt- investition (inkl. MwSt)
			T_N a	f_K %	n -	I_R DM	I_{TWE} DM	A_0 DM
MA / FBH-M 95	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	15.000	7.500	26.100
	2	Wärmequellenanlage (Energierstern)	20	1%	1	11.020	0	12.783
	3	Regelung	20	1%	1	4.500	400	5.684
	4	Leitungssystem	40	1%	0	9.000	7.000	18.560
	5	Heizflächen	20	1%	1	24.000	0	27.840
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Heizraum, Schornstein, Brennstofflager	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	750	1.200	2.262
		Summe				69.070	16.500	99.261

Tabelle E-3: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 80

EFH 80	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
ÖI / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	5.000	2.500	8.700
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	2.400	0	2.784
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	1.500	0	1.740
	9	Installation			0	400	250	754
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				16.300	3.050	22.446
G-NT / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	3.800	2.500	7.308
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	1.500	0	1.740
	9	Installation			0	900	250	1.334
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				13.200	3.050	18.850
G-BW / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	5.000	2.500	8.700
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	300	2.668
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	3.000	0	3.480
	9	Installation			0	900	250	1.334
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				15.900	3.050	21.982
BWK / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	9.000	4.800	16.008
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	8.000	0	9.280
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	350	2.726
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.500	0	1.740
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				27.500	5.450	38.222

Tabelle E-3: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des EFH 80

EFH 80	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
BWS / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	9.000	4.800	16.008
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	11.000	0	12.760
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	350	2.726
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.500	0	1.740
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				30.500	5.450	41.702
WW / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	9.000	4.800	16.008
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	9.500	0	11.020
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	350	2.726
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.500	0	1.740
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				29.000	5.450	39.962
AW / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	14.000	4.800	21.808
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	350	2.726
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.500	0	1.740
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				24.500	5.450	34.742
MA / PHK-E 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	12.000	4.800	19.488
	2	Wärmequellenanlage (Energistern)	20	1%	1	7.000	0	8.120
	3	Regelung	20	1%	1	2.000	350	2.726
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	5.000	0	5.800
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	1.500	0	1.740
	8	Schornstein (Sanie- rung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.000	300	2.668
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				29.500	5.450	40.542

Tabelle E-4: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 80

MFH 80	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			T_N	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
			a			DM	DM	DM
ÖI / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	7.800	5.500	15.428
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	3.700	300	4.640
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	4.000	0	4.640
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	1.000	300	1.508
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				33.500	6.100	45.936
G-NT / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	6.500	5.500	13.920
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	3.500	300	4.408
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	2.000	0	2.320
	9	Installation			0	1.400	300	1.972
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				28.400	6.100	40.020
G-BW / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	11.000	5.500	19.140
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	0	0	0
	3	Regelung	20	1%	1	3.500	300	4.408
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	0	0	0
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	3.500	0	4.060
	9	Installation			0	1.400	300	1.972
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				34.400	6.100	46.980
BWK / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	17.000	8.000	29.000
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	18.000	0	20.880
	3	Regelung	20	1%	1	3.500	600	4.756
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				58.800	9.000	78.648

Tabelle E-4: Investitionskosten, Nutzungsdauer und Ersatzhäufigkeit der Versorgungssystem-Komponenten des MFH 80

MFH 80	Nr.	Komponente	Nutzungs-	Instand-	Ersatz-	Investition	Investition	Gesamt-
			dauer	setzung	häufigkeit	Raumheizung	TWE	investition
			T_N	f_K	n	(o. MwSt)	(o. MwSt)	(inkl. MwSt)
			a	%	-	I_R	I_{TWE}	A_0
						DM	DM	DM
BWS / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	17.000	8.000	29.000
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	28.000	0	32.480
	3	Regelung	20	1%	1	3.500	600	4.756
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				68.800	9.000	90.248
WW / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	17.000	8.000	29.000
	2	Wärmequellenanlage	20	1%	1	10.000	0	11.600
	3	Regelung	20	1%	1	3.500	600	4.756
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				50.800	9.000	69.368
MA / PHK-M 80	1	Wärmeerzeuger	20	1%	1	22.000	8.000	34.800
	2	Wärmequellenanlage (Energistern)	20	1%	1	14.500	0	16.820
	3	Regelung	20	1%	1	3.500	600	4.756
	4	Leitungssystem	40	1%	0	0	0	0
	5	Heizflächen	20	1%	1	15.000	0	17.400
	6	Öltank	20	1%	1	0	0	0
	7	Pufferspeicher	20	1%	1	2.500	0	2.900
	8	Schornstein (Sanierung)	50	0%	0	0	0	0
	9	Installation			0	2.800	400	3.712
	10	Anschlußkosten			0	0	0	0
		Summe				60.300	9.000	80.388

Tabelle E-5: Stromtarif für die Versorgung von Wärmepumpen

Sonderabkommenpreise für WP (Stand:1.1.98) (alphabetisch nach Bundesland und Sitz des Unternehmens)									
Nr	EVU	Sitz	Land	Anzahl Tarif- kunden	Verbrauchs preis Sonderabk. HT	Verbrauchs preis Sonderabk. NT	Häu- figkeit insge- samt	Preis * Häufig- keit HT	Preis * Häufig- keit NT
				1996 in 1000	[Pf/kWh]	[Pf/kWh]	[%]		
1	ESSAG	Cottbus	BB	251,0	13,50	13,50	1,31	17,64	17,64
2	OSE	Frankfurt/Oder	BB	306,7	11,85	11,85	1,60	18,92	18,92
3	MEVAG	Potsdam	BB	457,0	11,70	11,70	2,38	27,84	27,84
4	ÜW	Achern	BW	83,4	13,90	8,20	0,43	6,04	3,56
5	UJAG	Ellwangen	BW	141,0	11,00	11,00	0,73	8,08	8,08
6	Stw.	Heidelberg	BW	86,6	17,10	11,20	0,45	7,71	5,05
7	ZEAG	Heilbronn	BW	74,5	13,00	8,70	0,39	5,04	3,37
8	Badenwerk	Karlsruhe	BW	792,0	17,10	9,20	4,12	70,51	37,94
9	EW Mittelbaden	Lahr	BW	58,8	17,10	9,00	0,31	5,24	2,76
10	KWL	Laufenburg	BW	68,5	13,80	8,07	0,36	4,92	2,88
11	KAWAG	Ludwigsburg	BW	192,4	11,30	8,30	1,00	11,32	8,31
12	MVV	Mannheim	BW	186,2	13,25	8,75	0,97	12,84	8,48
13	KWR	Rheinfelden	BW	123,9	13,90	8,60	0,65	8,97	5,55
14	LEW	Augsburg	BY	420,0	12,60	7,90	2,19	27,55	17,27
15	Stw.	Augsburg	BY	140,1	12,60	7,90	0,73	9,19	5,76
16	EVO	Bayreuth	BY	315,6	14,90	8,30	1,64	24,48	13,64
17	Stw.	München	BY	732,1	13,46	9,60	3,81	51,30	36,59
18	EWAG	Nürnberg	BY	285,1	13,35	9,30	1,48	19,82	13,80
19	OBAG	Regensburg	BY	663,0	12,80	8,50	3,45	44,18	29,34
20	REWAG	Regensburg	BY	110,6	12,80	8,50	0,58	7,37	4,89
21	Stw.	Frankfurt/M.	HE	326,0	13,90	9,80	1,70	23,59	16,63
22	ÜWAG	Fulda	HE	111,0	13,00	8,50	0,58	7,51	4,91
23	EAM	Kassel	HE	693,0	14,40	11,40	3,61	51,96	41,13
24	EVO	Offenbach	HE	161,0	12,80	12,80	0,84	10,73	10,73
25	WEMAG	Schwerin	MV	169,0	13,00	13,00	0,88	11,44	11,44
26	Stw.	Schwerin	MV	62,3	13,00	13,00	0,32	4,22	4,22
27	ÜNH	Bremen	NI	342,0	12,50	9,20	1,78	22,26	16,38
28	SVO	Celle	NI	85,3	14,10	8,90	0,44	6,26	3,95
29	EW Wesertal	Hameln	NI	210,3	14,30	8,90	1,09	15,66	9,74
30	HASTRA	Hannover	NI	579,3	12,50	8,90	3,02	37,70	26,84
31	EWE	Oldenburg	NI	617,2	13,40	9,00	3,21	43,06	28,92
32	LuK Harz	Osterode	NI	37,5	13,80	8,90	0,20	2,69	1,74
33	ASEAG	Aachen	NW	54,9	14,80	14,80	0,29	4,23	4,23
34	Stw.	Bochum	NW	227,1	13,90	9,50	1,18	16,43	11,23
35	VEW	Dortmund	NW	852,0	13,90	9,50	4,44	61,65	42,14
36	RWE Energie	Essen	NW	2886,0	11,20	11,20	15,03	168,29	168,29
37	KW Heinsberg	Geilenkirchen	NW	59,3	11,20	11,20	0,31	3,46	3,46
38	Stw.	Gelsenkirchen	NW	53,6	8,40	8,40	0,28	2,34	2,34
39	AVU	Gevelsberg	NW	110,1	13,90	9,50	0,57	7,97	5,45
40	ELEKTRO- MARK	Hagen	NW	145,8	9,60	9,60	0,76	7,29	7,29
41	Stw.	Herne	NW	100,0	13,90	9,50	0,52	7,24	4,95
42	Stw.	Krefeld	NW	140,2	10,00	10,00	0,73	7,30	7,30
43	EVL	Leverkusen	NW	90,0	11,20	11,20	0,47	5,25	5,25
44	NLK	Mönchenglad.	NW	99,6	11,20	8,40	0,52	5,81	4,35
45	Stw.	Münster	NW	164,9	13,90	9,50	0,86	11,94	8,16

Tabelle E-5: Stromtarif für die Versorgung von Wärmepumpen

Sonderabkommenpreise für WP (Stand:1.1.98) (alphabetisch nach Bundesland und Sitz des Unternehmens)									
Nr	EVU	Sitz	Land	Anzahl Tarif- kunden	Verbrauchs- preis Sonderabk. HT	Verbrauchs- preis Sonderabk. NT	Häu- figkeit insge- samt	Preis * Häufig- keit HT	Preis * Häufig- keit NT
				1996 in 1000	[Pf/kWh]	[Pf/kWh]	[%]		
46	Stw.	Wuppertal	NW	234,2	18,90	9,80	1,22	23,05	11,95
47	TWK	Kaiserslautern	RP	73,9	15,00	12,00	0,38	5,77	4,62
48	KEVAG	Koblenz	RP	135,5	14,00	8,45	0,71	9,88	5,96
49	Pfalzwerke	Ludwigshafen	RP	296,0	7,80	7,80	1,54	12,02	12,02
50	KRW	Neuwied	RP	72,4	11,20	11,20	0,38	4,22	4,22
51	EWR	Worms	RP	180,2	11,30	11,30	0,94	10,60	10,60
52	SCHLESWAG	Rendsburg	SH	676,1	13,00	10,50	3,52	45,76	36,96
53	VSE	Saarbrücken	SL	192,3	11,20	11,20	1,00	11,21	11,21
54	EVS	Chemnitz	SN	694,4	11,10	9,30	3,62	40,13	33,62
55	Stw.	Chemnitz	SN	171,3	11,10	9,30	0,89	9,90	8,29
56	DREWAG	Dresden	SN	273,7	14,80	11,70	1,42	21,09	16,67
57	ESAG	Dresden	SN	404,0	14,80	8,90	2,10	31,13	18,72
58	Stw	Leipzig	SN	295,7	16,90	11,00	1,54	26,02	16,93
59	EFZ	Zwickau	SN	66,4	13,90	9,30	0,35	4,81	3,22
60	Stromversorg.	Dessau	ST	50,5	13,50	10,80	0,26	3,55	2,84
61	MEAG	Halle	ST	445,0	13,50	10,80	2,32	31,28	25,02
62	EVM	Magdeburg	ST	304,0	15,00	12,00	1,58	23,74	18,99
63	Versorgungsbetr.	Eisenach	TH	24,5	16,50	9,10	0,13	2,11	1,16
64	Stw.	Erfurt	TH	117,7	16,50	9,90	0,61	10,11	6,07
65	TEAG	Erfurt	TH	561,6	16,50	9,10	2,92	48,24	26,61
66	Stw.	Gera	TH	72,0	13,00	13,00	0,38	4,88	4,88
	SUMME			19207,4			100,00		
	MITTEL							13,1	10,0

Tabelle E-6: Kosten für Wartung und Reinigung der Versorgungssysteme

Versorgungssystem	EFH 95 DM/a	MFH 95 DM/a	EFH 80 DM/a	MFH 80 DM/a
Öl / PHK	420	420	420	420
Öl / FBH	420	420		
G-NT / PHK	300	300	300	300
G-NT / FBH	300	300		
G-BW / PHK	300	300	300	300
G-BW / FBH	300	300		
HP / PHK	400	400		
HP / FBH	400	400		
BWK / PHK	150	150	150	150
BWK / FBH	150	150		
BWS / PHK	150	150	150	150
BWS / FBH	150	150		
WW / PHK	150	150	150	150
WW / FBH	150	150		
AW / PHK	150		150	
AW / FBH	150			
MA / PHK	150	150	150	150
MA / FBH	150	150		

Tabelle E-7: Gesamtannuität der Versorgungssysteme des EFH 95

EFH 95	Kapitalgebundene Kosten	Bedarfsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Gesamtannuität
	$A_{N,K}$ DM/a	$A_{N,V}$ DM/a	$A_{N,B}$ DM/a	A_N DM/a
Öl / PHK	2.883	1.845	420	5.148
Öl / FBH	3.215	1.818	420	5.453
G-NT / PHK	2.623	1.546	300	4.469
G-NT / FBH	2.965	1.522	300	4.788
G-BW / PHK	2.834	1.447	300	4.581
G-BW / FBH	3.176	1.381	300	4.857
HP / PHK	3.823	2.031	400	6.254
HP / FBH	4.171	2.001	400	6.573
BWK / PHK	3.381	1.129	150	4.660
BWK / FBH	3.576	996	150	4.723
BWS / PHK	3.904	1.129	150	5.183
BWS / FBH	4.100	996	150	5.246
WW / PHK	3.957	993	150	5.100
WW / FBH	4.152	890	150	5.192
AW / PHK	3.381	1.314	150	4.845
AW / FBH	3.576	1.137	150	4.863
MA / PHK	3.904	1.277	150	5.332
MA / FBH	4.100	1.111	150	5.361

Tabelle E-8: Gesamtannuität der Versorgungssysteme des MFH 95

MFH 95	Kapitalgebundene Kosten	Bedarfsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Gesamtannuität
	$A_{N,K}$ DM/a	$A_{N,V}$ DM/a	$A_{N,B}$ DM/a	A_N DM/a
Öl / PHK	6.255	4.048	420	10.723
Öl / FBH	7.340	3.994	420	11.755
G-NT / PHK	5.721	3.428	300	9.448
G-NT / FBH	6.806	3.381	300	10.487
G-BW / PHK	6.056	3.184	300	9.540
G-BW / FBH	7.141	3.056	300	10.497
HP / PHK	7.017	4.436	400	11.853
HP / FBH	8.158	4.377	400	12.935
BWK / PHK	7.161	2.524	150	9.834
BWK / FBH	7.974	2.261	150	10.385
BWS / PHK	8.574	2.524	150	11.248
BWS / FBH	9.387	2.261	150	11.798
WW / PHK	7.266	2.215	150	9.630
WW / FBH	8.079	2.009	150	10.238
MA / PHK	7.728	2.874	150	10.752
MA / FBH	8.552	2.544	150	11.246

Tabelle E-9: Gesamtannuität der Versorgungssysteme des EFH 80

EFH 80	Kapitalgebundene Kosten	Bedarfsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Gesamtannuität
	$A_{N,K}$	$A_{N,V}$	$A_{N,B}$	A_N
	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a
Öl / PHK	1.969	2.324	420	4.713
G-NT / PHK	1.639	1.960	300	3.899
G-BW / PHK	1.872	1.831	300	4.004
BWK / PHK	3.423	1.432	150	5.005
BWS / PHK	3.737	1.432	150	5.319
WW / PHK	3.580	1.257	150	4.986
AW / PHK	3.109	1.671	150	4.930
MA / PHK	3.632	1.623	150	5.404

Tabelle E-10: Gesamtannuität der Versorgungssysteme des MFH 80

EFH 80	Kapitalgebundene Kosten	Bedarfsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Gesamtannuität
	$A_{N,K}$	$A_{N,V}$	$A_{N,B}$	A_N
	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a
Öl / PHK	4.065	5.585	420	10.070
G-NT / PHK	3.526	4.759	300	8.585
G-BW / PHK	4.106	4.417	300	8.822
BWK / PHK	7.060	3.497	150	10.708
BWS / PHK	8.107	3.497	150	11.754
WW / PHK	6.223	3.060	150	9.433
MA / PHK	7.217	3.982	150	11.349

Tabelle E-11: Wärmegestehungskosten der Versorgungssysteme

Versorgungssystem	EFH 95	MFH 95	EFH 80	MFH 80
	Pf/kWh	Pf/kWh	Pf/kWh	Pf/kWh
Öl / PHK	29,65	27,29	20,94	18,04
Öl / FBH	31,41	29,91		
G-NT / PHK	25,74	24,04	17,32	15,38
G-NT / FBH	27,58	26,69		
G-BW / PHK	26,39	24,28	17,78	15,80
G-BW / FBH	27,98	26,71		
HP / PHK	36,02	30,16		
HP / FBH	37,86	32,92		
BWK / PHK	26,84	25,03	22,23	19,18
BWK / FBH	27,20	26,43		
BWS / PHK	29,85	28,62	23,63	21,06
BWS / FBH	30,22	30,02		
WW / PHK	29,37	24,51	22,15	16,90
WW / FBH	29,90	26,05		
AW / PHK	27,90		21,90	
AW / FBH	28,01			
MA / PHK	30,71	27,36	24,01	20,33
MA / FBH	30,88	28,62		

Anhang F: Liste der Hersteller und Bohrunternehmen

Tabelle F-1: Hersteller von Heizungswärmepumpen in Deutschland

Name	Anschrift	Telefon / Fax / www / Mail
AEG Hausgeräte GmbH	Muggenhofer Str. 135 90429 Nürnberg	0911 / 323-0 Fax: 323-1770
AL-KO Therm GmbH	Hauptstr. 248 – 250 89343 Jettingen - Scheppach	08225 / 39-0 Fax: 39-261
Alpha-InnoTec GmbH Heiz- und Kühlsysteme	Industriestr. 3 95359 Kasendorf	Tel. 09228 / 9906-0 Fax:9906-29 Artur.rodecker@t-online.de
BARTL Wärmepumpen – Seidel Apparatebau	Wörthstr. 13 89077 Ulm	0731 / 9314935 Fax: 9314938
Betonbau GmbH (Massivabsorber-Heizsystem)	Schwetzingen Str. 22-26 68753 Waghäusel	07254 / 980-0 Fax: 980-419
Betonbau GmbH (Massivabsorber-Heizsystem)	Baggerweg 11 85051 Ingolstadt	0841 / 97377-0 Fax: 97377-34
Blomberg Werke KG	Voltastr. 5 59229 Ahlen / Westf.	Tel. 02382 / 780-0 Fax: 780-329 Blombergnews@blomberg.de
Dimplex GmbH	Am Goldenen Feld 18 95326 Kulmbach	09221 / 709-100 Fax: 709-339
Hautec Energie-Sparsysteme GmbH	An der Molkerei 9 47551 Bedburg-Hau	02821 / 7624-0 Fax: 7624-42
Kälte-Fedder Landau / Isar GmbH	Auenstr. 13 94405 Landau	09951 / 1675 Fax: 8415
KVS Klimatechnik GmbH & Co. KG	Loebener Str. 73A 70469 Stuttgart	0711 / 869617-0 Fax: 896917-44
Ochsner Energietechnik	Zweibrückenstr. 15 80331 München	0172 / 8328444 www.ochsner.de
Satag Thermotechnik AG	Sassnitzer Str. 8 90425 Nürnberg	Tel. 0911 / 9389738 Fax: 9389739 Satag.thermotechnik@t-online.de
SET Schmidt Energietechnik	August-Blessing-Str. 5 71282 Hemmingen	07150 / 9454-0 Fax: 2337
Siemens Heiztechnik	Von-Linde-Str. 8 95326 Kulmbach	09221 / 9753-0 Fax: -10
Siemens AG	Richard-Strauß-Str. 76 80286 München	089 / 9221-4984 Fax: -3595
Stiebel Eltron GmbH & Co. KG	Bunsenstr. 7 82152 Planegg	089 / 899156-0 Fax: -88
Stiebel Eltron GmbH & Co. KG	Dr.-Stiebel-Str. 37601 Holzminden	05531 / 702-0 Fax: 702-48
Stulz GmbH Klimatechnik	Holsteiner Chaussee 283 22457 Hamburg	040 / 5585-0 Fax: 5585-352
Stulz GmbH Klimatechnik	Rudolf-Selzer-Str. 14B 61267 Neu-Anspach	06081 / 963776 Fax: 963778
Joh. Vaillant GmbH & Co.	Berghäuser Str. 40 42859 Remscheid	02191 / 18-0 Fax: 18-2810 Kundt@stulz-gmbh.de
Viessmann Werke GmbH & Co.	35108 Allendorf	06452 / 70-0 Fax: 70-5330
Waterkotte Wärmepumpen GmbH	Gewerkenstr. 15 44628 Herne	Tel. 02323 / 9676-0 Fax: 9376-99 www.waterkotte.de

Tabelle F-2: Bohrunternehmen in Deutschland

Name	Anschrift	Telefon / Fax / www / Mail
Angerer-Bohrungen GmbH	Rothensteiner Straße 6 88730 Grönenbach	08334 / 328 + 7828 Fax: 6218
Josef Autermann KG Haus- und Wärme- technik Brunnenbau	Südkirchener Str. 11 57379 Selm	02592 / 3091
BGU – Dr. Schott & Partner	Bründlwiese 6 82319 Starnberg	Tel. 08151 / 6805 Fax: 21845 Bgu-sta@t-online.de
BGU – Dr. Schott & Partner (NL Würz- burg)	Greisingerstr. 8 97074 Würzburg	Tel. 0931 / 887059 Fax: 887026 bgu-wue@t-online.de
Behringer & Dittman Bohrgesellschaft mbH	Kreuzsteinweg 1c 90765 Fürth	0911 / 9799600 Fax: 97996020
Heinz Burkhardt Ges. für geologische und hydrologische Bohrungen mbH & CO.KG	Tulpenstr. 15 75389 Neuweiler	07055 / 9297-0 Fax: 9297-77
Dr. Stadtbäumer Baugrunduntersuchungen GmbH	Rotwandstr. 10 85609 Aschheim	089 / 991518-0 Fax: 991518-13
Dr. Stadtbäumer Baugrunduntersuchungen GmbH	Hauptstr. 1 06184 Gröbers	034605 / 21197 Fax: 21190
Karl-Heinz Ehlen	Buchenweg 8 54578 Wiesbaum	06593-1071
Engel Brunnenbau GmbH	Grubenstr. 20 66571 Wiesbach	06806 / 86164 Fax: 84838
Erdbohr und Handel GmbH	Reeser Landstr. 12 46483 Wesel	0281 / 33882-0 Fax: 33882-25
Erkelenzer Bohrgesellschaft mbH	Otto-Hahn-Str. 19 54516 Wittlich	06571 / 9734-0 Fax: 9734-89
Gebr. Lange & Söhne Brunnenbau GmbH	Im Heetwinkel 106 46514 Schermbeck	02853 / 95144
Gebr. Müller GmbH Bohrfirma	Escher Str. 29 – 32 56729 Kirchwald	02651 / 8003-00 Fax: 8003-29
Werner Gehring GmbH	Am Holtkebach 5 48720 Rosendahl	02566 / 1369
Geo Bohrtechnik GmbH	Daloserweg 6 89134 Bermaringen	07304 / 9602-0 Fax: 9602-40
GEO Technik und Service GmbH	Stendaler Str. 15 39579 Kläden	Tel. 039324 / 81347 Fax: 91557 0172 / 3926664
GEOTEC Dr. Schubert GmbH	Am Stadtpark 11 39340 Haldensleben	Tel. 03904 / 45053 Fax: 40314 0171 / 5205689
Hydodrill GbR	Kapellenweg 4a 89362 Offingen	08224 / 7478 Fax: 7478
Krystian Panitz Bohr – und Brunnenbau	Ringstr. 18 03222 Kittlitz	03542 / 46464 Fax: 46518
PGI	Grubholzerstr. 6 83059 Kolbermoor	08031 / 90987-0 Fax: 90987-20
Markus Schädlich Brunnenbauservice	Güldenbergr. 21 46242 Bottrop	Tel. 02041 / 569813 Fax: 57188 0171 / 3119084
Terra Therm Erdwärme GmbH	Gewerbestr. 3 – 5 36148 Kalbach	06655 / 9696-0
Bernd Textor GmbH	Carl-Benz-Str. 43 57299 Burbach	Tel. 02736 / 491100 Fax: 5431 textor-brunnenbau-wp@t-online.de
Wassermann Brunnenbauunternehmen	Fichtenstr. 87 47574 Goch	02823 / 3800 Fax: 2848
Weikert Brunnenbau – Bohrungen	Bamberger Str. 18 96172 Mühlhausen	09548 / 8089 Fax: 8260

Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Bezugsadresse: Universität Stuttgart
 Institut für Energiewirtschaft
 und Rationelle Energieanwendung
 - Bibliothek -
 D-70550 Stuttgart

 Tel.: 0711 / 7806161
 Fax: 0711 / 7803953
 E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:
<http://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 94 J. Bagemihl
 Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt
 Februar 2003, 138 Seiten, 10 €
- Band 93 A. Stuible
 Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen
 November 2002, 156 Seiten, 13 €
- Band 92 M. Blesl
 Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs
 August 2002, 282 Seiten, 18 €
- Band 91 S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß
 Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg
 August 2002, 138 Seiten, 10 €
- Band 90 B. Frey, M. Neubauer
 Energy Supply for Three Cities in Southern Africa
 Juli 2002, 96 Seiten, 8 €
- Band 89 A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach
 Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin
 Juli 2002, 212 Seiten, 15 €

- Band 88 M. Sawillion
Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken
Juli 2002, 136 Seiten, 10 €
- Band 87 T. Marheineke
Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken
Juli 2002, 222 Seiten, 15 €
- Band 86 B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß
Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage
Juni 2002, 224 Seiten, 15 €
- Band 85 E. Laege
Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse
Januar 2002, 254 Seiten, 15 €
- Band 84 S. Molt
Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystem-analytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung
Oktober 2001, 166 Seiten, 13 €
- Band 83 D. Hartmann
Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien
September 2001, 228 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 82 G. Kühner
Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben
September 2001, 210 Seiten, 15 €
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß
Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft
August 2001, 172 Seiten, 13 €
- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber
Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen
Mai 2001, 166 Seiten, 13 €

- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann
Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg
 April 2001, 142 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe
 Februar 2001, 248 Seiten, 15 €
- Band 77 W. Rüffler
Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg
 Januar 2001, 284 Seiten, 18 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 76 S. Rivas
Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern
 Januar 2001, 200 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 75 M. Härdtlein
Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (\times Triticosecale Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzungen
 September 2000, 168 Seiten, 13 €
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß
Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken
 August 2000, 118 Seiten, 10 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 73 J. Sontow
Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung
 Juli 2000, 242 Seiten, 15 €
- Band 72 H. Hermes
Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors
 Juli 2000, 188 Seiten, 15 €
- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard
Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)
 Juni 2000, 146 Seiten, 13 €

- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß
Energieverbrauchsprognose für Bayern
 Mai 2000, 240 Seiten, 15 €
 Kurzfassung, 46 Seiten, 5 €
- Band 69 J. Baur
Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern
 Mai 2000, 154 Seiten, 13 €
- Band 68 G. Weinrebe
Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken
 April 2000, 212 Seiten, 15 €
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)
Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies
 April 2000, 282 Seiten, 18 €
- Band 66 A. Schuler
Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg
 März 2000, 236 Seiten, 15 €
- Band 65 A. Schäfer
Reduction of CO₂-Emissions in the Global Transportation Sector
 März 2000, 290 Seiten, 18 €
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation -
 März 2000, 148 Seiten, 13 €
- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jezierska
Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten
 Dezember 1999, 308 Seiten, 20 €
- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß
Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs
 November 1999, 146 Seiten, 13 €
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich
Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme
 September 1999, 138 Seiten, 10 €

- Band 60 R. Lux
Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme
September 1999, 162 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 59 M. Kayser
Energetische Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -
Juli 1999, 184 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 58 C. John
Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissions-szenarien am Beispiel Baden-Württembergs
Juni 1999, 214 Seiten, 15 €
- Band 57 T. Stelzer
Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweg-analysen von Umweltwirkungen
Mai 1999, 212 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß
Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark
Mai 1999, 322 Seiten, 20 € (*z. Zt. vergriffen*)
Kurzfassung, 48 Seiten, 5 €
- Band 55 B. Biffar
Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse
Mai 1999, 236 Seiten, 15 €
- Band 54 E. Fleißner
Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbraucher-sektor
Januar 1999, 306 Seiten, 20 €
- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)
Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture
Januar 1999, 252 Seiten, 18 €
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody
Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers
Oktober 1998, 156 Seiten, 13 €

- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig
Erweiterung der Analysemöglichkeiten von NetWork - Der Netzwerkeditor
 September 1998, 112 Seiten, 10 €
- Band 50 S. Becher
Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen
 Juli 1998, 200 Seiten, 15 €
- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß
Einbindung des ECOLOG-Modells 'E³Net' und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS-Instrumentarium (ECOLOG II)
 Juli 1998, 110 Seiten, 10 €
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret
ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung
 März 1998, 184 Seiten, 15 €
- Band 47 C. Schlenzig
PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung
 Januar 1998, 230 Seiten, 15 €
- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)
External Costs of Transport
 April 1998, 144 Seiten, 13 €
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Despretz, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta
Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises
 Januar 1998, 352 Seiten, 20 €
- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß
Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren
 Dezember 1997, 186 Seiten, 15 €
- Band 43 J. Albiger
Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung
 November 1997, 168 Seiten, 13 €
- Band 42 P. Berner
Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs
 November 1997, 238 Seiten, 15 €

- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölfe
Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency
 August 1997, 122 Seiten, 10 €
- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Rüdfler, P. Schaumann, A. Voß
Kostenvergleich verschiedener CO₂-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland
 August 1997, 156 Seiten, 13 €
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne
MOSAİK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie
 Juli 1997, 172 Seiten, 13 €
- Band 38 M. Kaltschmitt
Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
 April 1997, 108 Seiten, 10 €
- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß
Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern
 März 1997, 82 Seiten, 8 €
- Band 36 P. Schaumann
Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell -
 Januar 1997, 282 Seiten, 18 €
- Band 35 R. Kühner
Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme
 Dezember 1996, 262 Seiten, 18 €
- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann
Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen
 November 1996, 124 Seiten, 10 €
- Band 33 W. Krewitt
Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme
 November 1996, 196 Seiten, 15 €

- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan
Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions
September 1996, 118 Seiten, 10 €
- Band 31 W. Rüdfler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß
Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg*
Juli 1996, 140 Seiten, 13 €
- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß
Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective
September 1996, 264 Seiten, 18 €
- Band 29 M. Hanselmann
Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
August 1996, 138 Seiten, 13 €
- Band 28 G. Schmid
Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen
August 1996, 184 Seiten, 15 €
- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich
TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT
August 1996, 172 Seiten, 13 €
- Band 26 T. Hellwig
OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben
Mai 1998, 118 Seiten, 10 €
- Band 25 R. Laing
CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias
Februar 1996, 221 Seiten, 20 €
- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich
Externe Kosten der Energieversorgung
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten, 3 €
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß
Entwicklung eines Energieinformationssystems
März 1996, 76 Seiten, 3 €

- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß
Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten, 3 €
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Ruffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß
Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg
September 1995, 454 Seiten, 26 €
Kurzfassung, 48 Seiten, 3 €
- Band 20 M. Fishedick
Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen
Dezember 1995, 196 Seiten, 15 €
- Band 19 A. Obermeier
Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg
Mai 1995, 208 Seiten, 15 €
- Band 18 N. Kalume
Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern
Dezember 1994, 113 Seiten, 10 €
- Band 17 Th. Müller
Ermittlung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
November 1994, 142 Seiten, 10 €
- Band 16 A. Wiese
Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland
Juni 1994, 223 Seiten, 15 €
- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne
Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt
Januar 1994, 154 Seiten, 13 €
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich
Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models
November 1993, 105 Seiten, 10 €

- Band 13 R. Friedrich
Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen
Juli 1992, 292 Seiten, 18 €
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß
Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten
August 1992, 471 Seiten, 26 €
Kurzfassung, 45 Seiten, 5 €
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese
Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg
April 1992, 320 Seiten, 20 €
- Band 10 A. Reuter
Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern
November 1991, 170 Seiten, 13 €
- Band 9 T. Kohler
Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland
Juli 1991, 162 Seiten, 13 €
- Band 8 M. Mattis
Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg
Juni 1991, 188 Seiten, 13 €
- Band 7 M. Kaltschmitt
Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs
Dezember 1990, 178 Seiten, 13 €
- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski
Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany
Juli 1990, 92 Seiten, 8 €
- Band 5 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb
Juli 1990, 484 Seiten, 28 €

- Band 4 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß,
J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hoahrhein-Bodensee
Juni 1990, 498 Seiten, 28 €
- Band 3 D. Kluck
Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung
Mai 1990, 155 Seiten, 10 €
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter,
A. Voß, H.-G. Wystrcil
**Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken
ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern**
Mai 1990, 316 Seiten, 20 €
- Band 1 U. Fahl
**KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft
und Energiepolitik**
März 1990, 265 Seiten, 18 €

