

# **Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung**

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. U. Wagner  
Dipl.-Ing. A. Held  
Dipl.-Ing. C. Heilek

München im April 2009

## Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	2
2	Begriffe, Rahmenbedingungen und Potentialannahmen.....	3
2.1	Begriffe.....	3
2.2	Festlegung der Rahmenbedingungen.....	4
3	Vergleiche von Wärmepumpe mit Referenzsystemen .....	6
3.1	Simulationsprogramm <i>ifeon</i> .....	6
3.2	Primärenergetischer und CO <sub>2</sub> -spezifischer Vergleich einer einzelnen Wärmepumpe mit Referenzsystemen anhand des Strommix .....	8
3.2.1	Verwendete Annahmen.....	8
3.2.2	Ergebnisse für das Jahr 2008 .....	9
3.2.3	Ergebnisse für das Jahr 2030 .....	12
3.3	Auswirkungen des Zubaus von 1 Mio. Wärmepumpen bis 2030 .....	15
3.3.1	Hintergründe.....	15
3.3.2	Annahmen .....	15
3.3.3	Szenario 1: Zukauf von CO <sub>2</sub> -Emissionsrechten .....	16
3.3.4	Szenario 2: Deckelung der CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	19
4	Fazit .....	20
5	Anhang.....	22
6	Literaturverzeichnis .....	25

## 1 Zielsetzung

Die Wärmepumpe erlebt in Deutschland im Augenblick einen in diesem Ausmaß noch nie zuvor erlebten Boom, der sich in über 60.000 verkauften Einheiten im Jahr 2008 widerspiegelt. Während die Wärmepumpe sich offensichtlich einer großen Beliebtheit bei Hausbesitzern erfreut, sorgt sie jedoch in Fachkreisen für ein geteiltes Echo.

Ziel der Studie ist es, einer breiten Öffentlichkeit nachvollziehbar die Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes der Wärmepumpe in Heizungssektor darzustellen. Dazu wird zunächst ein Technologievergleich durchgeführt, der die Wärmepumpe den derzeit gängigsten Raumwärmeerzeugern bezüglich des Primärenergieeinsatzes und der CO<sub>2</sub>-Emissionen unter aktuellen und zukünftigen Rahmenbedingungen gegenüberstellt.

Darüber hinaus sollen zwei Szenarien entwickelt werden, die bis 2030 den Zubau von 1 Mio. Wärmepumpen unterstellen. In einem Szenario sind die Kraftwerksbetreiber durch den Zukauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten berechtigt, bei der Stromerzeugung mehr CO<sub>2</sub> zu emittieren, welches wiederum den Wärmepumpen angerechnet wird. Im zweiten Szenario sollen die Auswirkungen ermittelt werden, die sich ergeben, wenn den Kraftwerksbetreibern diese Möglichkeit des Zertifikatszukaufs verwehrt bleibt und die Emissionen auf dem Ausgangswert ohne Wärmepumpen begrenzt bleiben.

## 2 Begriffe, Rahmenbedingungen und Potentialannahmen

### 2.1 Begriffe

#### Primärenergie

Als Primärenergie (PE) bezeichnet man den chemisch oder physikalisch gebundenen Energieinhalt eines Energieträgers oder einer regenerativen Energiequelle. Der Energieträger oder die Energiequelle ist dabei noch keiner Umwandlung unterzogen worden. Beispiele für Primärenergieträger sind Rohöl, Erdgas, aber auch Wind.

#### Endenergie

Als Endenergie (EE) wird der Energieinhalt von Energieträgern bezeichnet, der zur Bereitstellung der Nutzenergie beim Letztverbraucher umgesetzt wird. Zu den Endenergieträgern, die durch Umwandlung von Primärenergieträgern erzeugt werden, zählen beispielsweise Heizöl, Benzin, Holzpellets und Strom.

#### Nutzenergie

Als Nutzenergie werden alle technischen Formen der Energie bezeichnet, die von den Verbrauchern benötigt werden, wie zum Beispiel Licht, Wärme oder mechanische Energie.

#### Primärenergiefaktor

Der Primärenergiefaktor gibt das Verhältnis von eingesetzter Primärenergie zur bereitgestellten Endenergie wieder. Da auf dem Weg von der Primärenergie zur Endenergie in der Regel mehrere Umwandlungsschritte vollzogen werden müssen und jeder dieser Umwandlungsschritte mit Verlusten behaftet ist, ist der Primärenergiefaktor stets größer eins.

Für die Stromversorgung in Deutschland inklusive Vorketten und Verteilung ergibt sich aufgrund eigener Berechnungen derzeit ein Primärenergiefaktor von rund 2,7, der bis ins Jahr 2030 auf einen Wert von etwa 2,1 absinken dürfte.

#### Anlagenleistungszahl

Die Anlagenleistungszahl beschreibt das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung einer Wärmepumpe zu der von ihr aufgenommenen elektrischen Leistung (inkl. Hilfsaggregate).

$$\varepsilon_{Anl} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{el,ges}}$$

Die Leistungszahl einer Anlage ist abhängig von der Temperatur der Wärmequelle, der Temperatur der Wärmesenke und der Wärmepumpe selbst.

### Anlagen-Jahresarbeitszahl

Die Anlagen-Jahresarbeitszahl (JAZ) beschreibt das Verhältnis der abgegebenen Heizenergie einer Wärmepumpe zu der insgesamt dafür aufgewendeten Strommenge. Eine mittels Wärmepumpe betriebene Heizung, die eine JAZ von 4 besitzt, gibt also bei einem Strombezug von 2.500 kWh im Jahr 10.000 kWh Heizenergie ab.

$$\beta_{Anl} = \frac{Q_{ab}}{W_{el,ges}}$$

### CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommix

Die Emissionen des Strommix hängen von den eingesetzten Energieträgern, den Nutzungsgraden und den Ausnutzungsdauern der einzelnen Kraftwerke und zukünftig von der Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Lagerung ab. Die Berechnung der Emissionen erfolgt in dieser Studie mit Hilfe des am IfE entwickelten Simulationsprogramms *ifeon*.

### CO<sub>2</sub>-Zertifikat

Ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat berechtigt Industriebetriebe und Kraftwerksbetreiber, eine bestimmte Menge Emissionen zu verursachen. Die Anzahl der jährlich ausgegebenen Zertifikate wird schrittweise reduziert, wodurch ein Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen erzwungen wird. Der Handel der Zertifikate ermöglicht es, die CO<sub>2</sub>-Einsparungen dort zu realisieren, wo sie am günstigsten zu erzielen sind. Die Sektoren Verkehr und Haushalte nehmen nicht am CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel teil.

## 2.2 Festlegung der Rahmenbedingungen

### Wärmepumpen

Die Studie unterscheidet bei den Wärmepumpen nicht zwischen den möglichen Wärmequellen Luft, Wasser und Erdreich, sondern bewertet sie allein aufgrund ihrer Jahresarbeitszahl, wobei die Wärmepumpen im reinen Heizbetrieb zum Einsatz kommen.

### Referenztechnologien

Als Referenztechnologien werden mit Öl- und Gasheizungen die beiden konkurrierenden Energieträger betrachtet, die im Heizungssektor die größten Marktanteile besitzen. Beide gehen in Form eines modernen Brennwertkessels in die Analyse mit ein. Zusätzlich wird ein Vergleich mit sanierungsbedürftigen Ölkesseln angestellt, um einen Anhaltspunkt für die möglichen Einsparungen bei einem Technologiewechsel im Rahmen einer Heizungserneuerung zu erhalten.

## Referenzgebäude

Als für den Einsatz von Wärmepumpen zu Heizzwecken besonders geeignete Referenzgebäude werden in dieser Studie Einfamilienhäuser/Doppelhaushälften sowie kleinere Mehrfamilienhäuser zugrunde gelegt.

Für Einfamilienhäuser und Doppelhaushälften wurde eine durchschnittliche Fläche von 130 m<sup>2</sup> anhand des Statistischen Jahrbuchs [2] ermittelt. Für die Betrachtung von Mehrfamilienhäusern wird eine Fläche von 450 m<sup>2</sup> (6 Parteien a 75 m<sup>2</sup>) angenommen.

Der durch die Heizung zu deckende Wärmebedarf lehnt sich an die Studie „Strukturoptimierung in Ballungsgebieten“ [10] an. Ausgangspunkt der Studie sind reale Messwerte, wodurch neben baulichen Aspekten auch Nutzergewohnheiten einbezogen werden. Basierend auf der Studie wurde für Neubauten und energetisch sanierte Altbauten bis einschließlich 2020 ein Heizenergiebedarf von 86 kWh/(m<sup>2</sup>·a) und ab 2021 von 73 kWh/(m<sup>2</sup>·a) angenommen. Somit werden auch innere Energiegewinne durch Bewohner und elektrische Verbraucher sowie Verluste durch die Verteilung der Heizwärme berücksichtigt.

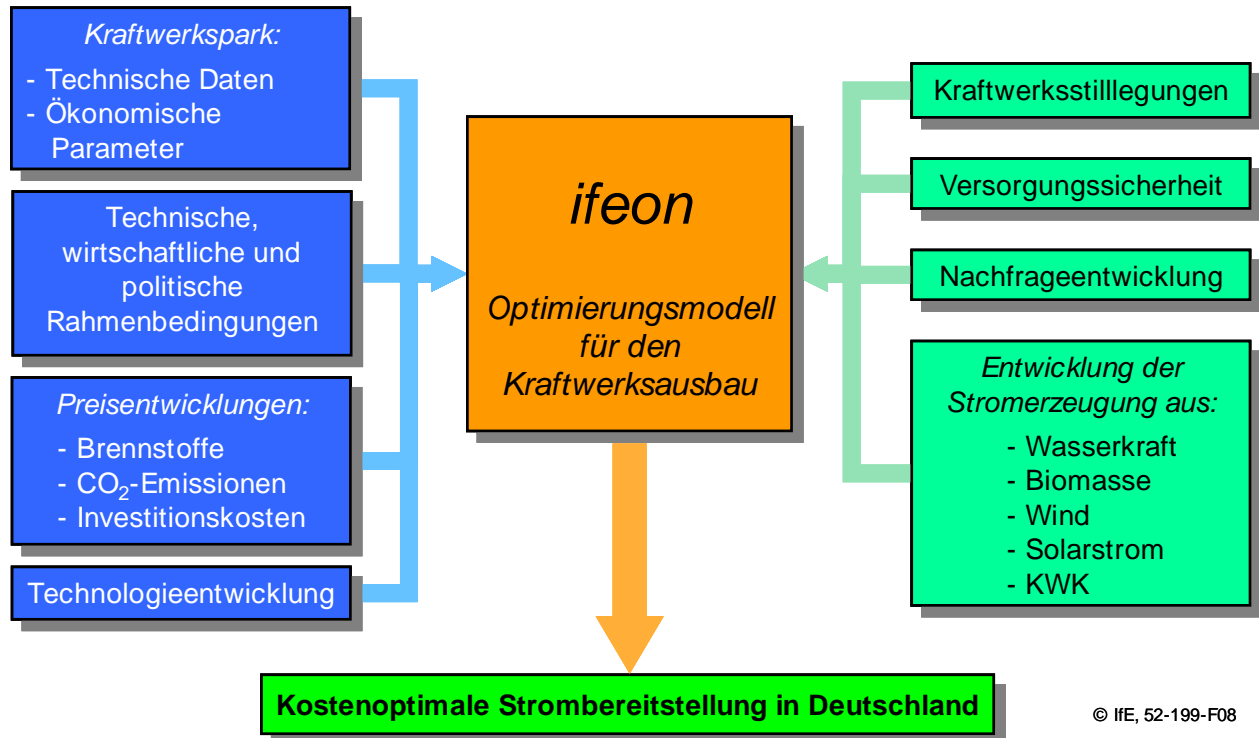
### 3 Vergleiche von Wärmepumpe mit Referenzsystemen

Im Folgenden soll die Wärmepumpe ausgewählten Referenzsystemen in Bezug auf die Aspekte Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emission gegenübergestellt werden. Die Berechnung des Primärenergieträgereinsatzes zur Strombereitstellung und der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerks-parks erfolgt durch das lehrstuhleigene Simulationsprogramm *ifeon*.

#### 3.1 Simulationsprogramm *ifeon*

Aufgabe des Optimierungsmodells *ifeon* ist es, den Zubau neuer thermischer Kraftwerksanlagen innerhalb eines Kraftwerksparks zu optimieren. Das Optimierungskriterium ist hier die Minimierung der diskontierten Ausgaben für die Strombereitstellung im Betrachtungszeitraum. Im volkswirtschaftlichen Sinn ist ein Optimum erreicht, wenn der benötigte Strom kostenminimal produziert wird. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist ein Ziel des freien Wettbewerbsmarktes, eine möglichst effiziente Strombereitstellung zu gewährleisten.

Das Modell *ifeon* basiert auf einem evolutionären Algorithmus, der die Investitions- und Betriebskosten der Stromerzeugung innerhalb des gesamten Betrachtungszeitraums minimiert. Eine Übersicht über die Eingangsgrößen in *ifeon* gibt **Abbildung 1**.



© IFE, 52-199-F08

Abbildung 1: Modellstruktur für das Optimierungsmodell *ifeon*

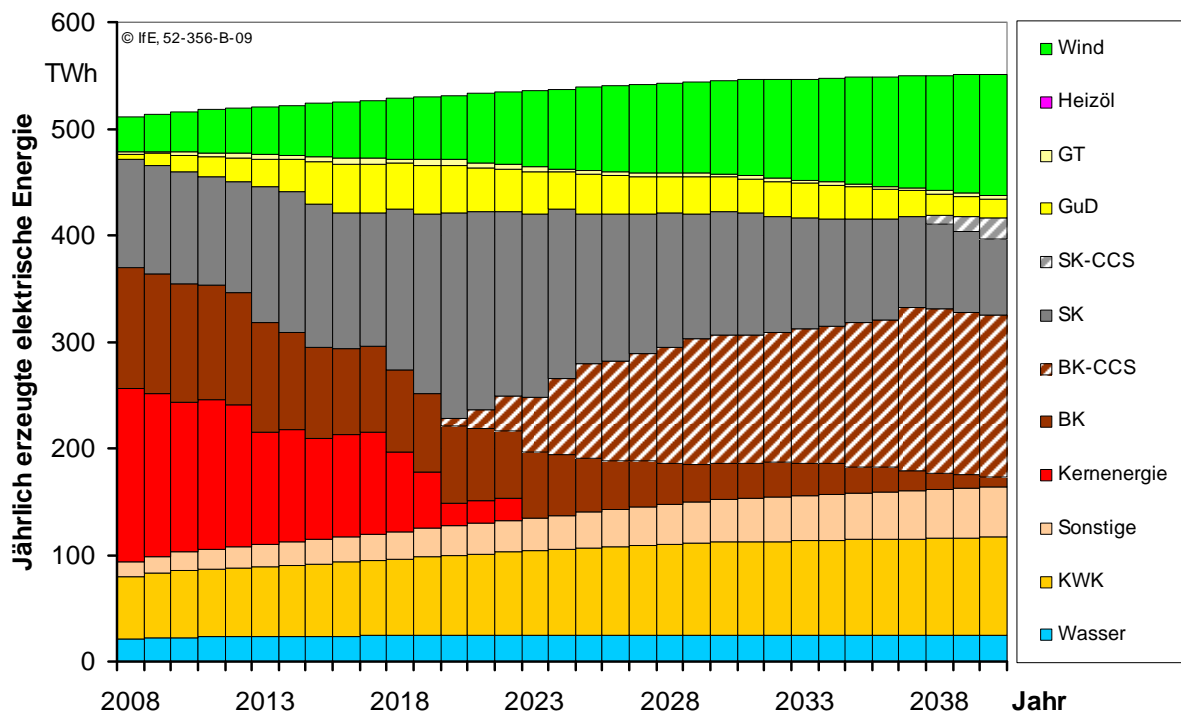
Der bestehende Kraftwerkspark wird mit seinen relevanten technischen und ökonomischen Parametern vorgegeben. In jedem einzelnen Jahr der Simulation ist der Zubau von Kraft-

werkskapazität aus einer festgelegten Auswahl an Kraftwerkstypen möglich. Die Höhe der mindestens zu bauenden Kraftwerkskapazität richtet sich nach der einzuhaltenden Versorgungssicherheit, welche auf dem heute in Deutschland erreichten Niveau bleibt.

Sowohl die technischen und ökonomischen Parameter der einzelnen Kraftwerkstypen als auch die möglichen Kraftwerkstechnologien können in jedem Jahr separat festgelegt werden. Damit ist z. B. gewährleistet, dass später gebaute Kraftwerke einen besseren Nennwirkungsgrad aufweisen als ältere [3].

Da zum einen mehr Kraftwerkskapazität gebaut werden kann, als für die Versorgungssicherheit notwendig ist, und zum anderen Kraftwerke in Langzeitkonservierung gehen können, ist gewährleistet, dass auch ein vorgezogener Neubau und eine vorgezogene Kraftwerkserneuerung möglich ist, wenn dies zu kostengünstigeren und effizienteren Lösungen führt. Dabei hat der CO<sub>2</sub>-Zertifikatshandel erheblichen Einfluss auf die Entwicklung der Erzeugungsstruktur.

**Abbildung 2** zeigt für das Referenzszenario (HP1 mit CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisvorgabe [3]) die Entwicklung der bereitgestellten elektrischen Energie der verschiedenen Kraftwerkstypen im Zeitraum von 2008 bis 2040.



**Abbildung 2: Jährlich erzeugte elektrische Energie im Referenzszenario**

Die Zusammensetzung des Stromerzeugungsmix ändert sich im Betrachtungszeitraum deutlich. Während im Jahr 2008 die Kernenergie noch einen Anteil von ca. 30 % beiträgt, geht deren Bedeutung aufgrund des Ausstiegsbeschlusses bis zu Jahr 2023 auf Null zurück. Koh-



lekraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung (CCS) stehen erst ab 2020 zur Verfügung. Der Emissionszertifikatshandel ermöglicht den wirtschaftlichen Betrieb dieser Kraftwerkstypen.

Die konventionelle Braunkohlenutzung geht zurück, während die Stromproduktion aus GuD-Anlagen deutlich zunimmt. Den bedeutendsten Anteil an der Stromerzeugung erhalten vorübergehend Steinkohlekraftwerke. Mit der zunehmenden Stromproduktion aus Braunkohle-CCS-Anlagen geht der Anteil der Steinkohle und des Erdgases wieder zurück.

Eine zusätzliche Stromnachfrage, wie z. B. durch Wärmepumpen, wird je nach Betrachtungsjahr von unterschiedlichen Kraftwerkstypen gedeckt. Das Jahr 2020 stellt hier einen kritischen Zeitpunkt dar, da der Kernenergieausstieg nahezu vollzogen ist und neue CO<sub>2</sub>-arme Technologien erstmals zur Verfügung stehen. Aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten wird für den Ausblick in dieser Studie erst das Jahr 2030 als Referenzjahr herangezogen.

### **3.2 Primärenergetischer und CO<sub>2</sub>-spezifischer Vergleich einer einzelnen Wärmepumpe mit Referenzsystemen anhand des Strommix**

Zunächst soll der Betrieb einer einzelnen Wärmepumpe mit dem Strommix 2008 und 2030 hinsichtlich der benötigten Primärenergie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden.

#### **3.2.1 Verwendete Annahmen**

Für die Referenztechnologien werden die folgenden Annahmen getroffen. Aufgrund der bereits ausgereiften Technologie von Brennwertkesseln wird nur von einer geringfügigen Verbesserung des Nutzungsgrades im Betrachtungszeitraum ausgegangen.

<b>Heizungssystem</b>	<b>Baujahr</b>	<b>Nutzungsgrad</b>
Ölkessel	1990	85 %
Gasbrennwertkessel	2008/30	95/97 %
Ölbrennwertkessel	2008/30	91/93 %

Die folgende Tabelle gibt die verwendeten Primärenergiefaktoren und die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Endenergieträger wieder [4][5].

Endenergieträger	PE-Faktor in kWh <sub>PE</sub> /kWh <sub>EE</sub>	spez. CO <sub>2</sub> - Emissionen in g/kWh <sub>EE</sub>
Heizöl	1,1	266
Erdgas	1,1	211

Zur Berücksichtigung der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen, die einschließlich der Bereitstellung der Endenergieträger anfallen, werden die Emissionen der Heizsysteme mit dem Primärenergiefaktor multipliziert.

Anfahr- und Teillastverluste von Kraftwerken wurden mit 2 %, Netzverluste bei der Stromverteilung mit 3 % angesetzt.

Der Wirkungsgrad von Kraftwärmekopplungsanlagen und Kernkraftwerken wurde mit der Substitutionsmethode bewertet.

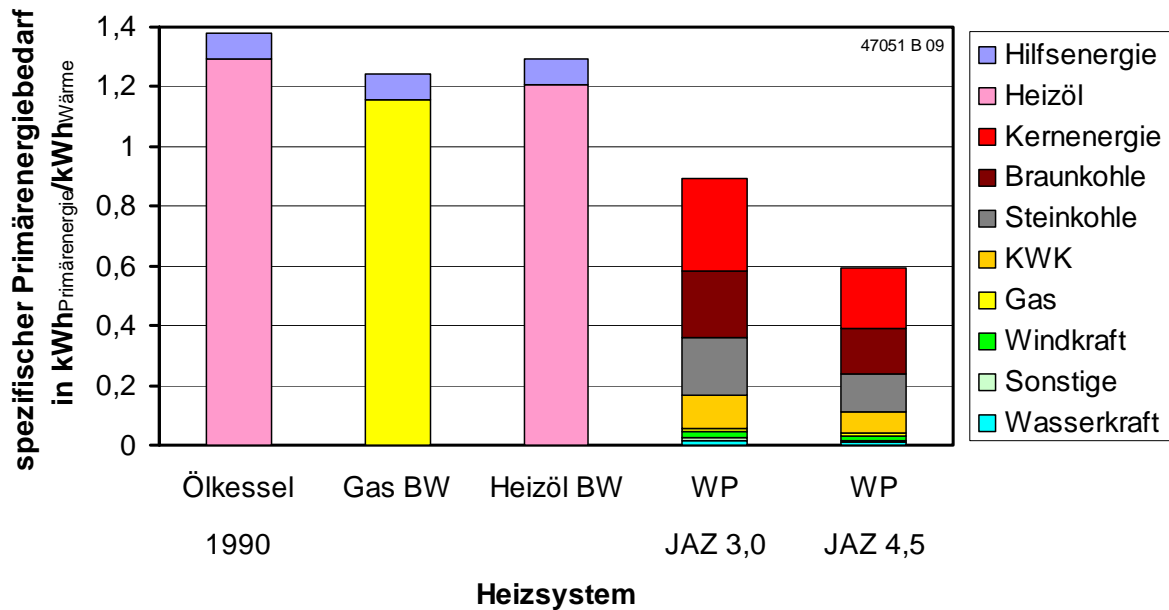
### 3.2.2 Ergebnisse für das Jahr 2008

#### Primärenergetischer Vergleich

Bei der Betrachtung des primärenergetischen Vergleichs für das Jahr 2008 in **Abbildung 3** sind, unter Vernachlässigung der Umweltenergie, die quasi unbegrenzt zur Verfügung steht, vor allem zwei Dinge auffallend: Zum einen wird durch den Einsatz von Wärmepumpen auch schon bei einer JAZ von 3,0 deutlich weniger Primärenergie pro kWh<sub>Wärme</sub> benötigt als bei den Referenzsystemen, zum anderen basiert im Gegensatz zu den Referenzsystemen die bei der Wärmepumpe eingesetzte Primärenergie auf einer Vielzahl von Primärenergieträgern.

Der Primärenergieverbrauch der auf Öl und Gas basierenden Heizsysteme ergibt sich vor allem durch den Nutzungsgrad des Heizsystems und der Bereitstellung des Energieträgers. Dazu addiert sich ein Anteil Hilfsenergie, bei dem es sich um Strom handelt. Obwohl zum Betrieb der Referenzsysteme relativ wenig Strom benötigt wird, fällt dieser Anteil bei der primärenergetischen Betrachtung dennoch ins Gewicht, da für die Erzeugung des Stromes verhältnismäßig viel Primärenergie eingesetzt werden muss.

Im Falle des Gasbrennwertkessels beträgt der Hilfsenergiebedarf 3,2 % der Nutzenergie. Bei primärenergetischer Bewertung erhöht sich der spezifische Primärenergiebedarf um rund 7,5 %.



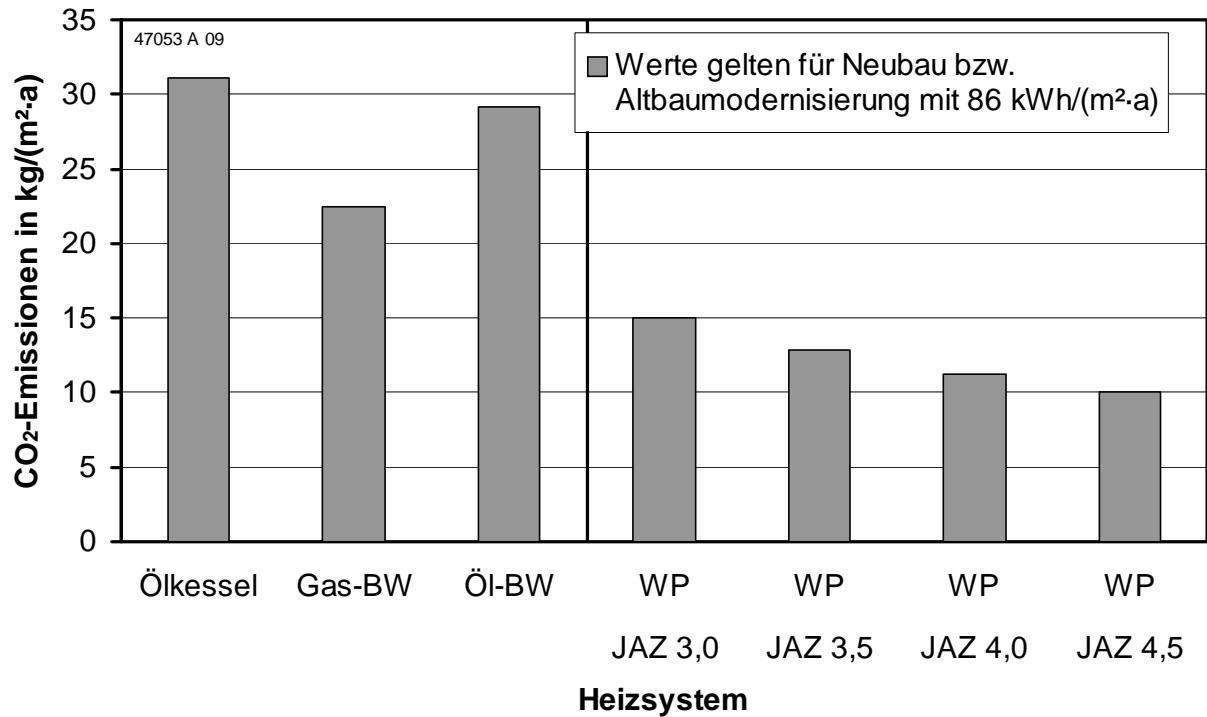
**Abbildung 3: Primärenergetischer Vergleich verschiedener Heizsysteme für den Strommix des Jahres 2008**

Dies ist auch der Grund, weshalb bei der Wärmepumpe, deren gesamter hier betrachteter Energieeinsatz aus Strom besteht, der Primärenergieeinsatz nicht noch deutlicher niedriger ist. Trotzdem ist es mit einer sehr guten Wärmepumpe (JAZ = 4,5 inklusive Hilfsenergie) schon heute möglich, den Primärenergieverbrauch im Vergleich zum besten Referenzsystem auf weniger als die Hälfte zu reduzieren. Bemerkenswert ist auch die Tatsache, dass durch die Wärmepumpe die Abhängigkeit von einem einzelnen Energieträger mit all ihren negativen Auswirkungen stark abnimmt. Der Anteil der erneuerbaren Energien Wasserkraft, Windkraft und sonstige liegt bei der primärenergetischen Betrachtung unterhalb ihres Anteils bei der Stromerzeugung, weil für sie per Definition ein Kraftwerksnutzungsgrad von 1 angenommen wird.

### Vergleich der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bewertet man die unterschiedlichen Heizsysteme anhand ihres CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, so ergibt sich ein ähnliches Bild. **Abbildung 4** zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Referenzgebäude pro Quadratmeter und Jahr. Der Unterschied zwischen einem auszutauschenden Ölkessel und einem Gasbrennwertkessel fällt hier deutlich ausgeprägter aus als bei der primärenergetischen Betrachtung. Nach Berechnungen von *ifeon* wurden im Jahr 2008 verbraucherseitig für eine Kilowattstunde Strom 523 g CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Dieser Wert setzt sich zusammen aus den direkten Emissionen bei der Stromerzeugung, den Emissionen der vorgelagerten Ketten und den Verlusten bei der Stromverteilung. Das Umweltbundesamt gibt für das Jahr 2005 in der Studie „Elektrische Wärmepumpe – eine erneuerbare Energie“ [12] einen Wert von 646 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Kilowattstunde an, was in etwa 617 g CO<sub>2</sub> bedeutet. Die Bestimmung von spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen unterliegt einigen Unsicherheiten und jährlichen Veränderungen, welche den um etwa 15 % geringeren Wert in dieser Studie erklären. Zum

einen ist der Ausbau der erneuerbaren Energien, v. a. im Bereich der Windenergie, bis 2008 deutlich vorangeschritten, zum anderen schwankt deren Stromerzeugung innerhalb einzelner Jahre z. T. erheblich. Darüber hinaus können längere ungeplante Stillstandzeiten großer Kraftwerksblöcke einen signifikanten Einfluss auf die spezifischen Emissionen ausüben. Trotz der hohen Emissionen bei der Stromerzeugung schneidet eine Wärmepumpe mit JAZ = 3 auch bei dieser Betrachtung sichtbar besser ab als ein Gasbrennwertkessel.



**Abbildung 4: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Referenzgebäude für verschiedene Heizsysteme inklusive elektrischem Hilfsverbrauch im Jahr 2008**

Den Zusammenhang zwischen Jahresarbeitszahl und CO<sub>2</sub>-Emissionen veranschaulicht **Abbildung 5**, in der die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wärmepumpe über der Jahresarbeitszahl dargestellt sind und mit den Referenzsystemen verglichen werden. Es zeigt sich, dass bei dem Strommix des Jahres 2008 Wärmepumpen ab einer Jahresarbeitszahl von etwa 2,0 allen anderen Systemen überlegen sind.

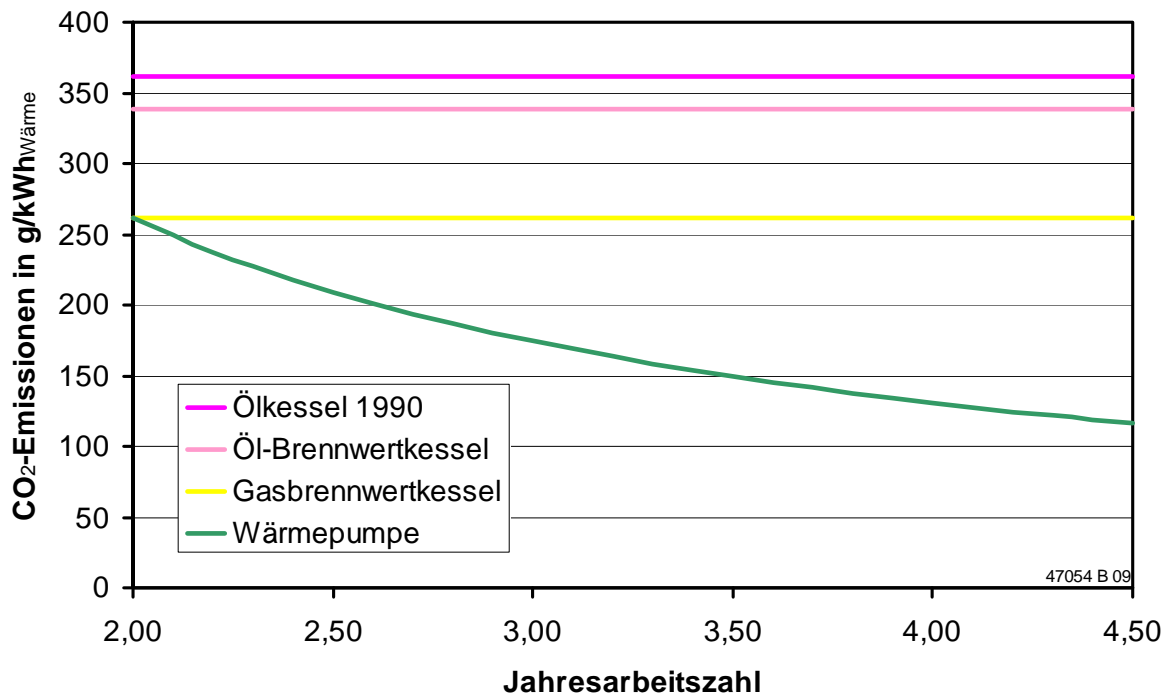


Abbildung 5: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlicher Heizsysteme für das Jahr 2008

### 3.2.3 Ergebnisse für das Jahr 2030

#### Primärenergetischer Vergleich

Im Jahr 2030 ergibt sich für die Referenzsysteme, bedingt durch ihre leicht gestiegenen Nutzungsgrade und die Verbesserungen im Kraftwerkspark, ein etwas gesunkener Primärenergiebedarf pro kWh<sub>Wärme</sub>, wie **Abbildung 6** zeigt. Größere Verbesserungen sind dagegen bei den Wärmepumpen zu erkennen, die bei gleichbleibender Jahresarbeitszahl allein der Stromerzeugung geschuldet sind. Sie sind zum einen eine Folge verbesserter Nutzungsgrade im konventionellen Kraftwerkspark und zum anderen auf die Zuwächse bei den erneuerbaren Energien mit ihrem Primärenergiefaktor = 1 zurückzuführen. Hervorzuheben ist darüber hinaus, dass der Ausstieg aus der Kernenergie in dieser Betrachtung abgeschlossen ist.

Die primärenergetischen Verbesserungen beim Einsatz der Wärmepumpe in Form eines geringeren Energieeinsatzes im konventionellen Kraftwerkspark und eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung machen deutlich, dass die Wärmepumpe über ihre Lebensdauer auch ohne Zutun des Betreibers kontinuierliche Verbesserungen ermöglicht. Im Gegensatz zu den Referenzsystemen kann dies realisiert werden, ohne auf Millionen von Einzelanlagen zugreifen zu müssen.

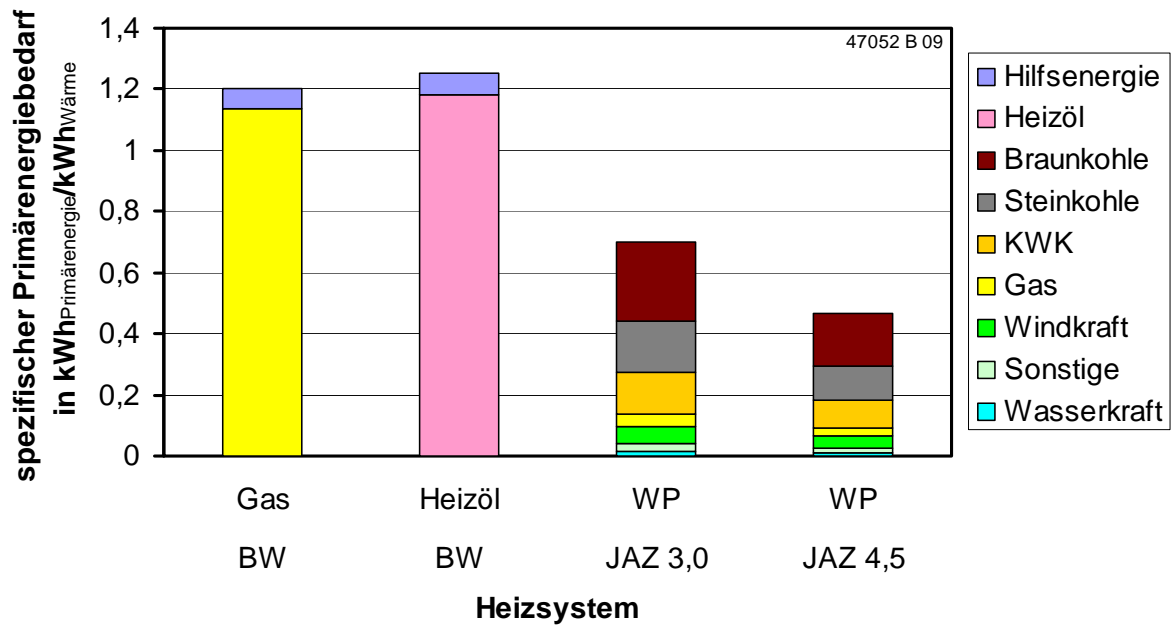


Abbildung 6: Primärenergetischer Vergleich verschiedener Heizsysteme für den Strommix des Jahres 2030

### Vergleich der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen

Deutlicher als die primärenergetischen Veränderungen fallen bei den Referenzsystemen die CO<sub>2</sub>-spezifischen Verbesserungen aus (siehe **Abbildung 7**). In erster Linie liegt dies an den Verbesserungen der Gebäude, die einen deutlich geringeren Energieeinsatz erfordern, als dies noch 2008 der Fall war, und dadurch einen Rückgang um 15 % verursachen. Infolgedessen gehen zum Beispiel die Emissionen bei Heizölbrennwertkesseln von 29,1 kg/(kWh·a) auf 24,7 kg/(kWh·a) zurück. Ursächlich für den zusätzlichen Rückgang um 1 kg/(kWh·a) sind zu etwa gleichen Teilen die Verbesserungen bei der Bereitstellung der elektrischen Hilfsenergie und die Steigerung des Nutzungsgrades, die jedoch in diesem Bereich aufgrund des bereits hohen Entwicklungsstandes der Technik nur gering ausfällt. Anteilsmäßig gelten diese Ergebnisse auch für Erdgasbrennwertkessel.

Das starke Absinken der spezifischen Emissionen der Wärmepumpen wird dagegen allein durch den Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommix hervorgerufen. Diese sinken durch die Erhöhung der Kraftwerksnutzungsgrade, die vermehrte Einspeisung von Strom aus regenerativen Energiequellen und die Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei konventionellen Kraftwerken ab dem Jahr 2020 auf 357 g/kWh<sub>Strom</sub>.

Dieser starke Rückgang führt dazu, dass die Wärmepumpe in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Emissionen praktisch unabhängig von ihrer Jahresarbeitszahl den Referenzsystemen überlegen ist. Schon bei einer Jahresarbeitszahl von gut 3,5 unterschreitet sie die Marke von 100 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>Wärme</sub> und verursacht damit nur noch ein Drittel der Emissionen eines Ölbrennwertkessels und etwa 40 % der Emissionen eines Gasbrennwertkessels. Den Verlauf der Emissionen in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl zeigt **Abbildung 8**.

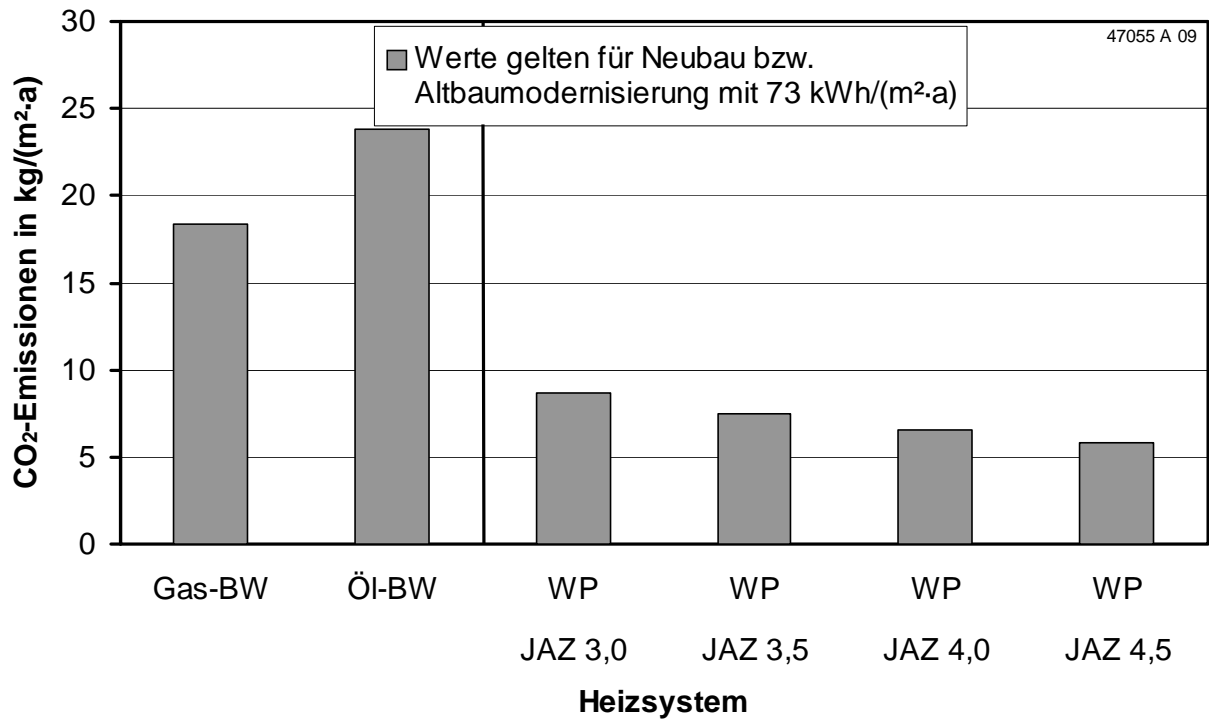


Abbildung 7: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Referenzgebäude für verschiedene Heizsysteme inklusive elektrischem Hilfsverbrauch im Jahr 2030

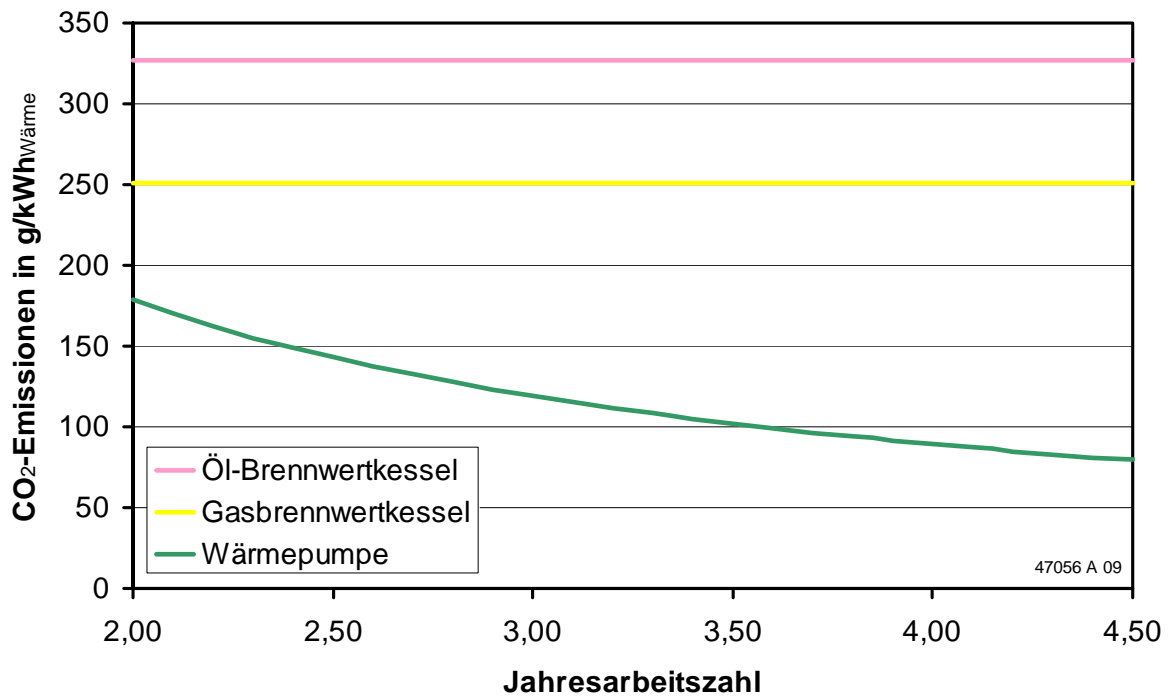


Abbildung 8: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlicher Heizsysteme für das Jahr 2030

### **3.3 Auswirkungen des Zubaus von 1 Mio. Wärmepumpen bis 2030**

Da es bei gleichbleibender Geschwindigkeit des derzeitigen Zubaus von Wärmepumpen in Zukunft zu signifikanten Auswirkungen auf dem Strommarkt kommt, werden diese im Weiteren genauer betrachtet. Dazu werden in den folgenden Szenarien zusätzliche Wärmepumpen installiert und die daraus resultierende Stromerzeugung jahresweise auf Stundenbasis simuliert. Infolge der Betrachtung der Veränderung der optimalen Stromerzeugungsstruktur aufgrund der zusätzlich installierten Wärmepumpen können die CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachergerecht diesen zugeordnet werden und somit ein Vergleich mit den Referenztechnologien erfolgen.

#### **3.3.1 Hintergründe**

Die in den Szenarien getroffenen Annahmen bezüglich des Zubaus an Wärmepumpen basieren auf den folgenden Hintergründen:

##### **Entwicklung des Bausektors in Deutschland**

Im Zeitraum von 2002 bis 2006 wurden in Deutschland im Schnitt jährlich 160.000 Wohneinheiten in Einfamilien- und Doppelhäusern fertiggestellt, deren mittlere Wohnfläche bei 130 m<sup>2</sup> lag. Daneben wurden pro Jahr gut 70.000 Wohneinheiten in größeren Gebäuden realisiert, die im Mittel knapp 80 m<sup>2</sup> Wohnfläche besitzen.

##### **Marktanteile der Wärmepumpe in Deutschland und in benachbarten Ländern**

In Deutschland gab es in den vergangenen Jahren einen enormen Anstieg bei den Wärmepumpenverkaufszahlen. Während 2003 noch unter 10.000 Einheiten verkauft wurden, so steigerte sich dieser Wert bis 2008 auf knapp 62.500 (zum Vergleich: Der Gesamtmarkt der Wärmeerzeuger in Deutschland belief sich 2007 auf 550.000 Stück [9]). Davon waren 28.000 Stück, also in etwa 45 %, Luft/Wasser-Wärmepumpen [8]. Dass diese Zahlen weder eine vorübergehende Erscheinung noch das Ende der Entwicklung darstellen müssen, zeigen die Beispiele Schweden und Schweiz. Bei Einfamilienhausneubauten erreichte die Wärmepumpe in Schweden bereits 2005 einen Marktanteil von 90 % [6], in der Schweiz 75 % im Jahr 2006 [7].

Der Markt zeigt, dass Wärmepumpen vorzugsweise in Ein- oder Zweifamilienhäusern installiert werden. Marktanalysen in Österreich belegen, dass dort von den 2006 installierten Wärmepumpen rund 87 % eine geringere Heizleistung als 20 kW aufweisen [7], was typisch für Ein- und Zweifamilienhäuser ist.

#### **3.3.2 Annahmen**

Aus den oben genannten Hintergründen wird für die Jahre von 2010 bis 2029 ein jährlicher Zubau von 50.000 Wärmepumpen angenommen. Bei diesem Wert ist berücksichtigt, dass ein Teil der verkauften Anlagen dem Austausch alter Wärmepumpen dient. Die Neuanlagen werden folgendermaßen aufgeteilt:



Gebäudetyp	Fläche pro Wärmepumpe [m <sup>2</sup> ]	Jährlich installierte Wärmepumpen	Heizenergiebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> -a)]	
			Installation bis 2020	Installation ab 2021
EFH/DHH	130	42.500	86	73
MFH	450	7.500	86	73

In folgender Tabelle sind die Eckdaten der Anlagen-Jahresarbeitszahlen, die für die beiden Zubauszenarien gewählt wurden, aufgeführt. Sie lehnen sich an einen Feldtest des Fraunhofer ISE [1] an. Für die Jahre dazwischen wurde jeweils eine lineare Entwicklung angenommen.

	Anlagen-JAZ für das Installationsjahr			Marktanteil
	2010	2020	2029	
Luft/Wasser-Wärmepumpen	3,4	3,7	3,8	45 %
Erdreich/Wasser-Wärmepumpen	4,1	4,4	4,6	55 %

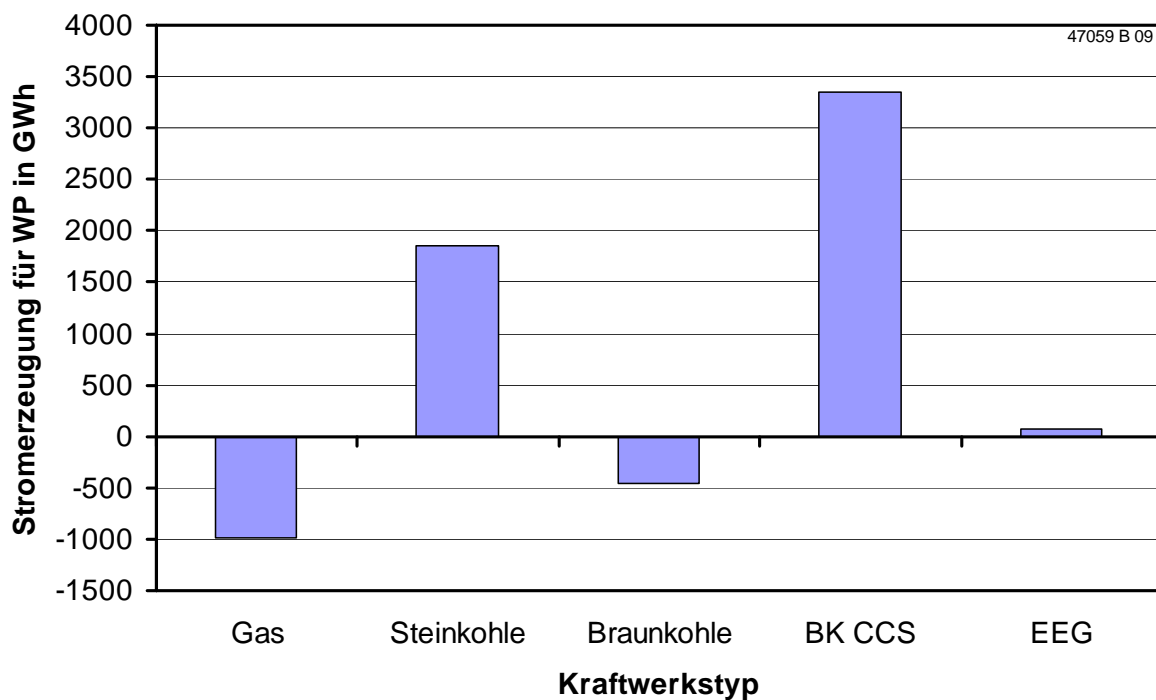
Die Leistungszahl der Luft/Wasser-Wärmepumpe geht außentemperaturabhängig in die Simulation ein, während systembedingt die Leistungszahl der Erdreich/Wasser-Wärmepumpe als konstant betrachtet wird. Als Temperaturwerte für die Berechnung dienen meteorologische Standardwerte für Deutschland. Weitere meteorologische Einflüsse bleiben unberücksichtigt. Darüber hinaus wurde von einem über den Tag konstanten Strombezug ausgegangen. Die getroffenen Vereinfachungen haben lediglich einen Einfluss auf den Leistungsbedarf der Wärmepumpe, der Jahresenergiebedarf bleibt dabei jedoch unverändert.

### 3.3.3 Szenario 1: Zukauf von CO<sub>2</sub>-Emissionsrechten

Im ersten Szenario wird unterstellt, dass es den Kraftwerksbetreibern möglich ist, zusätzlich zu den ihnen bereits zugeteilten Zertifikaten weitere CO<sub>2</sub>-Zertifikate auf dem Markt zu erwerben. Dabei ist zu beachten, dass die zusätzlichen Emissionen bei der Stromerzeugung aufgrund der Begrenztheit der Zertifikatsmenge zu einem ebenso großen Emissionsrückgang in anderen Bereichen führen. Gleichzeitig reduziert sich durch die Substitution anderer Heizsysteme die Anzahl der CO<sub>2</sub>-Emittenten außerhalb des CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandels und damit auch der gesamte CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

**Abbildung 9** zeigt die Auswirkungen des zusätzlichen Strombezugs der 1 Mio. Wärmepumpen im Jahr 2030. Die Stromerzeugung mittels Gasturbinen bzw. GuD-Kraftwerken sinkt um knapp 1.000 GWh, diejenige aus Braunkohle um knapp 500 GWh. Demgegenüber steigt der Einsatz der Steinkohlekraftwerke um gut 1.850 GWh und der Einsatz der Braunkohlekraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung um etwa 3.350 GWh. Darüber hinaus ist es möglich, eine geringe Menge Strom aus erneuerbaren Energien zusätzlich in die Stromversorgung zu integrieren.

ren. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass erneuerbaren Energien im Jahr 2030 bei den unterstellten Ausbauszenarien zeitweise mehr Strom liefern, als auf der Verbraucherseite nachgefragt wird. Unberücksichtigt bleibt jedoch, dass die Wärmepumpe darüber hinaus in der Lage ist, bei einem Überangebot von Strom aus erneuerbaren Energien, mit Hilfe eines Pufferspeichers Energie zu speichern. Der Anteil des Stromes aus erneuerbaren Energien könnte also in der Realität höher liegen. Anhand der beschriebenen Auswirkungen ergeben sich für den isoliert betrachteten Wärmepumpenstrom CO<sub>2</sub>-Emissionen von 440 g/kWh bei erzeugungsseitigen Stromgestehungskosten von 3,1 ct/kWh.



**Abbildung 9: Auswirkung des Zubaus von 1 Mio. Wärmepumpen auf die Stromerzeugung im Kraftwerkspark im Jahr 2030**

Dieser Anstieg führt zwar zu höheren Emissionen als bei der Betrachtung mit dem Strommix 2030, aber es bleibt ein deutlicher Vorteil im Vergleich zu den Referenzsystemen, wie **Abbildung 10** verdeutlicht. Im Vergleich zu Gasbrennwertkessel ergibt sich selbst bei einer Jahresarbeitszahl von 3,0 ein Rückgang um gut 40 %, im Vergleich mit Ölbrennwertkessel sogar eine Verminderung um mehr als die Hälfte. Im Fall einer Jahresarbeitszahl von 4,5 ergeben sich noch höhere Einsparungen von 60 % bzw. knapp 70 %.

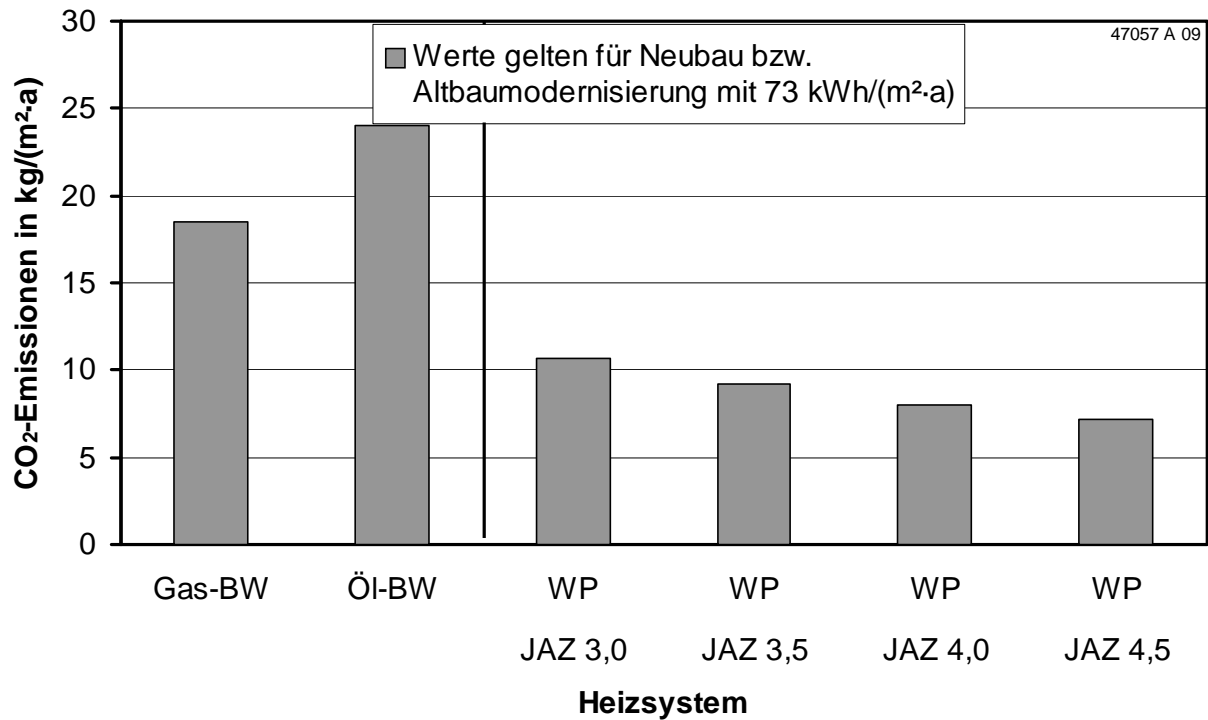


Abbildung 10: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Referenzgebäude für verschiedene Heizsysteme inklusive elektrischem Hilfsverbrauch im Jahr 2030

Eine Übersicht über den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen über die Jahresarbeitszahl und den Vergleich zu den Referenzsystemen gibt **Abbildung 11**.

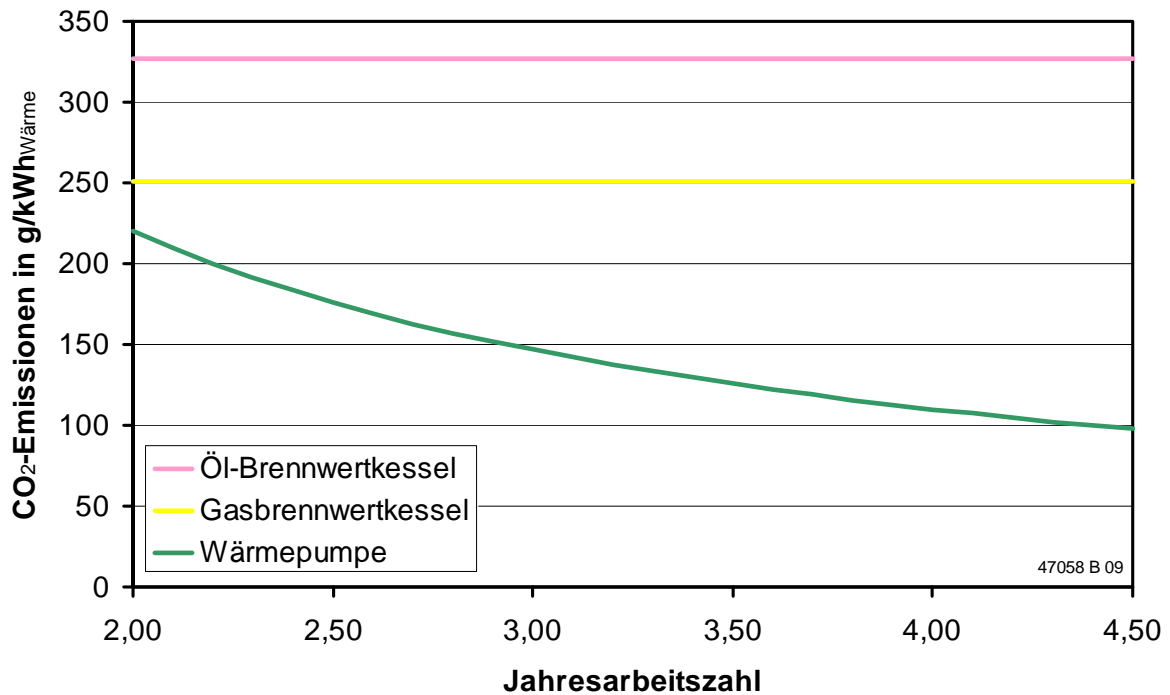


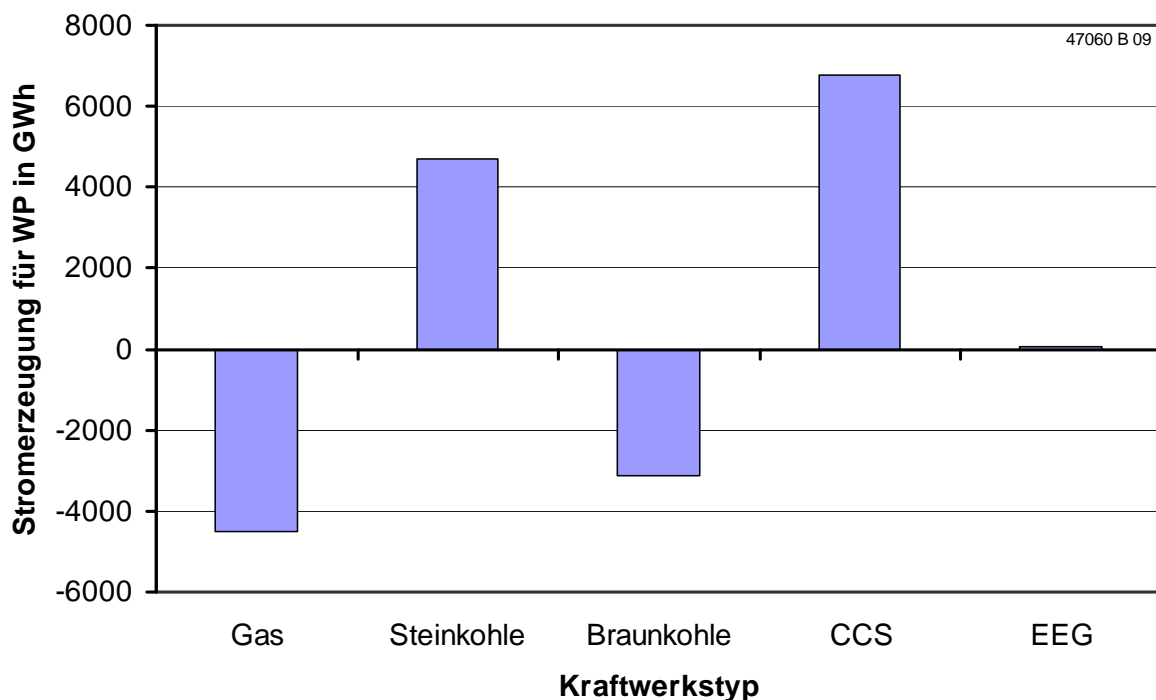
Abbildung 11: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlicher Heizsysteme für das Jahr 2030 bei gesonderter Betrachtung des Wärmepumpenstroms

### 3.3.4 Szenario 2: Deckelung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

In diesem Szenario entfällt für die Kraftwerksbetreiber die Möglichkeit, zusätzliche CO<sub>2</sub>-Zertifikate für die Erzeugung des Wärmepumpenstroms zu erwerben. Sie sind daher dazu gezwungen, ihren Kraftwerkspark so umzustellen, dass trotz erhöhter Stromproduktion ihre gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf dem Niveau ohne den angenommenen Wärmepumpenzubau verharren. Im Gegensatz zu Szenario 1 wird hier also der Innovationsdruck nicht in andere Bereiche verlagert, sondern bleibt im Bereich der Stromerzeugung. Dies kann durch vorzeitige Kraftwerkserneuerungen, durch Substitution von Energieträgern mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen oder durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Lagerung geschehen.

Die aus den Vorgaben resultierenden Veränderungen im Kraftwerkspark haben eine wesentlich stärker veränderte Stromerzeugung zur Folge als im ersten Szenario. Durch die begrenzten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich der Stromerzeugung führen die zusätzlichen Wärmepumpen zu keinen weiteren CO<sub>2</sub>-Emissionen, woraus spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Wärmepumpenstrom von 0 g/kWh folgen. Allerdings erhöhen sich die erzeugerseitigen Stromgestehungskosten auf 4,7 ct/kWh.

Wie in **Abbildung 12** dargestellt, produzieren Kraftwerke mit Gas als Energieträger in etwa 4.500 GWh konventionelle Braunkohlekraftwerke in etwa 3.100 GWh weniger Strom. Dafür steigt die Erzeugung aus konventionellen Steinkohlekraftwerken um 4.700 GWh und diejenige aus Braun- und Steinkohlekraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung um knapp 6.800 GWh. Die zusätzliche Einspeisung aus erneuerbaren Energien bleibt konstant, da sie per se bevorzugt wird.



**Abbildung 12: Auswirkung des Zubaus von 1 Mio. Wärmepumpen auf die Stromerzeugung im Kraftwerkspark 2030 bei unveränderten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kraftwerkspark**

## 4 Fazit

Im Rahmen der Studie erfolgte eine Analyse und Bewertung der Wärmepumpe im Vergleich zu Referenztechnologien hinsichtlich Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zudem wurden anhand von Szenarien Rückwirkungen eines vermehrten Wärmepumpeneinsatzes auf die Struktur der dafür nötigen Stromerzeugung untersucht. Als wichtigste Ergebnisse sind festzuhalten:

- Die Wärmepumpe ermöglicht bei Betrieb mit dem allgemeinen Strommix in Deutschland 2008 Primärenergieeinsparungen zwischen 25 und 50 %. Bis zum Jahr 2030 sind durch eine weitere Effizienzsteigerung des Kraftwerksparks noch höhere Primärenergieeinsparungen möglich, ohne jegliches Zutun der Wärmepumpenbetreiber.
- Bei zukünftig erheblich steigenden Anteilen regenerativer Energien in der Stromerzeugung verbessern sich Energie- und Umweltbilanz der Wärmepumpe nochmals deutlich. Tendenziell positiv für die Wärmepumpe wirken zukünftige Möglichkeiten der Aufnahme temporärer hoher Strommengen aus erneuerbaren Energien.
- Die in den Szenarien bis 2030 neu installierten 1 Mio. Wärmepumpen benötigen für die Bereitstellung der Raumheizwärme etwa 3,8 TWh elektrische Energie pro Jahr, das entspricht 0,7 % des Nettostromverbrauchs 2006. Der mittlere Leistungsbedarf am kältesten Tag beträgt 1,3 GW, was in etwa der Leistung zweier Steinkohleblöcke entspricht (zum Vergleich: derzeit installierte Windkraftleistung ca. 24 GW [13]).
- Die Wärmepumpe trägt ganz erheblich zur energiepolitisch wichtigen Diversifizierung der Primärenergiestruktur in der Gebäudeheizung bei. Sie spart nicht nur absolut Primärenergie pro Quadratmeter beheizter Wohnfläche ein, sondern ersetzt die besonders begrenzten Primärenergieträger Öl und Gas durch einen breiten Mix von heimischer Braunkohle bis hin zu regenerativen Energien.
- Da konventionelle Wärmeerzeuger nicht am CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel teilnehmen, führt deren Substitution durch Wärmepumpen zu sinkenden Gesamtemissionen, da Wärmepumpen aufgrund des Strombezugs indirekt am Zertifikatehandel teilnehmen.
- Während im EEWärmeG [11] für Luft/Wasser-Wärmepumpen eine Anlagen-Jahresarbeitszahl von mindestens 3,5 und für Erdreich/Wasser-Wärmepumpen von 4,0 gefordert ist, führt die Wärmepumpe bereits ab einer Jahresarbeitszahl von 2,0 zu einer Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen (für das Jahr 2008). Durch die Modernisierung des Kraftwerksparks bis 2030 werden die Verhältnisse nochmals deutlich günstiger.
- Die Wärmepumpe ermöglicht die Erschließung des größten, allgemein zugänglichen regenerativen Energieträgers, der Umweltwärme in Form von Luft, Erdreich und Grundwasser. In einem Beispielgebäude mit 86 kWh/(m<sup>2</sup>-a) reduziert die Wärmepumpe die CO<sub>2</sub>-Emissionen je nach Technologie zwischen 7,5 und 12,5 kg/(m<sup>2</sup>-a), ausgehend von 22,5 kg/(m<sup>2</sup>-a) bei Gasbrennwertkesseln.

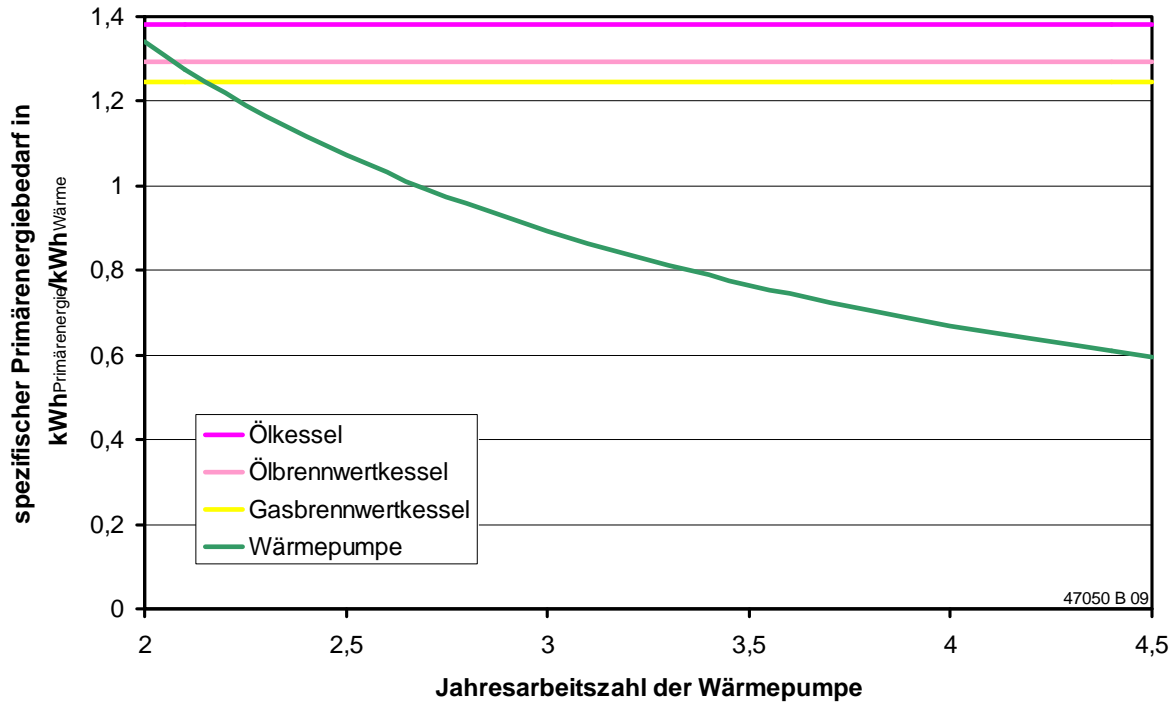
- Die Wärmepumpe ist ein Schritt zur Erreichung der ambitionierten IEKP-Ziele. Sie liefert nicht nur einen Beitrag zum globalen Umweltschutz, sondern bringt als lokalen Nutzen Emissionsfreiheit vor Ort.

München, 20. April 2009

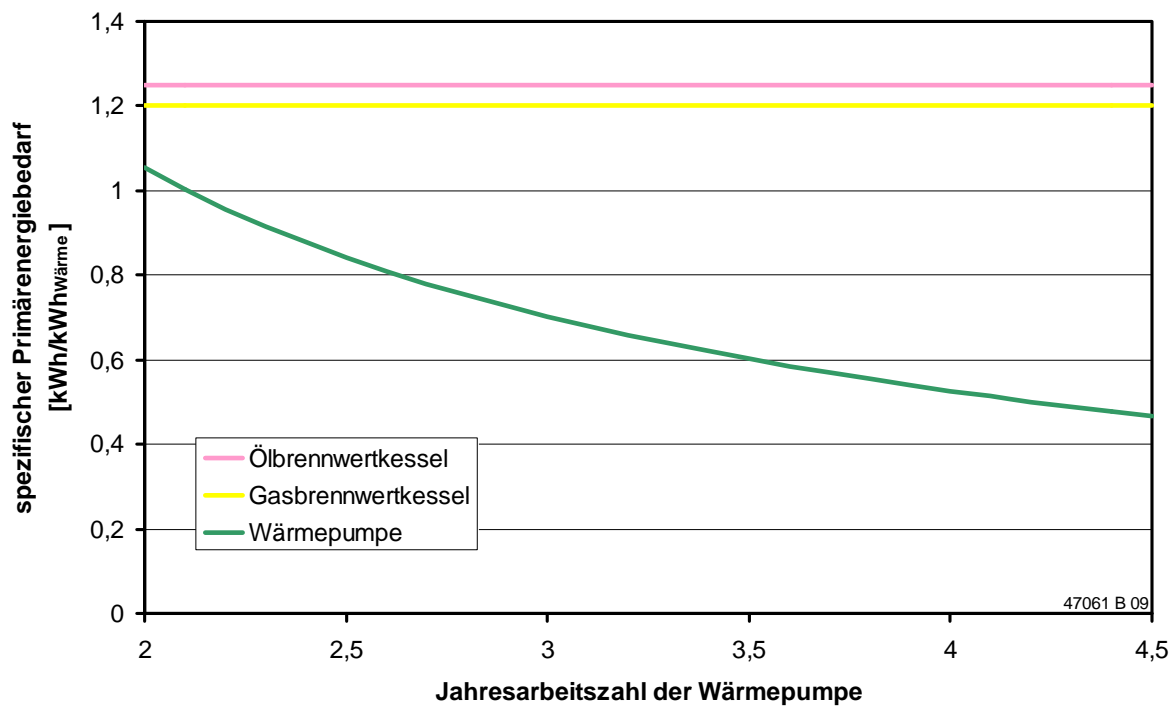
## 5 Anhang

Primärenergiebedarf über die Jahresarbeitszahl im Vergleich zu den Referenzsystemen:

Für das Jahr 2008:



Für das Jahr 2030:



Berechnungen für den Einsatz der 1 Mio. zusätzlich installierten Wärmepumpen bis zum Jahr 2030:

#### Wärmepumpen in Referenzgebäuden

Jahr	Anzahl
2020	500.000
2030	1.000.000

#### Primärenergieeinsparung

in kWh bei Ersatz von	Jahr	Öl-BW	Gas-BW	Ölkessel
	2020	5.198.452.696	4.814.534.558	5.920.272.573
	2030	10.189.862.184	9.486.296.864	11.600.926.690

in TWh bei Ersatz von	Jahr	Öl-BW	Gas-BW	Ölkessel
	2020	5,20	4,81	5,92
	2030	10,19	9,49	11,60

in PJ bei Ersatz von	Jahr	Öl-BW	Gas-BW	Ölkessel
	2020	18,71	17,33	21,31
	2030	36,68	34,15	41,76

#### CO<sub>2</sub>-Einsparung

in t bei Ersatz von	Jahr	Öl-BW	Gas-BW	Ölkessel
	2020	616.934	30.843	808.938
	2030	3.377.313	2.299.251	3.752.656

#### Genutzte Umweltwärme

Jahr	in kWh	in TWh	in PJ
2020	5.684.640.369	5,68	20,46
2030	10.616.408.434	10,62	38,22

#### Zum Vergleich: Benötigte Raumheizwärme (EE)

Jahr	in kWh	in TWh	in PJ
2007	622.500.000.000	622,50	2.241,00



**Charakteristische Jahresarbeitszahlen:****Strommix 2008****JAZ**

- > 2,2 Primärenergetisch bestes System
- > 2,7 Spezifischer Primärenergiebedarf (PE/NE) < 1
- > 2,0 CO<sub>2</sub>-spezifisch besser als Referenzsysteme
- > 2,6 CO<sub>2</sub>-Emissionen < 200 g/kWh<sub>Wärme</sub>

**Strommix 2030****JAZ**

- > 1,8 Primärenergetisch bestes System
- > 2,1 Spezifischer Primärenergiebedarf (PE/NE) < 1
- > 1,5 CO<sub>2</sub>-spezifisch besser als Referenzsysteme
- > 1,8 CO<sub>2</sub>-Emissionen < 200 g/kWh<sub>Wärme</sub>
- > 3,6 CO<sub>2</sub>-Emissionen < 100 g/kWh<sub>Wärme</sub>

**Spezifischer Wärmepumpenstrom 2030****JAZ**

- > 1,8 CO<sub>2</sub>-spezifisch besser als Referenzsysteme
- > 2,2 CO<sub>2</sub>-Emissionen < 200 g/kWh<sub>Wärme</sub>
- > 4,4 CO<sub>2</sub>-Emissionen < 100 g/kWh<sub>Wärme</sub>

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, Wärmepumpen-Effizienz – Feldtest des Fraunhofer ISE, Presseinformation vom 4. Dezember 2008, Nr. 35/08, Freiburg
- [2] Statistisches Jahrbuch 2004 – 2008; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- [3] Roth, H.; Kuhn, P.: Technik- und Kostenszenarien der Strombereitstellung in Deutschland bis 2040; IfE-Schriftenreihe Heft 55; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München; München, 2008
- [4] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Ganzheitliche Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE); München
- [5] Arndt, U.: Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandgestützter Simulation; München, 2008
- [6] Bosch Thermotechnik GmbH, Wetzlar  
<http://www.bosch-thermotechnology.com/sixcms/detail.php/2326473> aufgerufen im Januar 2009
- [7] Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V. (Hrsg.); Wärmepumpen in Österreich und der Schweiz; Expertenforum Wärmepumpe; 1. Ausgabe 2007; Stuttgart
- [8] Bundesverband Wärmepumpe e. V.; Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2003 bis 2008; Berlin, 2009  
[http://www.waermepumpe.de/fileadmin/Grafik/Downloads/Grafik1\\_Absatzzahlen-Waermepumpe\\_2003-2008.jpg](http://www.waermepumpe.de/fileadmin/Grafik/Downloads/Grafik1_Absatzzahlen-Waermepumpe_2003-2008.jpg) aufgerufen im März 2009
- [9] Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e. V.; Bilanzpressekonferenz am 01.04.2008; Marktentwicklung Deutschland
- [10] Gobmaier, T. et al.: Strukturoptimierung in Ballungsgebieten; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.; München, 2007
- [11] Anlage (zu den §§ 5, 7, 10 und 15) Anforderungen an die Nutzung von Erneuerbaren Energien, Abwärme und Kraft-Wärme-Kopplung sowie an Energieeinsparmaßnahmen und Wärmenetze (BGBl. I 200, S. 1663-1665) zum Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) vom 07.08.2008; BGBl. I 2008 S. 1658
- [12] Schubert, J.; Kaschenz, H.: Elektrische Wärmepumpen – eine erneuerbare Energie?; Umweltbundesamt; Dessau, Mai 2008
- [13] Bundesverband Windenergie e. V. Datenblatt 2008; <http://www.windenergie.de/de/statistiken/datenblatt-2008/> aufgerufen im April 2009