

Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen

Dipl.-Ing. Rudolf Heidelck

IZW e.V. – Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik, Hannover

Kurzfassung

In zwei Studien [1,2] wurden Wärmepumpen-Heizungsanlagen im Hinblick auf den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen untersucht und dazu Messdaten der energetischen Eigenschaften von Wärmepumpenanlagen gesammelt und ausgewertet.

Als wesentliche Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen, deren Messdaten ausgewertet wurden, in den letzten Jahren deutlich gestiegen ist. Mit Elektro-Wärmepumpenanlagen können 21% (Erdreich/Wasser) bzw. 29% (Wasser/Wasser) Primärenergie gegenüber einer Gasbrennwertheizung mit 104% Nutzungsgrad eingespart werden. Im ähnlichem Maße lassen sich auch die Treibhausgasemissionen, auf ein CO₂-Äquivalent umgerechnet, um 22% bzw. 30% reduzieren. Als Antriebsstrom wurde Strom der öffentlichen Versorgung vorausgesetzt, die maximale Vorlauftemperatur der Wärmeverteilung beträgt 35°C.

Mit Gasmotor angetriebenen Wärmepumpen können gegenüber der Gasbrennwertheizung 37% Primärenergie und 36% an Treibhausgasemissionen eingespart werden.

Legt man die aktuelle Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie – BMWi zugrunde, die den Einsatz von regenerativem Strom voraussetzen, sinken die CO₂-Emissionen auf nahezu 0, lediglich geringe Verluste in den Vorketten und die Materialbereitstellung für die Wärmepumpenanlage sind noch zu berücksichtigen.

Stichworte: Wärmepumpen, Primärenergie, KEA, Messdaten, CO₂-Emissionen

1 Einleitung

Für die Bundesrepublik Deutschland zeichnet sich in der Zukunft eine Änderung der Energiepolitik ab, im wesentlichen bedingt durch die Endlichkeit und Verteuerung fossiler Energiequellen und durch die mit deren Nutzung verbundene Belastung der Atmosphäre durch Treibhausgase.

Das Kyoto-Protokoll regelt die Emissionsminderung dieser Gase, unter ihnen vor allen Dingen das durch Verbrennung entstehende Kohlendioxid, mit 8 % für die Euro-

päische Union, 7 % für die USA und 6 % für Japan. Deutschland selbst hat sich ein nationales Ziel einer Emissionsminderung von 25 % bis zum Jahre 2005 im Vergleich zum Jahr 1990 gestellt.

Wärmepumpen können mit Nutzttemperaturen von bis 120°C Niedertemperaturwärme effizient bereitstellen, da neben wertvoller Antriebsenergie regenerative Umweltwärme aus Luft, Wasser und Erdreich verwendet wird. Niedertemperaturwärme stellt den überwiegenden Anteil der Bedarfsstruktur der Endenergienutzung in Deutschland dar, Abbildung 1. Neben der Raumheizung mit 33,6% kann auch ein Teil der Prozesswärme von 25,3% von Wärmepumpen abgedeckt werden. Um das Einsparpotenzial an Primärenergie und die Vermeidung von Treibhausgasemissionen beurteilen zu können, wurden daher zwei Studien [1,2] im Auftrage des Fachinformationszentrums Karlsruhe, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie -BMBF, zu diesen Themen erarbeitet.

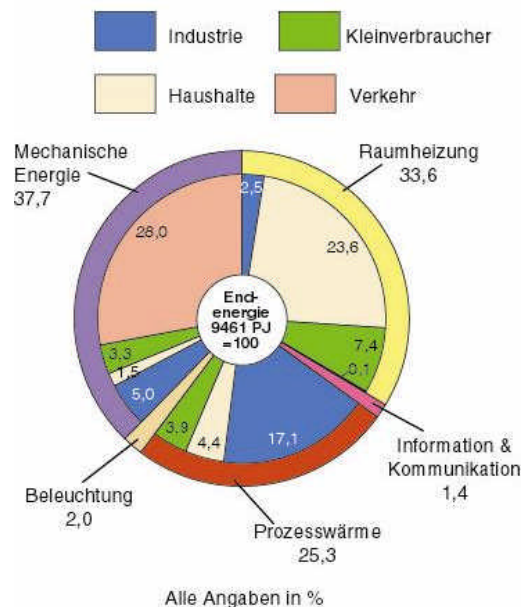


Abbildung 1: Bedarfsstruktur der Endenergienutzung in Deutschland 1998

Zur Bestimmung des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen müssen neben der Effizienz der Wärmepumpenheizanlage auch die Verluste in den vorgelagerten Stufen der Energiebereitstellung berücksichtigt werden. In Abbildung 2 ist die gesamte Energiewandlung bei Wärmepumpenheizanlagen dargestellt. Zur Bestimmung der zu untersuchenden Größen wurde daher in zwei Schritten vorgegangen. In Studie 1 „Aktualisierung der Basisdaten für den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor zur ganzheitlichen Bewertung verschiedener Heizungssysteme“ wurde die Energiewandlung von Primärenergie in Endenergie, in Studie 2 „Untersuchung von Praxisdaten zum Primärenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen“ die Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie (Nutzwärme) untersucht.

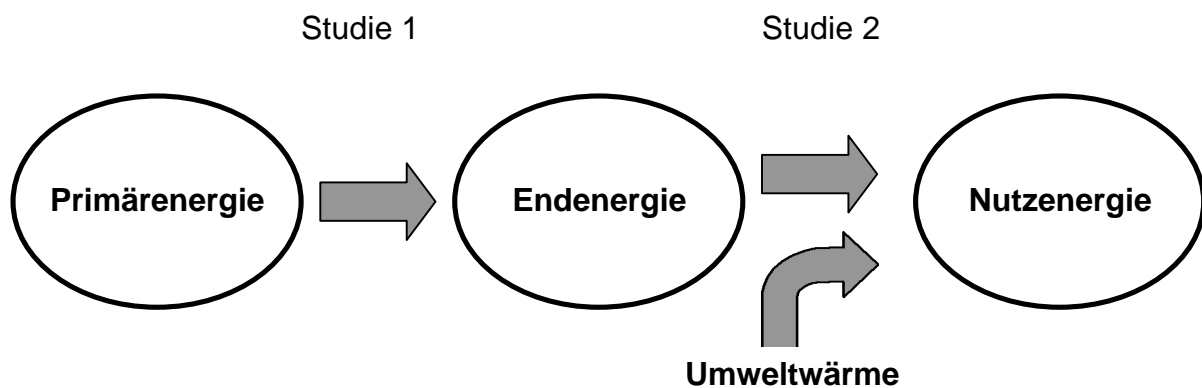


Abbildung 2: Energieumwandlung bei der Beheizung mit Wärmepumpen

2 Studie 1 - Aktualisierung der Basisdaten für den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor zur ganzheitlichen Bewertung verschiedener Heizungssysteme

Datenbereitstellung

Für die Bereitstellung der notwendigen Daten und zur Berechnung der Kenngrößen wurde maßgeblich auf das Computermodell GEMIS in der Version 3.08 zurückgegriffen [3].

Das Computermodell GEMIS (**G**esamt-**E**missions-**M**odell integrierter **S**ysteme) wurde als Instrument zur vergleichenden Untersuchung von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung vom Öko-Institut e.V. und der Gesamthochschule Kassel (GhK) in den Jahren 1987-1989 entwickelt und seitdem kontinuierlich aktualisiert. Das Programm kann von der Homepage des Öko-Institutes (www.oeko.de) heruntergeladen werden.

Dieses Computerprogramm liefert Ergebnisse, wie z. B. CO₂-, SO₂- und NO_x-Emissionen, die als Bewertungshilfen für verschiedenste Prozesse und Prozessketten herangezogen werden können. Dabei berücksichtigt GEMIS von der Primärenergie- bzw. Rohstoffgewinnung bis zur Nutzenergie- bzw. Stoffbereitstellung alle Schritte und bezieht Hilfsenergie- und Materialaufwand zur Herstellung von Energieanlagen und Transportsystemen mit ein.

GEMIS ist modular aufgebaut. Es bildet die komplexen Prozessketten im Bereich Energie, Stoffe und Transport durch einen modularen Aufbau ab, d. h. es gibt einzelne Module, die unabhängig voneinander betrachtet und bearbeitet werden können. Diese Einzelmodule können dann beliebig kombiniert und miteinander verknüpft werden.

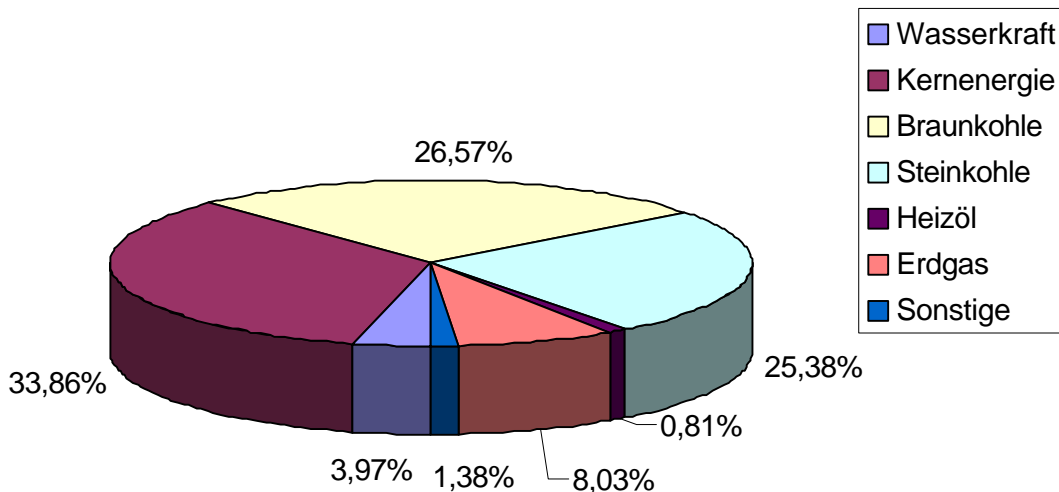
Um sich nicht nur auf die Daten von GEMIS zu stützen, wurde außerdem der Stammdatensatz VDEW-GEMIS 3.0 verwendet, der vom Fichtner Development Engineering zusammengestellt worden ist [4].

Außerdem wurde die Daten durch eine neuere Statistik [5] zum Strommarkt Deutschland ergänzt, um den aktuellen Strommix zu berücksichtigen.

Strom der öffentlichen Versorgung

Für Wärmepumpen wird Strom der öffentlichen Versorgung, d.h. praktisch der Strom der aus der „Steckdose“ kommt, zugrunde gelegt, um die aktuellen Umweltauswirkungen zu beurteilen.

Die öffentliche Versorgung wird nicht nur von den öffentlichen Versorgern sichergestellt, sondern auch von Einspeisungen der Deutschen Bahn und Industrie. Damit ergibt sich der in Abbildung 3 gültige Strommix für Strom der öffentlichen Versorgung. Die Verteilung, bezogen auf die Netto-Erzeugung, ist für das Jahr 1997 dargestellt. Die Kategorie "Sonstige" fasst die Primärenergieträger Müll-, Klär- und Grubengas zusammen. In den Anteilen der Wasserkraft sind auch die Anteile der Windkraft enthalten.



Quelle: Strommarkt Deutschland 1997, VDEW

Abbildung 3: Netto-Elektrizitätserzeugung der öffentlichen Versorgung 1997, 472,9 Mrd. kWh [5]

Für die Untersuchungen wird dieser Mix zugrundegelegt, die Kraftwerkwirkungsgrade werden aus den Angaben der Daten von GEMIS und VDEW-GEMIS gemittelt. In Tabelle 1 sind die berechneten Werte für den GEMIS-, VDEW-GEMIS und IZW-

Datensatz zusammengefasst. Die Werte unterscheiden sich maximal um 7%, so dass die Umweltauswirkungen beim Stromeinsatz ähnlich beurteilt werden.

Tabelle 1: Kennwerte der Endenergie Strom der öffentlichen Versorgung

	Einheit	Öffentliche Versorgung		
		VDEW	IZW	GEMIS
KEA	kWh/kWh	2,99	3,07	2,94
CO ₂	g/kWh	604,0	625,7	648,6
CO ₂ -Äq.	g/kWh	639,8	661,9	688,9

Strom auf Basis der Primärenergieträgers Erdgas

Will man die Frage untersuchen, wie ein bestimmter Primärenergieträger am besten zur Beheizung eingesetzt werden kann, muss der eingesetzte Strom anders definiert werden. Da in den letzten Jahren die Beheizung mit Gasniedertemperaturkesseln stark zugenommen hat, wird daher ein Wärmepumpenantriebsstrom definiert, der auf dem Primärenergieträger Erdgas basiert und in einem GuD-Kraftwerk hergestellt wurde. Das Kraftwerk entspricht mit einem Stromwirkungsgrad von 58% dem neuesten Stand der Technologie. Eine mögliche Fernwärmenutzung mit entsprechender Gutschrift der erzeugten Wärme wurde nicht vorgenommen. Würde diese, sicherlich empfehlenswerte Nutzung, noch berücksichtigt, würden sich die berechneten Einsparungen bzw. Emissionsminderungen noch vergrößern.

Dieses Szenario ist dafür gedacht zu untersuchen, wie sich eine größere Anzahl von eingesetzten Wärmepumpenanlagen auswirken. Voraussetzung dabei ist, dass dann entsprechend viele Verbrennungssysteme vermieden werden, Erdgas zu deren Antrieb eingespart werden kann und dieses Erdgas in modernen Anlagen verstromt wird. Betriebswirtschaftliche Anreize dazu sollten daher von der Politik aus volkswirtschaftlichen Gründen geprüft werden.

Strom aus regenerativen Quellen

Durch die aktuelle Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie – BMWi, die den Einsatz von regenerativem Strom voraussetzt, sinken die CO₂-Emissionen auf nahezu 0, lediglich geringe Verluste in den Vorketten und die Materialbereitstellung für die Wärmepumpenanlage sind noch zu berücksichtigen.

Das Ergebnis ist ein System, das aus umweltpolitischer Sicht sicherlich sehr positiv zu beurteilen ist, wirtschaftlich aber kaum interessant ist, da regenerativer Strom noch recht teuer ist. Entsprechend der CO₂-Emissionsminderung sollten daher diese Systeme in höherem Maße gefördert werden, um es auch wirtschaftlich für den Betreiber interessant zu machen.

Für die Berechnungen werden Mittelwerte des GEMIS- und VDEW-GEMIS-Datensatzes mit einem Mix von 85% Wasserkraft und 15% Windkraft zugrundegelegt.

Endenergie Erdgas

Vielversprechend ist, wie die späteren Berechnungen zeigen, ebenfalls der Einsatz von gasbetriebenen Wärmepumpen. Die Berechnung der Vorkettenverluste für Erdgas ist sehr aufwendig und mit Unsicherheiten verbunden, speziell bezogen auf die Transportverluste von Erdgas aus den GUS-Staaten. Um beiden Datensätzen Rechnung zu tragen, wird für den IZW-Datensatz der arithmetische Mittelwert der Kenndaten vom GEMIS- und VDEW-Datensatz angesetzt. Die Werte beinhalten alle Emissionen bis zur Hausgrenze, also ohne die eigentliche Verbrennung. Daher wurden zusätzlich die Kennwerte inklusive Verbrennung (inkl. Verbr.) mit 100% Nutzungsgrad angegeben.

Definitionen

In den Berechnungen werden die Begriffe CO₂-Äquivalent (CO₂-Äq.) und kumulierter Energieaufwand verwendet. Sie sind folgendermaßen definiert:

CO₂-Äquivalente = Emissionen von CO₂ und weiteren klimawirksamen Gasen, die auf entsprechende, bewertete CO₂-Emissionen umgerechnet sind.

Kumulierter Energieaufwand (KEA) = Der kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann (VDI 4600). Vorgelagerte Energieaufwendungen werden berücksichtigt. Der Begriff entspricht dem Primärenergiefaktor.

Kennwerte der Endenergien für Wärmepumpen

Entsprechend den oben beschriebenen Randbedingungen ergeben sich folgende Kennwerte, wie in Tabelle 2 beschrieben.

Tabelle 2: Kennwerte der Endenergien für Wärmepumpenanlagen

	Einheit	Strom öffentl. Vers.	Strom GuD	Reg.	Erdgas	Erdgas inkl. Verbr.
KEA	kWh/kWh	3,07	2,02	1,23	1,10	1,10
CO ₂	g/kWh	625,7	392,3	32,2	14,7	213,3
CO ₂ -Äq.	g/kWh	661,9	420,9	33,4	37,5	238,5
SO ₂	g/kWh	0,38	0,01	0,07	0,01	0,01
NO _x	g/kWh	0,65	0,69	0,01	0,07	0,30
CO	g/kWh	0,22	0,38	0,05	0,05	0,79
CH ₄	g/kWh	1,39	1,10	0,05	1,07	1,11

3 Studie 2 „Untersuchung von Praxisdaten zum Primärenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen“

3.1 Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Wärmepumpenanlagen

Datensammlung

Es wurde eine umfangreiche Sammlung von Messdaten zum energetischen Verhalten von Wärmepumpenanlagen durchgeführt.

In Tabelle 3 sind die Mittelwerte der gemessenen Jahresarbeitszahlen ausgeführter Wärmepumpenanlagen für verschiedene Wärmequellen und Wärmeverteilssysteme dargestellt. Dabei wurden Systeme mit Vorlauftemperaturen bis maximal 40°C im Auslegungszustand und Systeme mit höheren Vorlauftemperaturen von maximal 55°C jeweils zusammengefasst. Insgesamt 79 Anlagen sind in der Tabelle eingetragen.

Tabelle 3: Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Wärmepumpenanlagen – 1990 bis 1998

	Vorlauf- temperatur	Anzahl	Jahresarbeitszahl		
			Minimum	Mittel	Maximum
Wasser/Wasser	max. 40°C	13	3,5	4,17	4,7
	max. 55°C	-	-	-	-
Erdreich/Wasser	max. 40°C	49	3,0	3,72	4,8
	max. 55°C	6	2,6	3,07	3,5
Luft/Wasser[#]	max. 40°C	7	2,8	3,15	3,5
	max. 55°C	13	3,5	4,17	4,7

[#] auch Luft/Luft

Die dargestellten Jahresarbeitszahlen beziehen sich auf die Wärmepumpenanlage, d.h. inklusive Verdichter, Sole- bzw. Wasserpumpe und Lüfter, aber ohne Berücksichtigung der Wärmeverteilung und der Warmwasserbereitung. Für vereinzelte An-

lagen ist die Jahresarbeitszahl inklusive der Heizungspumpe bzw. der Warmwasserbereitung angegeben worden. Für die Auswertung wurden die Messdaten korrigiert.

Alle in der Tabelle 3 angegebenen Wärmepumpenanlagen werden monovalent oder monoenergetisch betrieben bis auf 4 bivalente Luft/Wasser-Anlagen, drei aus der Gruppe bis 55°C Vorlauftemperatur, eine aus der Gruppe bis 40°C Vorlauftemperatur.

Auswertung

Die Anzahl der Anlagen zeigt, dass überwiegend Systeme mit einer Niedertemperaturverteilungssystem gesammelt werden konnten. Im Normalfall ist dies eine Fußbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 35°C und einer Rücklauftemperatur von 30°C im Auslegungspunkt. Systeme mit höheren Vorlauftemperaturen von mehr als 40°C sind nur selten vertreten (6 für Erdreich/Wasser, 4 für Luft/Wasser bzw. Luft/Luft).

Im weiteren soll nun der Einfluss der Inbetriebnahme der Wärmepumpenanlagen und damit des Entwicklungsstandes untersucht werden. Dazu werden die Daten in Tabelle 4 für die Jahre 1990 bis 1994, in Tabelle 5 für die Jahre 1995 bis 1998 eingetragen. Ein Vergleich zeigt, dass die gemessenen Jahresarbeitszahlen deutlich ansteigen. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass die Anzahl von gemessenen Wärmepumpenanlagen in den einzelnen Bereichen außer für Erdreich/Wasser mit Niedertemperatur-Wärmeverteilung sehr gering ist und sich nicht für weitere detailliertere Analysen eignet. Daher wurden die weiteren Analysen für Erdreich/Wasser-Systemen mit maximalen Vorlauftemperaturen im Auslegungszustand bis 40°C fortgesetzt.

Tabelle 4: Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Wärmepumpenanlagen – 1990 bis 1994

	Vorlauf- temperatur	Anzahl	Jahresarbeitszahl		
			Minimum	Mittel	Maximum
Wasser/Wasser	max. 40°C	4	3,5	3,84	4,3
	max. 55°C	-	-	-	-
Erdreich/Wasser	max. 40°C	25	3,0	3,62	4,3
	max. 55°C	4	2,6	2,94	3,4
Luft/Wasser[#]	max. 40°C	4	2,8	3,03	3,2
	max. 55°C	4	2,5	2,67	3,0

auch Luft/Luft

Tabelle 5: Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Wärmepumpenanlagen – 1995 bis 1998

	Vorlauf- temperatur	Anzahl	Jahresarbeitszahl		
			Minimum	Mittel	Maximum
Wasser/Wasser	max. 40°C	9	4,1	4,32	4,7
	max. 55°C	-	-	-	-
Erdreich/Wasser	max. 40°C	25	3,1	3,82	4,8
	max. 55°C	2	3,2	3,33	3,5
Luft/Wasser [#]	max. 40°C	4	3,2	3,32	3,5
	max. 55°C	-	-	-	-

auch Luft/Luft

Für Erdreich/Wasser-Systeme mit Niedertemperatur-Wärmeverteilung ist nun in Abbildung 4 die gemessenen Jahresarbeitszahlen in Abhängigkeit von dem Datum der Inbetriebnahme dargestellt. Neben dem Mittelwert ist auch die Anzahl der Wärmepumpenanlagen pro Jahr angegeben. Stehen nur wenige Anlagen zur Auswertung zur Verfügung, ist deren statistische Aussagekraft gering. Speziell für 1990, 1991 und 1993 müssen die Ergebnisse daher mit entsprechenden Einschränkungen eingestuft werden. Aus diesem Grunde wurde für 1997, wo die Daten von nur einer Wärmepumpenanlage vorliegen, auf eine Eintragung in Abbildung 4 verzichtet.

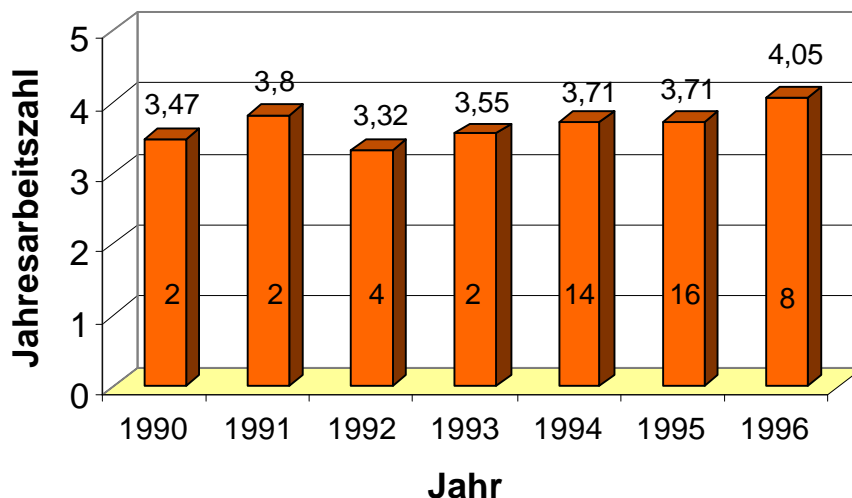


Abbildung 4: Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Erdreich/Wasser-Wärmepumpenanlagen mit max. 40°C-Wärmeverteilung

Insgesamt kann festgehalten werden, dass seit 1992 die Jahresarbeitszahlen, entsprechend den Messdaten, signifikant zugenommen haben und für das letzte noch auswertbare Jahr 1996 einen Wert von 4,05 erreicht haben.

Aufgrund des Ozonschädigungspotenzial von R22 kamen in den letzten Jahren neben R22 verschiedene Ersatzkältemittel wie Propan (R290), Propen (R1270), R134a und R407C zum Einsatz. In Abbildung 5 ist die Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl

vom verwendeten Kältemittel dargestellt. Außerdem ist auch das durchschnittliche Datum der Inbetriebnahme angegeben.

Es ist zu erkennen, dass die R22-Anlagen die niedrigsten Jahresarbeitszahlen aufweisen, aber gleichzeitig auch am ältesten sind, so dass die Ursache der niedrigen Jahresarbeitszahlen nicht unbedingt im verwendeten Kältemittel, sondern auch in der technischen Weiterentwicklung begründet sein können.

Die Propan- und Propen-Anlagen sind im Durchschnitt gleich alt, mit Propan werden, wie die Abbildung 5 zeigt, etwas bessere Jahresarbeitszahlen erreicht. Da aber nur 5 Propan-Anlagen zur Verfügung standen, ist die statistische Sicherheit dieser Aussage nicht besonders hoch.

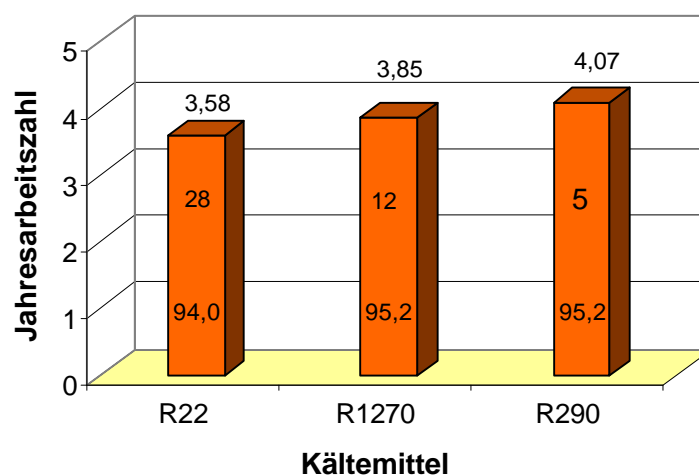


Abbildung 5: Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Erdreich/Wasser-Wärmepumpenanlagen mit max. 40°C-Wärmeverteilung

Außerdem wurde mit dem vorhandenen Datenmaterial der Einfluss der Betriebsweise untersucht. Es liegen Messdaten zu monovalenten und monoenergetischen Systemen vor. Die Zusatzheizung von monoenergetischen Systemen wird vorwiegend zum Trockenheizen von Neubauten und zum gelegentlichen Anheizen eingesetzt. In Abbildung 6 sind die gemessenen Jahresarbeitszahlen dieser Systeme dargestellt. Die Mittelwerte sind nahezu gleich groß, ein Einfluss ist daher nicht signifikant, zumal wenn zusätzlich berücksichtigt wird, dass es sich bei den die monoenergetischen Systeme um modernere Anlagen handelt.

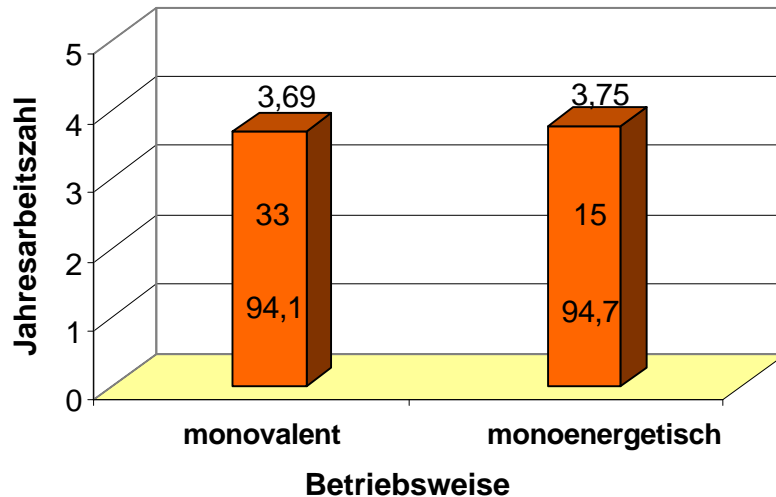


Abbildung 6: Gemessene Jahresarbeitszahlen ausgeführter Erdreich/Wasser-Wärmepumpenanlagen mit max. 40°C-Wärmeverteilung

3.2 Festlegung von Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpenanlagen für die weiteren Berechnungen

Elektrisch angetriebene Wärmepumpen

Die Werte der gemessenen Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpenanlagen dienen als Grundlage für die Berechnungen. Die sich ergebenden Werte sind in Tabelle 6 dargestellt. Dabei wurden insbesondere die Werte aus

Tabelle 5 für die Jahre 1995 bis 1998 verwendet, da sie am besten den aktuellen Stand der Wärmepumpentechnik widerspiegeln. Die dargestellten Jahresarbeitszahlen berücksichtigen die gesamte Wärmepumpenanlage ohne Wärmeverteilung und Warmwasserbereitung.

Tabelle 6: Festgelegte Jahresarbeitszahlen von elektrisch angetriebenen Wärmepumpenanlagen für die Berechnungen

	Wärmevert.-System	Jahresarbeitszahl
Wasser/Wasser	35°C/30°C	4,3
	55°C/45°C	3,8
Erdreich/Wasser	35°C/30°C	3,8
	55°C/45°C	3,3
Luft/Wasser	35°C/30°C	3,3
	55°C/45°C	2,8

Es wird entsprechend der Auswertung der Messdaten der Wärmepumpenanlagen und weiteren Angaben aus der Literatur (ausführlich in [3] beschrieben) davon aus-

gegangen, dass der Übergang von einem Wärmeverteilsystem 35°C/30°C auf 55°C/45°C zu einer Absenkung der Jahresarbeitszahl von ca. 0,5 führt.

Es muss angemerkt werden, dass die Werte in Tabelle 5 bzw. Tabelle 6 den Stand der Technik ausgeführter Wärmepumpenanlagen wiedergibt, die zwischen 1995 und 1998 in Betrieb gegangen sind, der Mittelwert der Inbetriebnahme liegt im Januar 1996.

Gasbetriebene Wärmepumpen

Für gasbetriebene Wärmepumpenanlagen stehen jeweils nur Messdaten zu einer Anlage zur Verfügung. Für eine Gasmotor-Wärmepumpenanlage konnte ein Jahresheizzahl von 1,56 bestimmt werden. Für eine Gas-Absorptions-Wärmepumpenanlage konnte eine Heizzahl von 1,37 bestimmt werden. Es wurde auf Basis dieser Daten eine Jahresarbeitszahl von 1,6 und 1,3 für die Berechnungen abgeschätzt, die mit Werten aus der Literatur abgeglichen wurden. Die Werte gelten für alle Vorlauftemperaturen der Wärmeverteilung bis 55°C. Um detaillierte Aussagen zu machen, müssten für zukünftige Betrachtungen eine höhere Anzahl an Messdaten zur Verfügung stehen.

3.3 Jahresnutzungsgraden von Gasbrennwertkesseln

Messdaten zu ausgeführten Gasbrennwertanlagen standen nicht zur Verfügung. Eine Auswertung von theoretischen Studien ergab, dass für eine Wärmeverteilung von 35/30°C und ohne Warmwasserbereitung ein Jahresnutzungsgrad von 104% angesetzt werden kann (für 55/45°C 102%), wobei dieser Wert schon in der Nähe des theoretischen Optimums von 111% für verbrennungsgestützte Nutzung von Erdgas liegt. Daher sollte dieser Wert für zukünftige Betrachtungen durch Messdaten abgestützt werden.

Für Ölkessel wird gemäß des GEMIS- und des VDEW-GEMIS-Datensatz ein Jahresnutzungsgrad von 85% angenommen.

3.4 Vergleich von Wärmepumpen- mit Gasbrennwert-Heizungsanlagen

Mit den oben genannten Kennwerten werden Variantenrechnungen zum kumulierten Energieaufwand (KEA) und zu den Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) durchgeführt. Die in den Diagrammen verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 7 beschrieben. Als Endenergie für elektrische Wärmepumpenanlagen wird Strom der öffentlichen Versorgung, Strom aus einem GuD-Kraftwerk und Strom aus regenerativen Quellen verwendet.

Tabelle 7: Untersuchte Heizungsanlagen

Abkürzung	Heizungsanlage
Öl-Hzg	Öl-Heizungsanlage (85%)
Gas-BW	Gasbrennwert-Heizungsanlage (104%/102%)
EI-WP-L	Elektro-Luft/Wasser-Wärmepumpen-HA (3.3/2.8)
EI-WP-E	Elektro-Erdreich/Wasser-Wärmepumpen-HA (3.8/3.3)
EI-WP-W	Elektro-Wasser/Wasser-Wärmepumpen-HA (4.3/3.8)
Gas-WP-A	Gas-Absorptions-Wärmepumpen-Heizungsanlage (130%)
Gas-WP-M	Gasmotor-Wärmepumpen-Heizungsanlage (160%)
Solar/Gas	Solarkollektor/Gasbrennwert-Heizungsanlage (Verteilung 25%/75%)

Strom der öffentlichen Versorgung

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse von Berechnungen des KEA für verschiedene Heizsysteme dargestellt. Die Werte gelten für ein 35°C/30°C Wärmeverteilungssystem und Strom der öffentlichen Versorgung. Wie oben erläutert, sind für Gas-Absorptions- (Gas-WP-A) und Gasmotor-Wärmepumpen-Heizungsanlagen (Gas-WP-M) keine expliziten Vorlauftemperaturen festgesetzt worden und gelten daher auch für 55°C/35°C-Systeme. Die Werte beinhalten alle notwendigen Primärenergien auch für Heizungspumpe und Regelung.

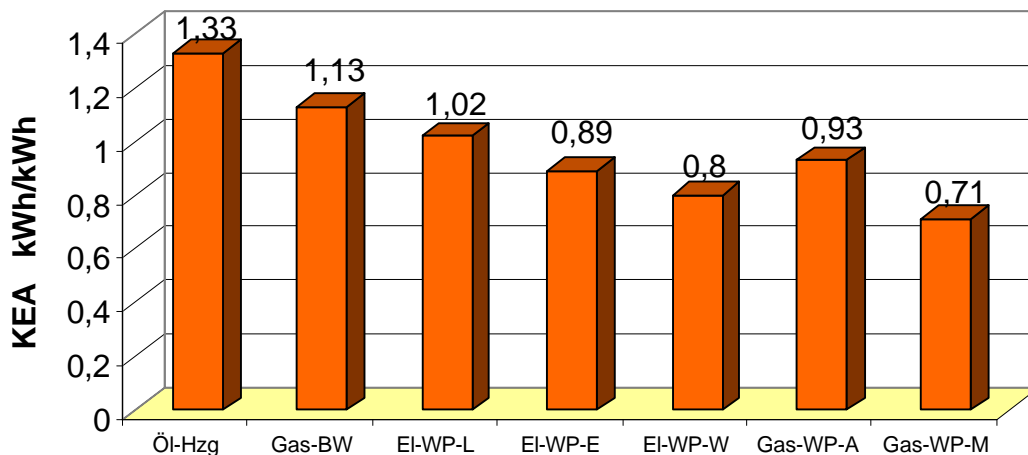


Abbildung 7: KEA von untersuchten Heizungsanlagen, 35°C/30°C Wärmeverteilungssystem, Strom der öffentlichen Versorgung

Das Referenzsystem ist eine Gasbrennwert-Heizungsanlage, das den höchsten technischen Stand konventioneller, mit fossilen Brennstoffen angetriebener Hei-

zungsanlagen darstellt. Zum Vergleich für Gebiete wo keine Gasversorgung vorhanden ist, ist außerdem ist eine Ölheizungsanlage aufgenommen.

Alle Wärmepumpensysteme bieten deutliche Einsparungen von Primärenergie gegenüber dem Referenzsystem. Zur Zeit sind Erdreich/Wasser-Wärmepumpenanlagen im Neubaubereich am verbreitetsten, sie führen zu einer Absenkung von benötigter Primärenergie von 21 %. Im privaten Hausbereich sind Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlagen energetisch am besten mit einer Absenkung von 29 %. Noch besser schneidet die Gasmotor-Wärmepumpen-Heizungsanlage mit einer Einsparung von 37 % ab, diese Systeme werden allerdings bisher nur für Mehrfamilienhäuser angeboten. Die Einsparungen gegenüber der Ölheizung liegen noch höher mit 33%, 40% und 47%.

In Abbildung 8 ist nun das CO₂-Äquivalent dargestellt. Die Verminderungen des CO₂-Äquivalentes entsprechen den Einsparungen von Primärenergie. Es werden bei Erdreich/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlagen 22% bewertete CO₂-Emissionen gegenüber dem Referenzsystem vermieden, bei Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlagen 30 % und bei Gasmotor-Wärmepumpen-Heizungsanlagen 36 %. Gegenüber der Ölheizung sind die Verminderungen des CO₂-Äquivalentes noch höher als die Einsparungen an Primärenergie mit 46%, 52% und 56%.

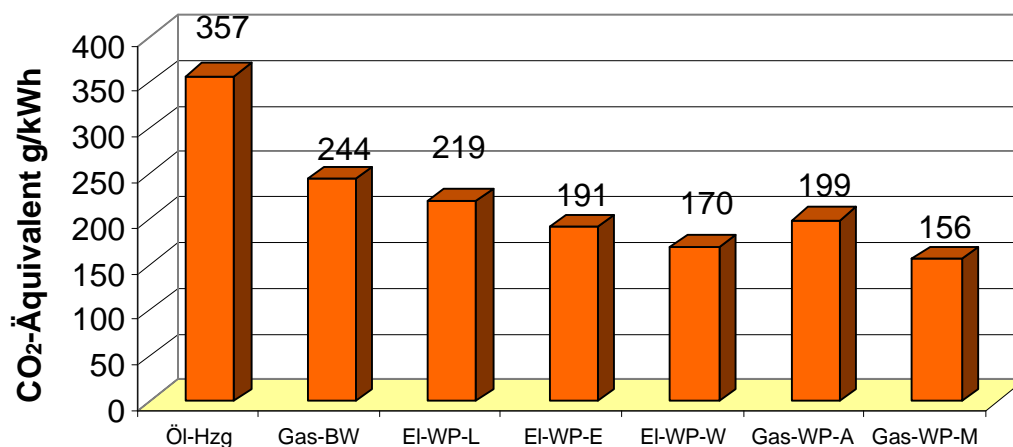


Abbildung 8: CO₂-Äquivalent von untersuchten Heizungsanlagen, 35°C/30°C Wärmeverteilungssystem, Strom der öffentlichen Versorgung

In der Abbildung 9 und Abbildung 10 folgen die entsprechenden Ergebnisse der Berechnungen mit einem 55°C/45°C-Wärmeverteilungssystem. Für diese Systeme mit höheren Vorlauftemperaturen sind die erzielbaren Einsparungen an Primärenergie und die Vermeidung von bewerteten CO₂-Emissionen geringer. Für Erdreich/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlagen wird noch eine Senkung benötigter Primärenergie gegenüber der Gasbrennwert-Heizung von 12 % erreicht, für Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlagen von 22 %. Für Luft/Wasser-Heizungsanlagen wurde eine Steigerung von 2,6 % berechnet, so dass im Rahmen der Rechengenauig-

keit festgestellt werden kann, dass selbst unter diesen für die Wärmepumpentechnik ungünstigsten Rahmenbedingungen, Wärmepumpen-Heizungsanlagen noch gleichwertig zu den besten konventionellen Heizungsanlagen sind. Gas-Absorptions-Wärmepumpen-Heizungsanlagen und Gasmotor-Wärmepumpen-Heizungsanlagen bieten nahezu die gleichen, hohen Einsparungen, wie es schon für 35°C/30°C Wärmeverteilsysteme dokumentiert wurde. Entsprechend den Einsparungen an Primärenergie ergeben sich auch die Minderungen des CO₂-Äquivalentes.

Die Einsparungen der Wärmepumpenanlagen gegenüber der Ölheizung sind wiederum höher als gegenüber der Gasbrennwert-Heizung, so dass bei diesen Bedingungen auch die Luft/Wasser-Wärmepumpe noch zu einer Einsparung von Primärenergie von 11% und zu Verminderungen des CO₂-Äquivalentes von 29% führt.

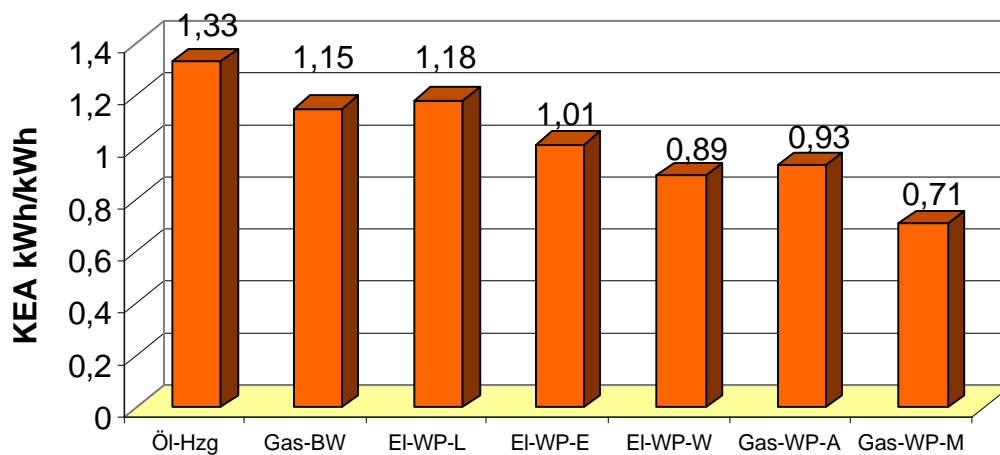


Abbildung 9: KEA von untersuchten Heizungsanlagen, 55°C/45°C Wärmeverteilungssystem, Strom der öffentlichen Versorgung

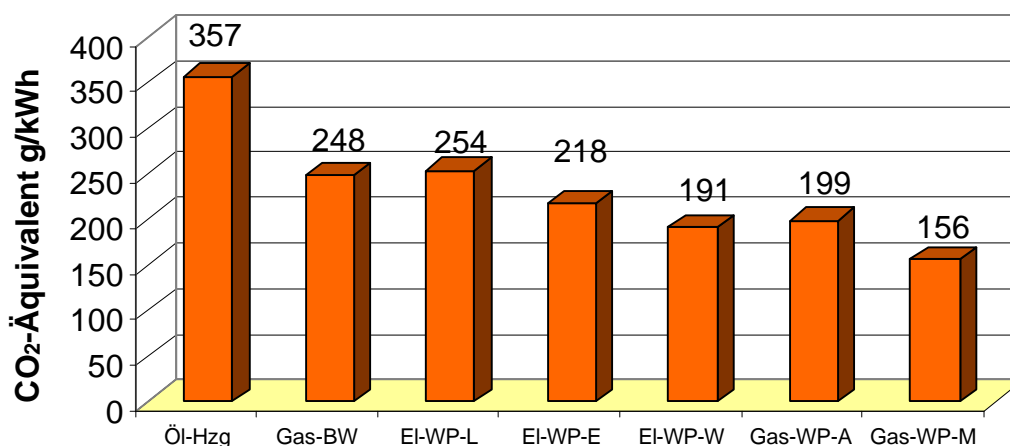


Abbildung 10: CO₂-Äquivalent von untersuchten Heizungsanlagen, 55°C/45°C Wärmeverteilungssystem, Strom der öffentlichen Versorgung

Vorkette Strom aus einem GuD-Kraftwerk

In der Abbildung 11 bis Abbildung 14 sind nun die entsprechenden Ergebnisse der Berechnungen mit Strom aus einem GuD-Kraftwerk als Antriebsenergie für Wärmepumpen dargestellt. Bei diesem Vergleich kann die Frage beantwortet werden, mit welchem System Erdgas am besten zur Gebäudebeheizung eingesetzt werden kann. Selbst mit den Annahmen einer 55°C/45°C Wärmeverteilung und Luft als Wärmequelle kann eine Wärmepumpen-Heizungsanlage gegenüber einer Gasbrennwert-Heizungsanlage noch 30 % an Primärenergie einsparen. Im günstigsten Fall, Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlage mit 35°C/30°C Wärmeverteilung, werden 51 % an Primärenergie eingespart - Abbildung 11. Gasangetriebene Wärmepumpen-Heizungsanlagen erweisen sich bei diesem Szenario gegenüber Elektro-Wärmepumpen-Heizungsanlagen als nicht so effizient, da der hohe Stromwirkungsgrad von 58 % bei einem GuD-Kraftwerk nicht annähernd von einem Gasmotor erreicht wird.

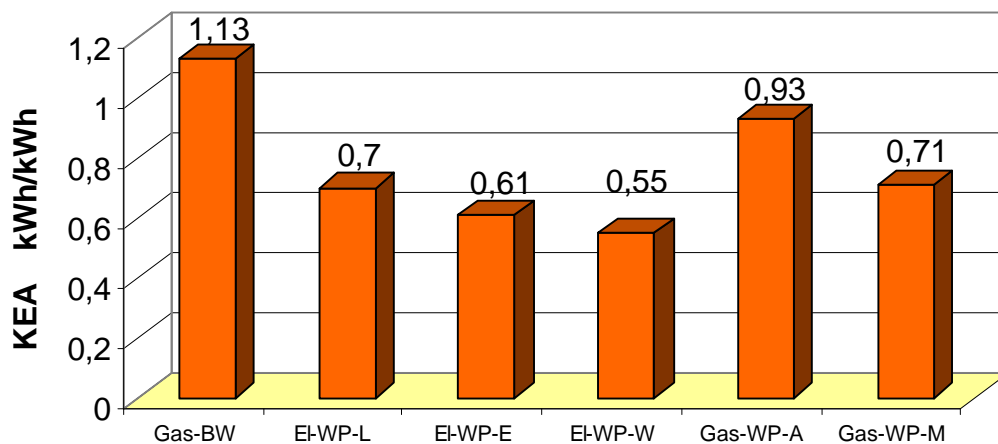


Abbildung 11: KEA von untersuchten Heizungsanlagen, 35°C/30°C Wärmeverteilungssystem, Strom aus einem GuD-Kraftwerk

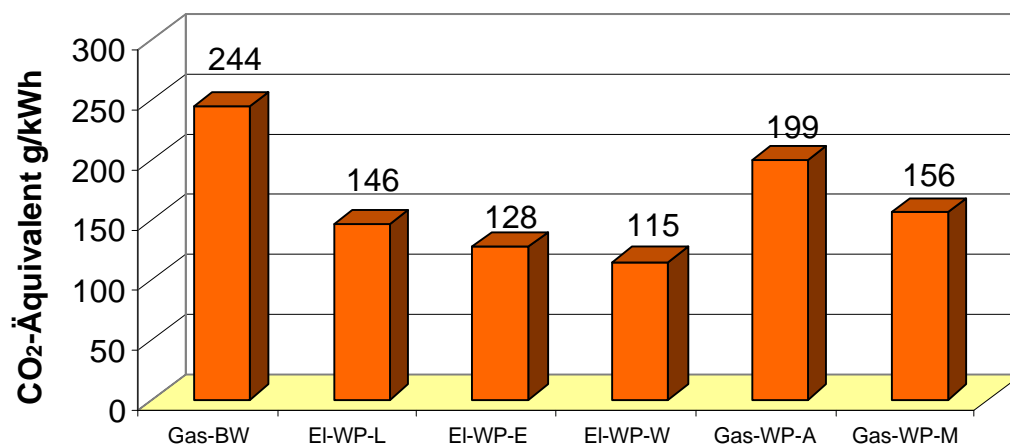


Abbildung 12: CO₂-Äquivalent von untersuchten Heizungsanlagen, 35°C/30°C Wärmeverteilungssystem, Strom aus einem GuD-Kraftwerk

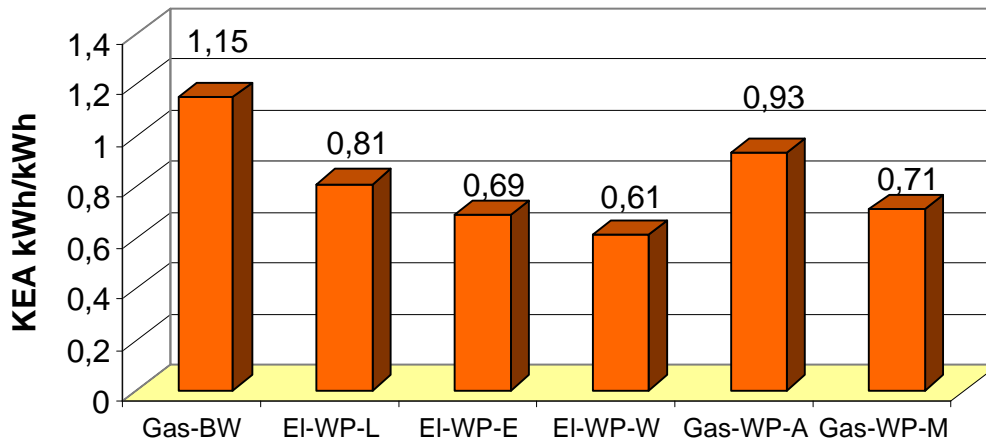


Abbildung 13: KEA von untersuchten Heizungsanlagen, 55°C/45°C Wärmeverteilungssystem, Strom aus einem GuD-Kraftwerk

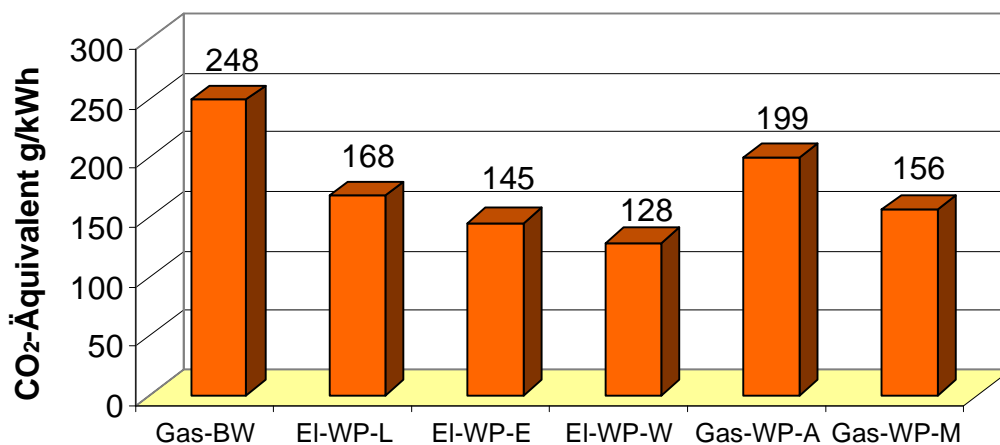


Abbildung 14: CO₂-Äquivalent von untersuchten Heizungsanlagen, 55°C/45°C Wärmeverteilungssystem, Strom aus einem GuD-Kraftwerk

Strom aus regenerativen Quellen

Legt man die aktuelle Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie – BMWi zugrunde, die den Einsatz von regenerativem Strom voraussetzen, sinken die CO₂-Emissionen auf nahezu 0, lediglich geringe Verluste in den Vorketten und die Materialbereitstellung für die Wärmepumpenanlage sind noch zu berücksichtigen, wie Abbildung 15 zeigt. Im einzelnen werden noch 13 bis 16 g pro kWh Nutzwärme an auf CO₂ bewerteten Treibhausgasen emittiert in Abhängigkeit von der verwendeten Wärmequelle - Luft, Wasser oder Erdreich. Damit sinken die

Emissionen auf 4% der Ölheizung und auf 5-7% der Gasbrennwert-Heizung. Im Gegensatz dazu, emittiert die bivalente Solar/Gasbrennwert-Heizung immer noch 199 g CO₂-Äquivalent pro kWh Nutzwärme und damit 82% der Gasbrennwert-Heizung.

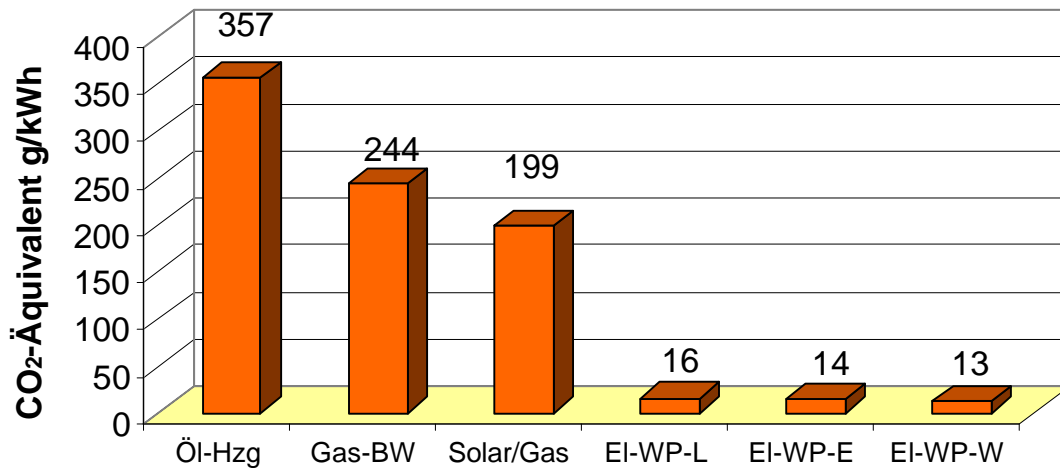


Abbildung 15: CO₂-Äquivalent von untersuchten Heizungsanlagen, 35°C/30°C Wärmeverteilungssystem, Strom aus regenerativen Quellen

4 Fazit und Ausblick

Für die Bundesrepublik Deutschland zeichnet sich in der Zukunft eine Änderung der Energiepolitik, und zwar im wesentlichen bedingt durch die Endlichkeit und Verteuerung fossiler Energiequellen und durch die mit deren Nutzung verbundene Belastung der Atmosphäre durch Treibhausgase.

Das Kyoto-Protokoll regelt die Emissionsminderung dieser Gase, unter ihnen vor allen Dingen das durch Verbrennung entstehende Kohlendioxid, mit 8 % für die Europäische Union, 7 % für die USA und 6 % für Japan. Deutschland selbst hat sich ein nationales Ziel einer Emissionsminderung von 25 % bis zum Jahre 2005 im Vergleich zum Jahr 1990 gestellt.

Selbst im ungünstigsten Fall einer Luft/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlage mit einer 55°C/45°C Wärmeverteilung und Strom der öffentlichen Versorgung als Antriebsenergie ist die Wärmepumpentechnik und die Gasbrennwerttechnik gleichwertig. Gegenüber der Ölheizung werden selbst unter diesen ungünstigsten Bedingungen noch Primärenergie von 11% eingespart und CO₂-Äquivalent-Emissionen von 29% vermieden.

Im häufigen Fall einer Erdreich/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlage mit einer 35°C/30°C Wärmeverteilung und Strom der öffentlichen Versorgung als Antriebsenergie kann 21 % an Primärenergie gegenüber der Gasbrennwert-Heizung eingespart werden.

Maximal können unter Zugrundelegen einer Wasser/Wasser-Wärmepumpen-Heizungsanlage mit einer 35°C/30°C Wärmeverteilung und Strom aus einem GuD-Kraftwerk als Antriebsenergie 51 % an Primärenergie eingespart werden. Dieses Szenario geht von der Grundannahme aus, dass für den Systemvergleich der gleiche Primärenergieträger Erdgas eingesetzt wird und damit nur noch die Unterschiede in der Effizienz der Systeme berücksichtigt wird.

Gasangetriebene Wärmepumpen-Heizungsanlagen weisen beachtliche Einsparpotentiale auf, die für Gasmotor-Wärmepumpen-Heizungsanlagen über denen von Elektro-Wärmepumpen-Heizungsanlagen liegen, wenn als Antriebsenergie Strom der öffentlichen Versorgung zugrundegelegt wird. Wird allerdings Strom aus einem GuD-Kraftwerk als Antriebsenergie für die Elektro-Wärmepumpen-Heizungsanlagen angenommen, sind die gasangetriebenen Wärmepumpensysteme nicht so effizient wie die Elektro-Wärmepumpensysteme, da der hohe Stromwirkungsgrad von 58 % bei einem GuD-Kraftwerk nicht annähernd von einem Gasmotor erreicht wird.

Diese Ausführungen zum Primärenergiebedarf lassen sich entsprechend auch auf die Reduzierung des CO₂-Äquivalentes übertragen.

So zeigen die Ergebnisse der Studien, dass Wärmepumpen in der Lage sind, ein wichtigen Beitrag zum Erreichen der Ziele der Bundesregierung im Bereich der Energieeinsparung und der Treibhausgasemissionsminderung zu leisten.

5 Literatur

1. Heidelck, R.; H. J. Laue: Aktualisierung der Basisdaten für den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor zur ganzheitlichen Bewertung verschiedener Heizungssysteme. Fachinformationszentrum Karlsruhe – IZW, April 1999, IZW-Bericht 1/99.
2. Heidelck, R.; H. J. Laue: Untersuchung von Praxisdaten zum Primärenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen von modernen Wärmepumpen. Fachinformationszentrum Karlsruhe – IZW, April 1999, IZW-Bericht 2/99.
3. Öko-Institut e.V., Gesamthochschule Kassel: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme v3.08. Erstellt im Auftrage des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, 1998.
4. Fichtner Development Engineering: VDEW-GEMIS Stammdatensatz 3.0. Erstellt im Auftrag der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke - VDEW - e.V., Frankfurt am Main, 1998.
5. VDEW e.V. (Hrsg.): Strommarkt Deutschland 1997, Die öffentliche Elektrizitätsversorgung. ISBN 3-8022-0559-6, Oktober 1998.