

Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung

Studie im Auftrag des Bundesverbandes Wärmepumpe e. V.

Technische Universität München

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Christian Heilek
Dipl.-Ing. Maximilian Kühne
Dr.-Ing. Peter Tzscheuschler

München, 14. Januar 2013

Inhalt

1	Hintergrund und Zielsetzung.....	3
2	Vergleich von Wärmepumpen mit Referenzsystemen.....	3
2.1	Referenzdaten.....	4
2.2	Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand.....	9
2.3	Einsatz von Wärmepumpen im Neubau.....	15
3	Simulationsgestützte Untersuchungen zum Ausbau von Wärmepumpen.....	19
3.1	Ergebnisse der Simulation zur Verwendung in Kapitel 2.....	19
3.2	Rahmendaten zu den Ausbauszenarios.....	21
3.3	Szenariodefinitionen.....	25
3.4	Ergebnisse.....	27
4	Fazit.....	34
A	Anhang.....	36
A.1	Abkürzungsverzeichnis.....	36
A.2	Kenndaten der betrachteten Gebäude und Systeme.....	37
A.3	Quellen.....	43

1 Hintergrund und Zielsetzung

In den letzten drei Jahren haben sich wesentliche Rahmenbedingungen der Energieversorgung in Deutschland geändert. Die Bundesrepublik hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, bis 2050 mindestens 80 % des Strombedarfs aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. Nach einer zwischenzeitlichen Laufzeitverlängerung für die deutschen Kernkraftwerke wurde nach der Katastrophe in Fukushima der Ausstieg aus der Kernenergie forciert.

Dies alles hat Auswirkungen auf die Entwicklung des Kraftwerksparks, die Anteile einzelner Primärenergieträger an der Stromerzeugung und somit auch auf die damit verbundenen Treibhausgasemissionen. Im Rahmen dieser Studie soll eine energiewirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Elektrowärmepumpen erfolgen. Schwerpunkte sind dabei der Bedarf an Primärenergie und der Ausstoß von CO₂ im Zeitbereich bis 2030.

In Kapitel 2 werden Wärmepumpen mit konventionellen Heizsystemen in Bestandsgebäuden und Neubauten verglichen, wobei die elektrische Energie, die Wärmepumpen und alle übrigen Wärmeerzeuger beziehen, mit Primärenergiefaktoren und CO₂-Emissionsfaktoren bewertet werden, die über die einzelnen Stunden des jeweiligen Betrachtungsjahres konstant sind. Dagegen erfolgt in den Ausbauszenarios des Wärmepumpeneinsatzes bis zum Jahr 2030, die in Kapitel 3 dargestellt werden, eine verursachergerechte Zuweisung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen.

2 Vergleich von Wärmepumpen mit Referenzsystemen

Auf Basis eines Einfamilienhauses im Bestand und eines Neubaus werden unterschiedliche Wärmeerzeugungssysteme hinsichtlich des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen untersucht, wobei der Primärenergiebedarf nach regenerativen und nicht-regenerativen Primärenergiebedarfen unterteilt wird.

Bild 2.1 zeigt die untersuchten Systeme im Einfamilienhaus des Baujahrs 1990. Vergleichend werden als Referenzsysteme zwei Bestandsanlagen aus dem Jahr 1990 (Erdgas- und Heizöl-Niedertemperaturkessel) neuen Heizsystemen des Standes 2011 gegenübergestellt. Dies sind Erdgas- und Heizöl-Brennwertkessel, Pellet-Kessel, Erdreich-Wärmepumpe (Sole/Wasser-WP) und Außenluft-Wärmepumpe (Luft/Wasser-WP). Somit werden bei den konventionellen Technologien jeweils Anlagen, die den Bestand repräsentieren (Niedertemperaturkessel), und der Stand der Technik berücksichtigt.

In **Bild 2.2** sind die Versorgungsoptionen im Neubau dargestellt. Dies sind Erdgas- und Heizöl-Brennwertkessel mit solarer Trinkwassererwärmung (TWE) sowie Pellet-Kessel, Erdreich-Wärmepumpe (Sole/Wasser-WP) und Außenluft-Wärmepumpe (Luft/Wasser-WP).

Im Sinne eines belastbaren Vergleichs wird jeweils die gleiche Versorgungsaufgabe zugrunde gelegt. Das Bestandsgebäude, Baujahr 1990, entspricht der damals gültigen Wärmeschutzverordnung 1984, der Neubau, Baujahr 2011, entspricht der Energieeinsparverordnung 2009.

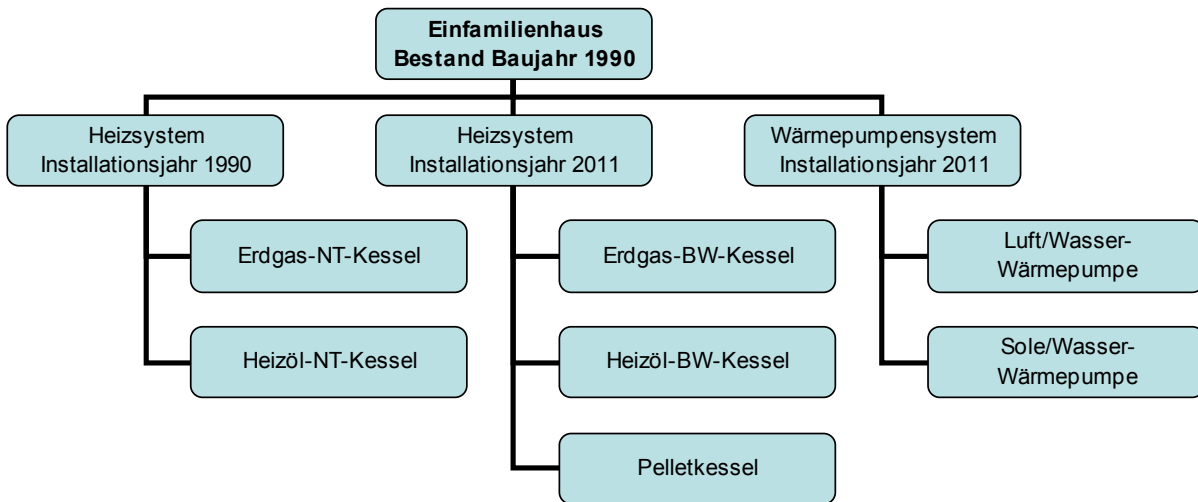


Bild 2.1: Untersuchte Wärmeerzeuger im Einfamilienhaus, Baujahr 1990 (WSchVO 1984)

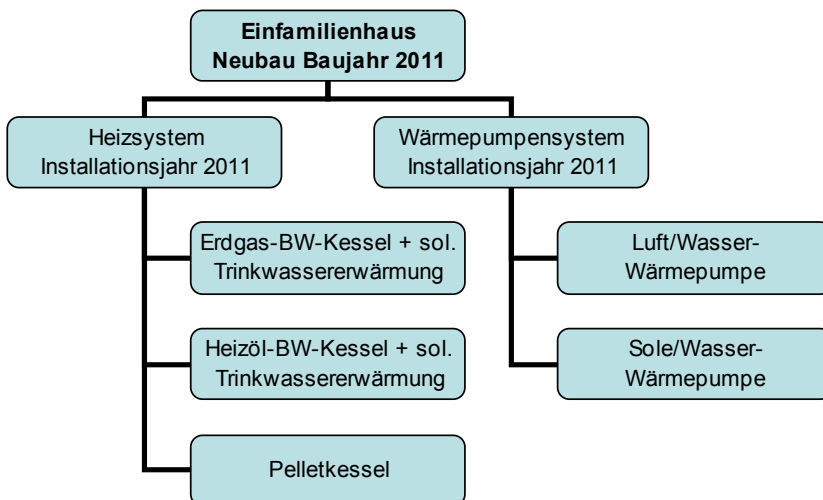


Bild 2.2: Untersuchte Wärmeerzeuger im Einfamilienhaus, Baujahr 2011 (EnEV 2009)

2.1 Referenzdaten

Referenzdaten der Gebäude

In nachfolgender **Tabelle 2.1** sind die wichtigsten Daten zu den betrachteten Gebäuden dargestellt. Beide Gebäude besitzen nach EnEV eine Nutzfläche von 155,8 m². Der Wärmebedarf für das Warmwasser beträgt 12,5 kWh/(m²·a), die Gebäude sind mit einem Zirkulationssystem ausgestattet, die Verteilung findet innerhalb der Gebäudehülle statt. Eine solarthermische Kollektoranlage wird gemäß dem EEWärmeG [EEWG] im Neubau bei den mit Gas bzw. Öl beheizten Varianten berücksichtigt. Die Kollektoranlage deckt dann 15 % des gesamten Wärmebedarfs.

Der Raumwärmebedarf beträgt 148,1 kWh/(m²·a) bzw. 35,1 kWh/(m²·a). Diese Wärme wird beim Bestandsgebäude durch eine Radiatorheizung bereitgestellt. Der Neubau ist mit Fußbo-

denheizung und Abluftanlage ausgestattet. Bei beiden Gebäuden wird eine kombinierte Heizanlage zur Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser eingesetzt.

Tabelle 2.1: Referenzdaten der Gebäude

	Bestandsgebäude 1990	Neubau 2011	
Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
Baustandard	WSchVO 1984	EnEV 2009	
Nutzfläche nach EnEV	155,8 m ²		
Warmwasserbereitung			
Warmwasserwärmebedarf	12,5 kWh/(m ² ·a)	12,5 kWh/(m ² ·a)	
Anlage	<ul style="list-style-type: none"> • Zirkulation • keine Kollektoranlage • Verteilung innerhalb der Gebäudehülle 	<ul style="list-style-type: none"> • Zirkulation • Kollektoranlage zur TWE bei Beheizung mit Öl oder Gas • Verteilung innerhalb der Gebäudehülle 	
Raumheizung			
Raumwärmebedarf	148,1 kWh/(m ² ·a)	35,1 kWh/(m ² ·a)	
Anlage	<ul style="list-style-type: none"> • Radiatoren • keine Abluftanlage • kombinierte Heizanlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Fußbodenheizung • Abluftanlage • kombinierte Heizanlage 	
Wärmeerzeugung			
Wärmeerzeugung	28.047 kWh/a	9.525 kWh/a	
davon erzeugt durch:		bei Öl-/Gas-BW-Kessel	bei WP u. Pellet-Kessel
Kollektor	0	1.429 kWh/a	0
Heizsystem	28.047 kWh/a	8.097 kWh/a	9.525 kWh/a

Referenzdaten der Heizungssysteme

Die Heizungssysteme werden durch ihre Effizienz charakterisiert. Diese wird als Jahresnutzungsgrad der Heizkessel bzw. Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen angegeben. In **Tabelle 2.2** sind in Klammern zudem die zugehörigen Kehrwerte, die sogenannten Aufwandszahlen angegeben.

Tabelle 2.2: Referenzdaten zur Effizienz der Heizsysteme

Heizungssystem	Installations-jahr	Bestandsgebäude	Neubau
		Jahresnutzungsgrad (Aufwandszahl)	
Gas- und Öl-NT-Kessel	1990	87 % (1,15)	-
Gas- und Öl-BW-Kessel (bei Neubau mit sol. TWE)	2011	92 % (1,08)	96 % (1,04)
Pellet-Kessel	2011	73 % (1,37)	73 % (1,37)
		Jahresarbeitszahl (Aufwandszahl)	
Luft/Wasser-Wärmepumpe	2011	2,8 (0,35)	3,1 (0,32)
Sole/Wasser-Wärmepumpe	2011	3,4 (0,29)	3,9 (0,25)

Die Jahresnutzungsgrade der Kesselanlagen wurden DIN V 4701-10 [D4701] entnommen. Die Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Wärmepumpen entstammen der BWP-Branchenprognose 2011 [BWP11]. Für in Bestandsgebäuden installierte Wärmepumpen wurde dabei der Wert verwendet, der in der BWP-Branchenprognose für Renovierungen angesetzt ist. Die Bilanzgrenze der in der BWP-Branchenprognose angegebenen JAZ entspricht dabei der in **Bild 2.3** dargestellten AZ2 der Wärmepumpen-Effizienzstudie [ISE11] des Fraunhofer ISE [BWP12]. Bilanziell zählen dabei zur aufgewendeten elektrischen Energie die Bedarfe von Verdichter, Steuerung, Solepumpe bzw. Ventilator sowie der Bedarf des Heizstabs.

In die Berechnungen zum Vergleich der Heizsysteme geht neben den Aufwandszahlen aus Tabelle 2.2 auch der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie ein, da dieser vom jeweiligen Heizungssystem abhängt und somit unterschiedlich sein kann. **Tabelle 2.3** gibt eine Übersicht über die verwendeten Werte.

Der elektrische Hilfsenergiebedarf wurde aus DIN V 4701-10 [D4701] abgeleitet und umfasst alle Systeme der Erzeugung und Verteilung von Raumwärme und Trinkwarmwasser. Dies sind Heizkreis-, Warmwasserzirkulations- und Speicherladepumpen, die Steuerungen des Systems, der Strombedarf der Wärmeerzeuger sowie, falls vorhanden, die Ventilatoren des Abluftsystems. Wie oben beschrieben, ist der Hilfsenergiebedarf der Wärmepumpenanlagen in die Jahresarbeitszahl eingerechnet, weshalb in Gebäuden mit Wärmepumpen geringere Werte für den Hilfsenergiebedarf ausgewiesen sind.

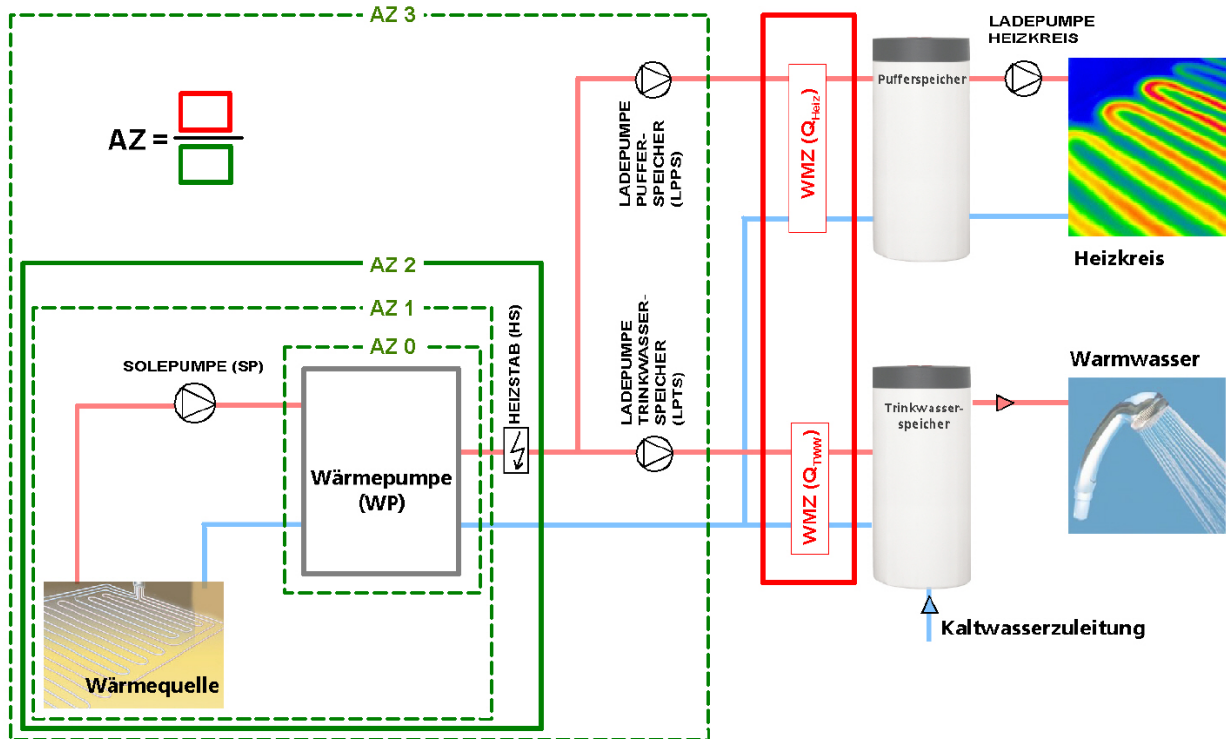


Bild 2.3: Bilanzgrenzen einer Wärmepumpenanlage aus [ISE11]

Tabelle 2.3: Referenzdaten zum Hilfsenergiebedarf der Heizsysteme nach [D4701]

Heizungssystem	Installations-jahr	Bestandsgebäude	Neubau
Hilfsenergiebedarf (Strom)			
Gas- und Öl-NT-Kessel	1990	474 kWh/a	
Gas- und Öl-BW-Kessel (bei Neubau mit sol. TWE)	2011	474 kWh/a	966 kWh/a
Pellet-Kessel	2011	932 kWh/a	1284 kWh/a
Wärmepumpe	2011	333 kWh/a	685 kWh/a

Referenzdaten der Energieträger

Der Primärenergiebedarf zur Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs wird aus dem Bedarf an Endenergieträgern mittels Primärenergiefaktoren berechnet. Für Erdgas, Heizöl und Holz-Pellets wurden die Kumulierten Energieverbräuche (KEV) der GEMIS-Datenbank, Version 4.71 [GEMIS] ausgewertet. Dabei wurden für das Bezugsjahr 2011 Datensätze verwendet, die das Jahr 2010 repräsentieren. Es werden keine Anteile von Biomethan im Erdgas berücksichtigt, da im Rahmen des EEG die Einspeisung von Biomethan nur über dessen Nutzung in einer KWK-Anlage gefördert wird. Damit kann davon ausgegangen werden, dass Biomethan bilanziell ausschließlich in KWK-Anlagen energetisch umgesetzt wird. Ebenso wird die Beimi-

schung von Wasserstoff zum Erdgas nicht berücksichtigt, da dies auch in der Leitstudie 2011 des BMU [BMU2011] bis 2030 nicht berücksichtigt wurde. Des Weiteren wird bei Heizöl keine Beimischung biogener Flüssiggasstoffe, z. B. Pflanzenmethylester, berücksichtigt.

Für Strom konnten für das Jahr 2011 Werte aus [IINAS12] verwendet werden. Durch den geänderten Kernenergieausstieg nach Fukushima werden im Jahr 2020 noch mehr Kernkraftwerke in Betrieb sein, als in der BMU-Leitstudie 2010 angenommen und in GEMIS 4.71 hinterlegt sind. Deshalb werden für die Jahre 2020 und 2030 Ergebnisse aus der Szenariorechnung des Kapitels 3.1 verwendet.

In **Tabelle 2.4** sind die Primärenergiefaktoren, unterteilt nach dem gesamten kumulierten Energieverbrauch (KEV) und dem kumulierten nicht-erneuerbaren Verbrauch (KNEV), dargestellt. Die entsprechenden CO₂-Emissionsfaktoren für direkte, vorgelagerte und gesamte Emissionen enthält **Tabelle 2.5**.

Tabelle 2.4: Referenzdaten Primärenergiefaktoren der Endenergieträger [GEMIS, IINAS12, eigene Berechnungen]

Endenergieträger	Primärenergiefaktor gesamt (KEV) in kWh _{PE} /kWh _{EE}			Primärenergiefaktor nicht-erneuerbar (KNEV) in kWh _{PE} /kWh _{EE}			
	<i>Betrachtungsjahr</i>	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Heizöl		1,19	1,18	1,18	1,18	1,17	1,17
Erdgas		1,15	1,15	1,17	1,15	1,14	1,16
Holzpellets		1,11	1,09	1,09	0,08	0,06	0,04
Strom		2,74	2,18	1,78	2,21	1,35	0,77

Tabelle 2.5: Referenzdaten CO₂-Emissionsfaktoren der Endenergieträger [GEMIS, IINAS12, eigene Berechnungen]

Endenergieträger	CO ₂ -Faktor für direkte Emissionen in g _{CO2} /kWh _{EE}			CO ₂ -Faktor für vorgelag. Emissionen in g _{CO2} /kWh _{EE}			CO ₂ -Faktor für gesamte Emissionen in g _{CO2} /kWh _{EE}			
	<i>Betrachtungsjahr</i>	2011	2020	2030	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Heizöl		268	268	268	45	42	40	313	310	308
Erdgas		201	201	201	24	22	24	225	223	225
Holzpellets		0	0	0	19	14	11	19	14	11
Strom		0	0	0	567	335	255	567	335	255

2.2 Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudebestand

Gesamtprimärenergiebedarf

Bild 2.4 zeigt zum einen für die Betrachtungsjahre 2011, 2020 und 2030, denen die in Tabelle 2.4 aufgeführten Primärenergiefaktoren zugrunde liegen, den gesamten Primärenergiebedarf unterschiedlicher Wärmeerzeuger zur Wärmebereitstellung für ein Einfamilienhaus, Baujahr 1990. Der Gesamtprimärenergiebedarf ist dabei einerseits ursächlich aufgeschlüsselt nach der benötigten Hilfsenergie und der der Wärmeerzeugung direkt zuzuordnenden Energie. Letztere wird unterteilt in die lokal regenerativ bereitgestellte Wärme und dem übrigen Gesamtprimärenergiebedarf zur Wärmeerzeugung. Lokal regenerativ bereitgestellte Wärme ist, entsprechend der Definition „Umweltenergie“ in Tabelle A.1 der DIN V 18599-1:2011-12 [D18599], die kostenfreie Wärme aus Solarstrahlung, die über einen Kollektor dem System zugeführt wird, oder Umweltwärme, die über Wärmepumpen dem System zugeführt wird. Andererseits erfolgt die Aufschlüsselung in Bild 2.4 nach dem regenerativen und dem nicht-regenerativen Primärenergiebedarf.

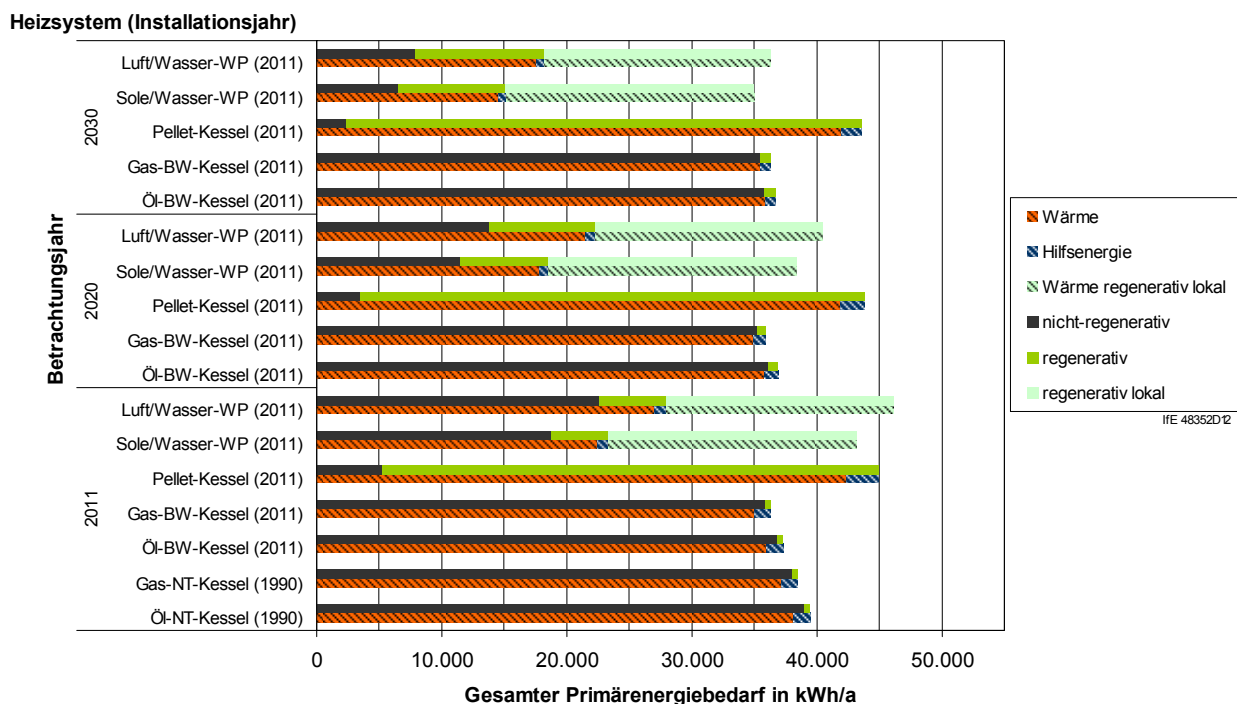


Bild 2.4: Gesamter Primärenergiebedarf von Bestandssystemen und neuen Heizsystemen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 1990) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Deutlich zu erkennen ist dabei, dass aufgrund der Veränderungen des Primärenergiefaktors über die Jahre der Gesamtprimärenergiebedarf der Wärmepumpen des Installationsjahres 2011 zurückgeht – um 19 % von 2011 bis 2030. Bei den übrigen Systemen lässt sich kaum ein Rückgang im Gesamtprimärenergiebedarf feststellen. Im Jahr 2030 liegt der gesamte Primärenergie-

bedarf des Pellet-Kessels mit 43.605 kWh_{PE} pro Jahr deutlich über den übrigen Systemen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund eines begrenzten Biomassepotenzials zu betrachten.

Für detailliertere Aussagen zeigt **Tabelle 2.6** die Veränderungen des gesamten Primärenergiebedarfs, wenn der Bestandskessel aus dem Jahr 1990 (Öl-/Gas-Niedertemperaturkessel) durch eine Neuanlage des Installationsjahres 2011 ersetzt wird (Öl-/Gas-Brennwertkessel, Pellet-Kessel oder Wärmepumpe). Die Veränderungen werden dabei für die Anlagen des Installationsjahres 2011 für die Betrachtungsjahre 2011, 2020 und 2030 ausgewiesen, wodurch ersichtlich wird, welche Primärenergieeinsparungen langfristig möglich sind. Daraus ist zu erkennen, dass durch die Installation von Brennwertkesseln ein Primärenergiebedarfsrückgang von 3 bis 8 % zu erwarten ist. Pellet-Kessel führen zu einer Erhöhung von 12 bis 17 %. Wärmepumpen führen in den frühen Betrachtungsjahren noch zu einer Erhöhung des gesamten Primärenergiebedarfs, im Lauf der Zeit wird jedoch allein durch die Veränderung der Stromerzeugung ein Rückgang des Gesamtprimärenergiebedarfs für die Beheizung eines Einfamilienhauses von bis zu 10 % im Jahr 2030 erreicht.

Tabelle 2.6: Veränderung des gesamten Primärenergiebedarfs für ein Einfamilienhaus (Baujahr 1990) durch Einsatz neuer Heizsysteme gegenüber einem Bestandsheizsystem (negative Werte: Bedarfssrückgang, positive Werte: Bedarfserhöhung) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Veränderung des gesamten Primärenergiebedarfs bei Einsatz ...		Betrachtungsjahr	... gegenüber [Heizsystem (Inst.-Jahr)]	
			ÖL-NT-Kessel (1990)	Gas-NT-Kessel (1990)
von [Heizsystem (Installationsjahr)]	Öl-BW-Kessel (2011)	2011	-6 %	-3 %
		2020	-6 %	-3 %
		2030	-6 %	-4 %
	Gas-BW-Kessel (2011)	2011	-8 %	-6 %
		2020	-8 %	-6 %
		2030	-7 %	-6 %
	Pellet-Kessel (2011)	2011	14 %	17 %
		2020	12 %	15 %
		2030	12 %	13 %
	Sole/Wasser-WP (2011)	2011	9 %	12 %
		2020	-2 %	1 %
		2030	-10 %	-9 %
	Luft/Wasser-WP (2011)	2011	17 %	20 %
		2020	4 %	6 %
		2030	-7 %	-6 %

Nicht-regenerativer Primärenergiebedarf

Um einen ganzheitlichen Blick auf die Bedarfsstruktur der Wärmeerzeuger zu erhalten, ist es notwendig, neben dem gesamten Primärenergiebedarf auch den nicht-regenerativen Primärenergiebedarf zu untersuchen. Dieser wird in **Bild 2.5** dargestellt. Dabei ergeben sich für den Pellet-Kessel im Jahr 2011 deutlich bessere Werte als für Wärmepumpen. Jedoch ist dabei zu beachten, dass im Gegensatz zu den Wärmepumpen das Potenzial für Pellet-Kessel aufgrund des Angebots an Holz und Holzabfallstoffen begrenzt ist. Die Untersuchung der nicht-regenerativen Anteile des Primärenergiebedarfs der Wärmepumpen zeigt für die weiteren Betrachtungsjahre 2020 und 2030 einen stark zurückgehenden Trend unter der Voraussetzung, dass sich der Anteil der regenerativen Stromerzeugung, wie vom BMU angenommen [BMU11] und in Kapitel 3 dargestellt, entwickelt. Während, wie in **Bild 2.5** zu erkennen ist, der nicht-regenerative Primärenergiebedarf beispielsweise bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe von 18.808 kWh_{PE}/a im Jahr 2011 auf 6.570 kWh_{PE}/a im Jahr 2030 um 65 % zurückgeht, wird auch deutlich, dass sich der nicht-regenerative Primärenergiebedarf bei den Öl- und Gas-Brennwertkesseln über die Zeit kaum ändert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich lediglich die Zusammensetzung des Hilfsenergiebedarfs in Richtung höherer Anteile erneuerbarer Energien ändert.

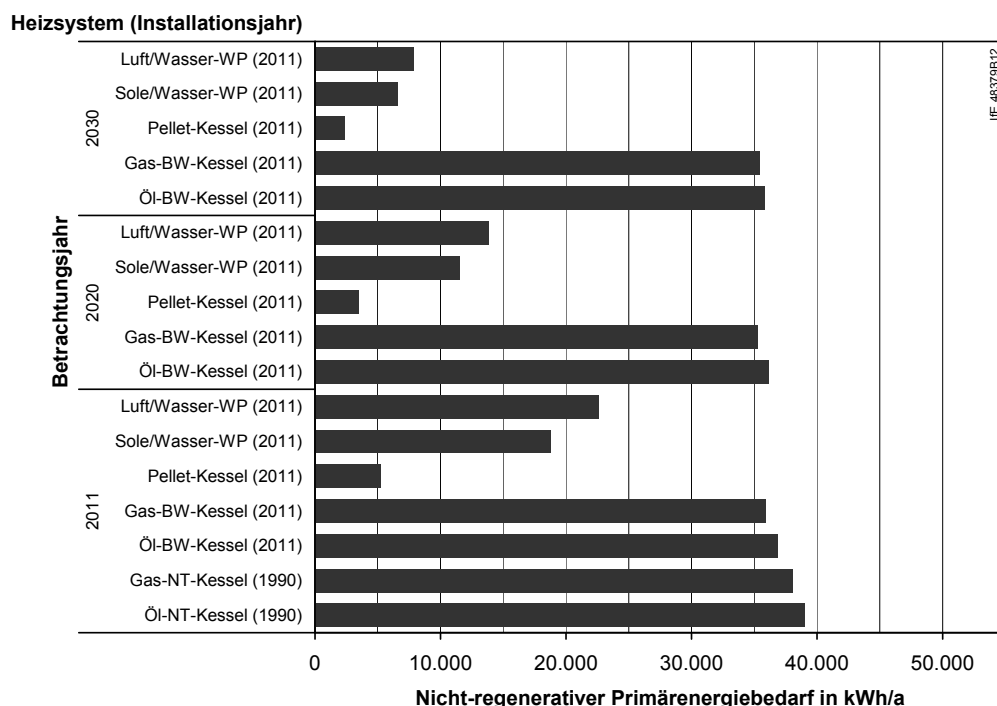


Bild 2.5: Nicht-regenerativer Primärenergiebedarf von Bestandssystemen und neuen Heizsystemen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 1990) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Aus **Bild 2.5** abgeleitet zeigt **Tabelle 2.7** die Veränderungen des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs für ein Einfamilienhaus, Baujahr 1990, die sich durch den Einsatz eines neuen Heizsystems des Installationsjahrs 2011 erzielen lassen. Betrachtet werden auch hier die Jahre 2011, 2020 und 2030. Werden Bestandskessel durch Öl- oder Gas-Brennwertkessel ersetzt, so lassen sich die nicht-regenerativen Primärenergiebedarfe um 3 bis 8 % reduzieren. Dagegen erreicht die Luft/Wasser-Wärmepumpe bereits im Betrachtungsjahr 2011 Einsparungen von gut 40 % und die Sole/Wasser-Wärmepumpe etwas mehr als 50 % gegenüber den Bestandskesseln. Während sich die Einsparungen durch Brennwertkessel über den Betrachtungszeitraum kaum ändern, sind bei den Wärmepumpensystemen Reduktionen von 79 % (Luft/Wasser-Wärmepumpe) bzw. 83 % (Sole/Wasser-Wärmepumpe) im Jahr 2030 zu erreichen. Lediglich der Pellet-Kessel schneidet bei der Untersuchung des Reduktionspotenzials der nicht-regenerativen Primärenergiebedarfe insgesamt besser ab. Dies ist jedoch, wie oben bereits erwähnt, aufgrund des hohen Gesamtprimärenergiebedarfs und des begrenzten Rohstoffpotenzials für Pellet-Kessel differenziert zu betrachten.

Tabelle 2.7: Veränderung des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs für ein Einfamilienhaus (Baujahr 1990) durch Einsatz neuer Heizsysteme gegenüber einem Bestandsheizsystem (negative Werte: Bedarfsrückgang, positive Werte: Bedarfserhöhung) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Veränderung des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs bei Einsatz ...		Betrachtungsjahr	... gegenüber [Heizsystem (Inst.-Jahr)]	
			ÖL-NT-Kessel (1990)	Gas-NT-Kessel (1990)
von [Heizsystem (Installationsjahr)] ::	Öl-BW-Kessel (2011)	2011	-6 %	-3 %
		2020	-6 %	-3 %
		2030	-6 %	-5 %
	Gas-BW-Kessel (2011)	2011	-8 %	-6 %
		2020	-8 %	-6 %
		2030	-7 %	-6 %
	Pellet-Kessel (2011)	2011	-87 %	-86 %
		2020	-91 %	-91 %
		2030	-94 %	-94 %
	Sole/Wasser-WP (2011)	2011	-52 %	-51 %
		2020	-70 %	-69 %
		2030	-83 %	-83 %
Luft/Wasser-WP (2011)	2011	-42 %	-41 %	
	2020	-64 %	-63 %	
	2030	-79 %	-79 %	

CO₂-Emissionen

Neben dem Primärenergiebedarf werden auch die CO₂-Emissionen, die sowohl direkt als auch indirekt über vorgelagerte Ketten der Wärmeerzeugung und der Hilfsenergie zuzuweisen sind, für die bereits genannten Wärmeerzeuger untersucht. Grundlage hierfür sind die CO₂-Emissionsfaktoren nach Tabelle 2.5. **Bild 2.6** stellt die CO₂-Emissionen für dieselben Wärmeerzeuger dar, deren Primärenergiebedarfe in Bild 2.4 und Bild 2.5 gezeigt werden. Hierbei ist zu erkennen, dass die Wärmeerzeuger, die mit fossilen Brennstoffen befeuert werden, die höchsten Emissionen aufweisen. Gegenüber Öl- und Gas-Niedertemperaturkesseln bedeutet der Einsatz der Wärmepumpe eine Einsparung von CO₂ bereits im Jahr 2011. Durch die Entwicklung des Primärenergiefaktors für Strom erhöhen sich die Einsparungen im Jahre 2030 gegenüber Öl- und Gas-Niedertemperaturkesseln auf 65 % bis 78 % (**Tabelle 2.8**). Dagegen verändern sich die CO₂-Emissionen der Öl- und Gas-Brennwertkessel über den Betrachtungszeitraum kaum. Bei Wärmepumpen zeigt sich zwar im Vergleich zu Pelletheizungen eine ähnliche Einspardynamik, die guten CO₂-Werte von Biomasse erreicht die Wärmepumpe nach aktueller Betrachtungsweise aber auch im Jahre 2030 nicht.

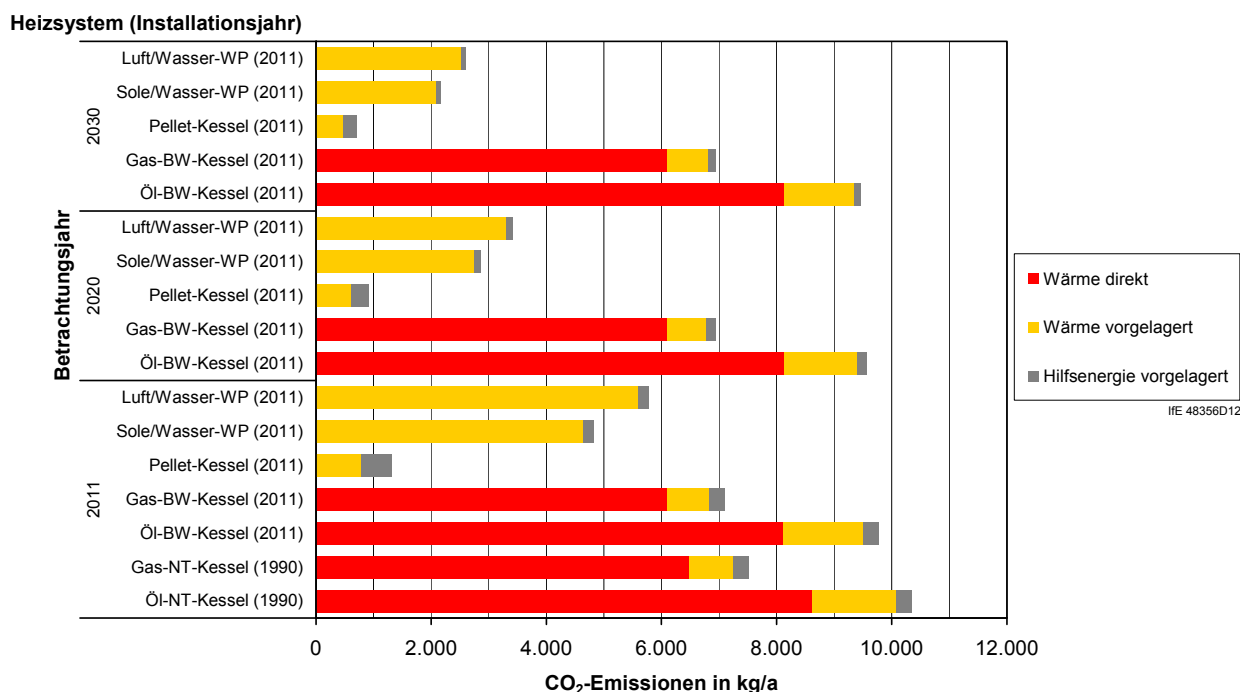


Bild 2.6: CO₂-Emissionen von Bestandssystemen und neuen Heizsystemen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 1990) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionsfaktoren nach Tabelle 2.5

Weitere CO₂-Emissionsveränderungen durch neue Heizsysteme sind analog zu den Abschnitten zum Primärenergiebedarf in **Tabelle 2.8** aufgeführt.

Tabelle 2.8: Veränderung der CO₂-Emissionen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 1990) durch Einsatz neuer Heizsysteme gegenüber einem Bestandsheizsystem (negative Werte: Bedarfsrückgang, positive Werte: Bedarfserhöhung) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionsfaktoren nach Tabelle 2.5

Veränderung der CO ₂ -Emissionen bei Einsatz ...		Betrachtungsjahr	... gegenüber [Heizsystem (Inst.-Jahr)]	
			ÖL-NT-Kessel (1990)	Gas-NT-Kessel (1990)
von [Heizsystem (Installationsjahr)] ...	Öl-BW-Kessel (2011)	2011	-6 %	30 %
		2020	-6 %	30 %
		2030	-6 %	29 %
	Gas-BW-Kessel (2011)	2011	-31 %	-6 %
		2020	-32 %	-6 %
		2030	-31 %	-6 %
	Pellet-Kessel (2011)	2011	-88 %	-83 %
		2020	-92 %	-89 %
		2030	-93 %	-91 %
	Sole/Wasser-WP (2011)	2011	-53 %	-36 %
		2020	-72 %	-61 %
		2030	-78 %	-71 %
Luft/Wasser-WP (2011)	2011	-44 %	-23 %	
	2020	-66 %	-53 %	
	2030	-74 %	-65 %	

Als Fazit ist festzuhalten, dass zwar bei der zugrundeliegenden Betrachtung eines Bestandsgebäudes bezüglich der CO₂-Emissionen und des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs der Pellet-Kessel am besten abschneidet. Jedoch beträgt der gesamte Primärenergiebedarf des Pellet-Kessels bei Betrachtung des Jahres 2030 das 1,4-fache des Bedarfs der Luft/Wasser-Wärmepumpe und der Sole/Wasser-Wärmepumpe. Blendet man die lokal regenerativ zur Verfügung stehende Primärenergie (Solarstrahlung, Umweltwärme) aus, so ist bei der Nutzung eines Pellet-Kessels die 2,7- bzw. 3,3-fache Menge an Primärenergie gegenüber den beiden Wärmepumpentypen notwendig. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund des begrenzten Brennstoffpotenzials für Pellet-Kessel ein entscheidender Faktor. Gegenüber Kesseln mit Öl oder Gas als Brennstoff zeigen Wärmepumpen stets einen ökologischen Vorteil durch einen deutlich niedrigeren nicht-regenerativen Primärenergiebedarf und geringere CO₂-Emissionen.

2.3 Einsatz von Wärmepumpen im Neubau

Gesamtprimärenergiebedarf

Ein ähnliches Bild wie beim Gebäudebestand ergibt sich bei der Betrachtung des Einsatzes verschiedener Wärmeerzeuger im Neubau (**Bild 2.7**). Aufgrund der eingesetzten Solarkollektoranlage bei den fossil befeuerten Anlagen (Öl- und Gas-Brennwertkessel) schneiden diese jedoch im Vergleich zum Pellet-Kessel bezogen auf den gesamten Primärenergiebedarf etwas besser ab als im Bestandsgebäude. In allen Betrachtungsjahren liegt der gesamte Primärenergiebedarf der Pellet-Kessel über dem der anderen Technologien. Aufgrund der sinkenden Primärenergiefaktoren der Stromerzeugung nimmt der gesamte Primärenergiebedarf der Wärmepumpen des Installationsjahres 2011 bis 2030 um etwa 20 % ab, sodass im Jahr 2030 die gesamten Primärenergiebedarfe der Wärmepumpen etwa auf dem Niveau der Öl- und Gas-Brennwertkessel liegen. Des Weiteren besteht der gesamte Primärenergiebedarf bei den Wärmepumpensystemen zu einem nicht unerheblichen Teil aus lokaler regenerativer Energie, je nach Wärmepumpentyp und Betrachtungsjahr zwischen 39 und 56 %.

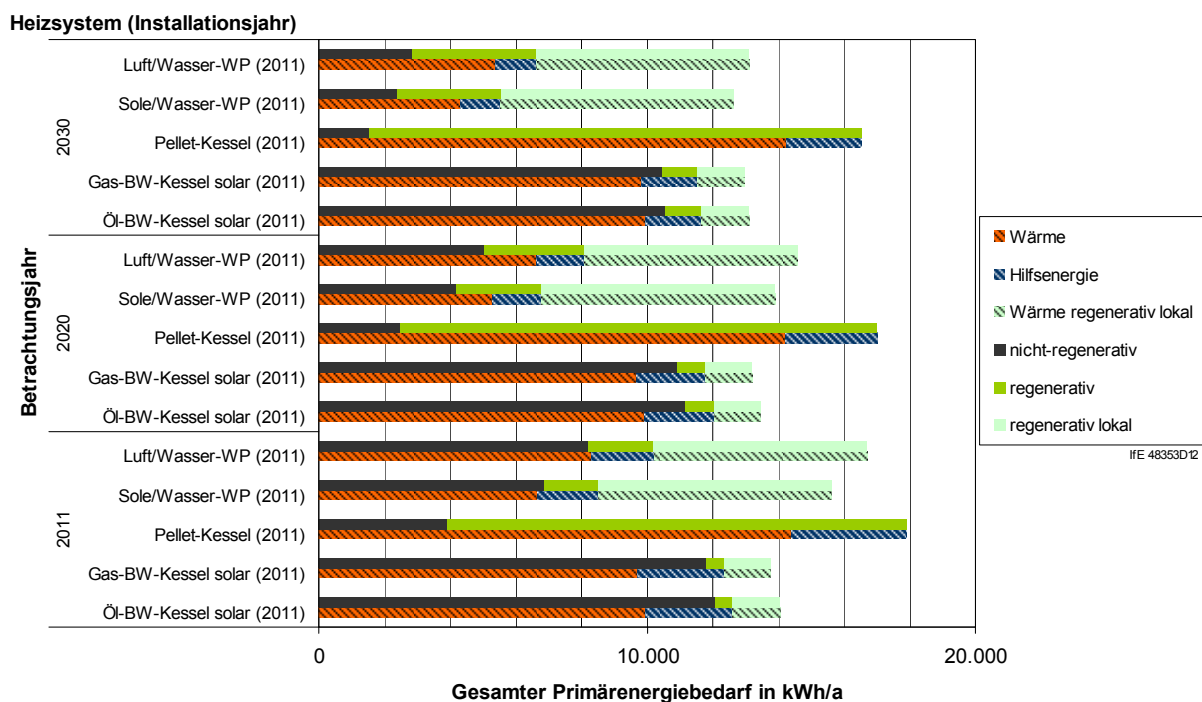


Bild 2.7: Gesamter Primärenergiebedarf von Heizsystemen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 2011) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Tabelle 2.9 zeigt die prozentualen Abweichungen des Gesamtprimärenergiebedarfs der Heizsysteme zueinander für ein Einfamilienhaus des Baujahrs 2011 für verschiedene Betrachtungsjahre auf. Grundlage ist jeweils das Installationsjahr 2011.

Tabelle 2.9: Veränderung der gesamten Primärenergiebedarfe von Heizsystemen untereinander für ein Einfamilienhaus, Baujahr 2011 (negative Werte: geringerer Bedarf, positive Werte: höherer Bedarf) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Veränderung des gesamten Primärenergiebedarfs bei Einsatz ...		Betrachtungsjahr	... gegenüber [Heizsystem (Installationsjahr)]				
			Öl-BW + sol. TWE (2011)	Gas-BW + sol. TWE (2011)	Pellet-Kessel (2011)	Sole/Wasser-WP (2011)	Luft/Wasser-WP (2011)
von [Heizsystem (Installationsjahr)] ...	Öl-BW + sol. TWE (2011)	2011	-	2 %	-22 %	-10 %	-16 %
		2020	-	2 %	-21 %	-3 %	-8 %
		2030	-	1 %	-21 %	4 %	0 %
	Gas-BW + sol. TWE (2011)	2011	-2 %	-	-23 %	-12 %	-17 %
		2020	-2 %	-	-22 %	-5 %	-10 %
		2030	-1 %	-	-22 %	3 %	-1 %
	Pellet-Kessel (2011)	2011	27 %	30 %	-	15 %	7 %
		2020	26 %	29 %	-	23 %	17 %
		2030	26 %	27 %	-	31 %	26 %
	Sole/Wasser-WP (2011)	2011	11 %	13 %	-13 %	-	-6 %
		2020	3 %	5 %	-18 %	-	-5 %
		2030	-3 %	-3 %	-24 %	-	-4 %
	Luft/Wasser-WP (2011)	2011	19 %	21 %	-7 %	7 %	-
		2020	8 %	11 %	-14 %	5 %	-
		2030	0 %	1 %	-21 %	4 %	-

Nicht-regenerativer Primärenergiebedarf

Analysiert man nur den nicht-regenerativen Primärenergiebedarf für den Neubau, so wird auch hier deutlich, dass die Heizsysteme mit fossilen Brennstoffen trotz der solaren Trinkwassererwärmung in allen Betrachtungsjahren deutlich höhere Bedarfe aufweisen als Pellet-Kessel und Wärmepumpen (**Bild 2.8**).

Detaillierte Werte für die prozentualen Abweichungen des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs der Systeme zueinander werden in

Tabelle 2.10 aufgeführt. Hier zeigt sich insbesondere, dass der Vorteil eines Pellet-Kessels bezüglich des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs gegenüber den Wärmepumpen nicht so ausgeprägt ist wie in einem Bestandsgebäude. Gegenüber Öl- und Gas-Brennwertkesseln mit solarer Trinkwassererwärmung sind mit Wärmepumpen Einsparungen an nicht-regenerativem Primärenergiebedarf je nach Technologie und Betrachtungsjahr von 30 % bis 77 % möglich.

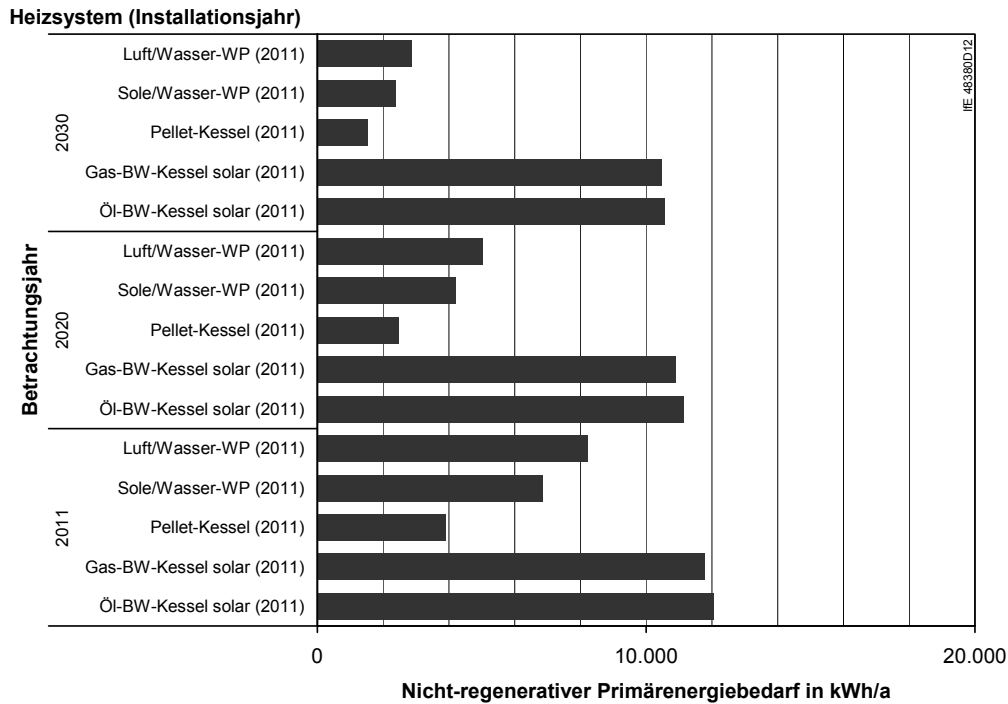


Bild 2.8: Nicht-regenerativer Primärenergiebedarf von Heizsystemen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 2011) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Tabelle 2.10: Veränderung der nicht-regenerativen Primärenergiebedarfe von Heizsystemen untereinander für ein Einfamilienhaus, Baujahr 2011 (negative Werte: geringerer Bedarf, positive Werte: höherer Bedarf) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren nach Tabelle 2.4

Veränderung des nicht-regenerativen Primärenergiebedarfs bei Einsatz ...		Betrachtungsjahr	... gegenüber [Heizsystem (Installationsjahr)]				
			Öl-BW + sol. TWE (2011)	Gas-BW + sol. TWE (2011)	Pellet-Kessel (2011)	Sole/Wasser-WP (2011)	Luft/Wasser-WP (2011)
... von [Heizsystem (Installationsjahr)] ...	Öl-BW + sol. TWE (2011)	2011	-	2 %	208 %	75 %	47 %
		2020	-	2 %	349 %	165 %	122 %
		2030	-	1 %	583 %	340 %	268 %
	Gas-BW + sol. TWE (2011)	2011	-2 %	-	201 %	72 %	44 %
		2020	-2 %	-	338 %	159 %	117 %
		2030	-1 %	-	577 %	336 %	265 %
	Pellet-Kessel (2011)	2011	-67 %	-67 %	-	-43 %	-52 %
		2020	-78 %	-77 %	-	-41 %	-51 %
		2030	-85 %	-85 %	-	-36 %	-46 %
	Sole/Wasser-WP (2011)	2011	-43 %	-42 %	75 %	-	-16 %
		2020	-62 %	-61 %	69 %	-	-16 %
		2030	-77 %	-77 %	55 %	-	-16 %
	Luft/Wasser-WP (2011)	2011	-32 %	-30 %	110 %	20 %	-
		2020	-55 %	-54 %	102 %	20 %	-
		2030	-73 %	-73 %	86 %	20 %	-

CO₂-Emissionen

In der Ausprägung vergleichbar mit den nicht-regenerativen Energiebedarfen sind die Unterschiede bei den CO₂-Emissionen. **Bild 2.9** zeigt, abhängig von den CO₂-Emissionsfaktoren, die den Betrachtungsjahren zugrunde liegen, die Emissionen, die direkt bzw. vorgelagert durch die Wärmeerzeugung bzw. die Hilfsenergieerzeugung entstehen. Dabei wird deutlich, dass mit der Veränderung in der Stromerzeugungsstruktur eine deutliche Verminderung der CO₂-Emissionen von Heizsystemen mit einem hohen Strombedarf einhergeht.

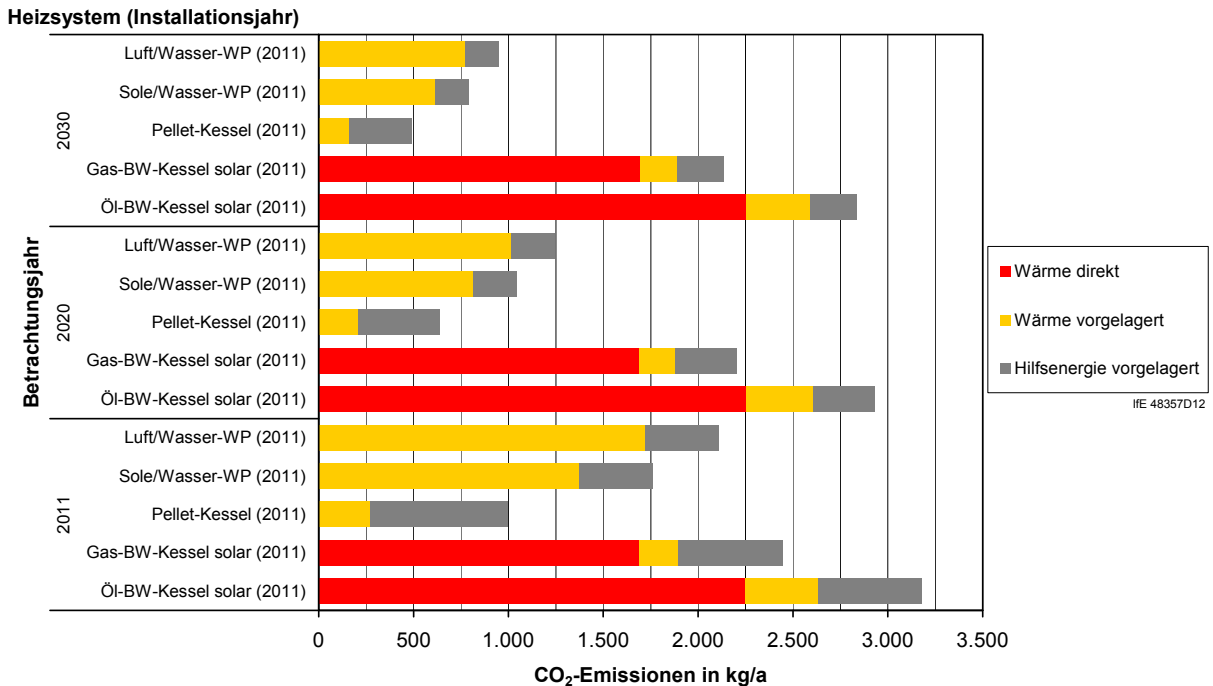


Bild 2.9: CO₂-Emissionen von Heizsystemen für ein Einfamilienhaus (Baujahr 2011) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionsfaktoren nach Tabelle 2.5

Detaillierte Werte für die prozentualen Unterschiede bei den CO₂-Emissionen der Systeme zueinander für ein Einfamilienhaus (Baujahr 2011) sind in **Tabelle 2.11** aufgeführt.

Tabelle 2.11: Veränderung der CO₂-Emissionen von Heizsystemen untereinander für ein Einfamilienhaus, Baujahr 2011 (negative Werte: geringerer Bedarf, positive Werte: höherer Bedarf) für verschiedene Betrachtungsjahre unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionsfaktoren nach Tabelle 2.5

Veränderung der CO ₂ -Emissionen bei Einsatz ...		Betrachtungsjahr	... gegenüber [Heizsystem (Installationsjahr)]				
			Öl-BW + sol. TWE (2011)	Gas-BW + sol. TWE (2011)	Pellet-Kessel (2011)	Sole/Wasser-WP (2011)	Luft/Wasser-WP (2011)
von [Heizsystem (Installationsjahr)] ...	Öl-BW + sol. TWE (2011)	2011	-	30 %	225 %	80 %	51 %
		2020	-	33 %	380 %	181 %	135 %
		2030	-	33 %	503 %	258 %	199 %
	Gas-BW + sol. TWE (2011)	2011	-23 %	-	150 %	39 %	16 %
		2020	-25 %	-	261 %	111 %	77 %
		2030	-25 %	-	355 %	170 %	125 %
	Pellet-Kessel (2011)	2011	-69 %	-60 %	-	-45 %	-54 %
		2020	-79 %	-72 %	-	-41 %	-51 %
		2030	-83 %	-78 %	-	-41 %	-50 %
	Sole/Wasser-WP (2011)	2011	-45 %	-28 %	80 %	-	-16 %
		2020	-64 %	-53 %	71 %	-	-16 %
		2030	-72 %	-63 %	69 %	-	-16 %
	Luft/Wasser-WP (2011)	2011	-34 %	-14 %	116 %	20 %	-
		2020	-57 %	-43 %	104 %	20 %	-
		2030	-67 %	-56 %	102 %	20 %	-

3 Simulationsgestützte Untersuchungen zum Ausbau von Wärmepumpen

Für die zukünftige Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland wird ein Simulationsmodell [KKH12] verwendet, das unter den gegebenen Rahmenbedingungen den volkswirtschaftlich kostengünstigsten Kraftwerkspark ermittelt. Als Rahmenbedingungen gehen die Stromnachfrage, der Ausbau erneuerbarer Energien, Energieträgerpreise sowie Kosten und technische Daten der Kraftwerkstechnologien in die Simulation ein. Die jährlichen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung können auf einen Maximalwert begrenzt werden.

Als Ergebnisse werden die installierte Leistung und die Erzeugung der Kraftwerke sowie der Primärenergieaufwand und die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung ausgegeben.

3.1 Ergebnisse der Simulation zur Verwendung in Kapitel 2

Für Kapitel 2 wurden zur Bestimmung der spezifischen Emissionen und des Primärenergiebedarfs des Strommix der Jahre 2020 und 2030 entsprechende Simulationen durchgeführt. Als Datenbasis für die Lastentwicklung und die Einspeisung aus erneuerbaren Energien und KWK dient die BMU-Leitstudie 2011, Szenario 2011 A. Die Entwicklung der Nutzung von Wärmepum-

pen wird ebenfalls entsprechend Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie angenommen. Dieses Szenario wird im Folgenden als „BMU Basisszenario“ bezeichnet.

Bild 3.1 zeigt die resultierende Struktur der Stromerzeugung für die drei betrachteten Jahre 2011, 2020 und 2030. Daraus ergeben sich die in **Bild 3.2** dargestellten Werte für den regenerativen und nicht-regenerativen spezifischen Primärenergiebedarf und für die spezifischen CO₂-Emissionen.

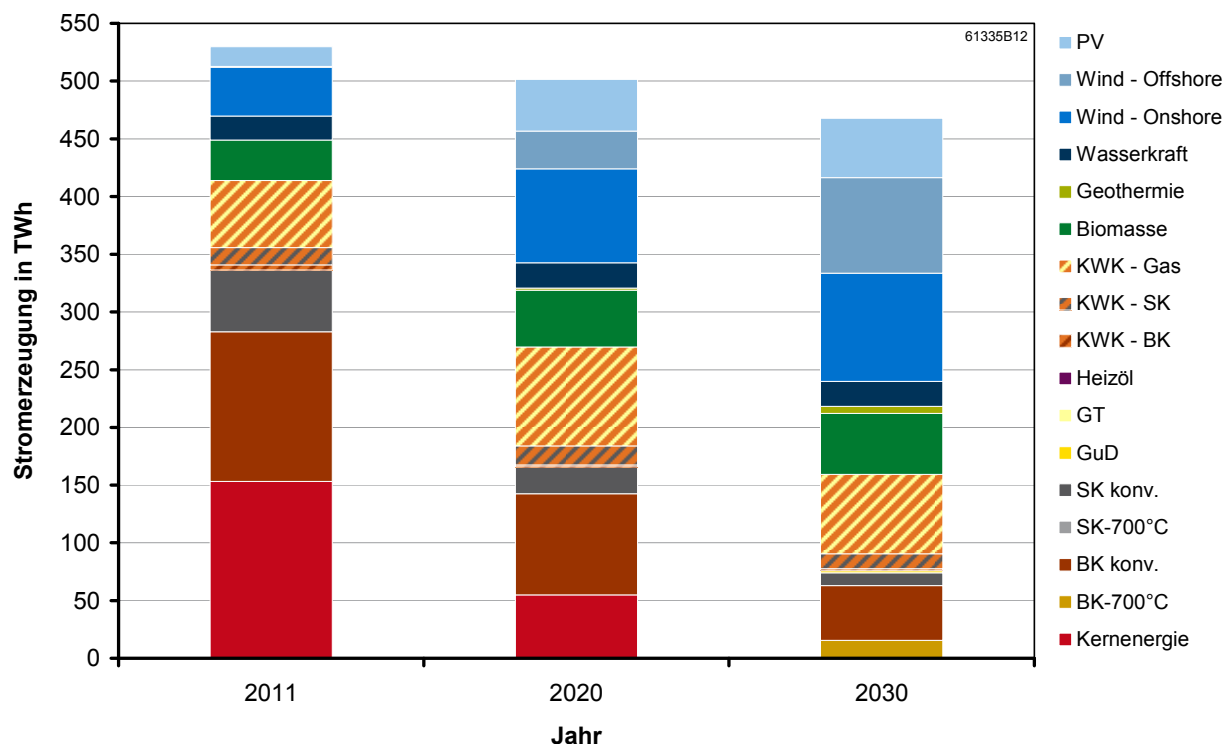
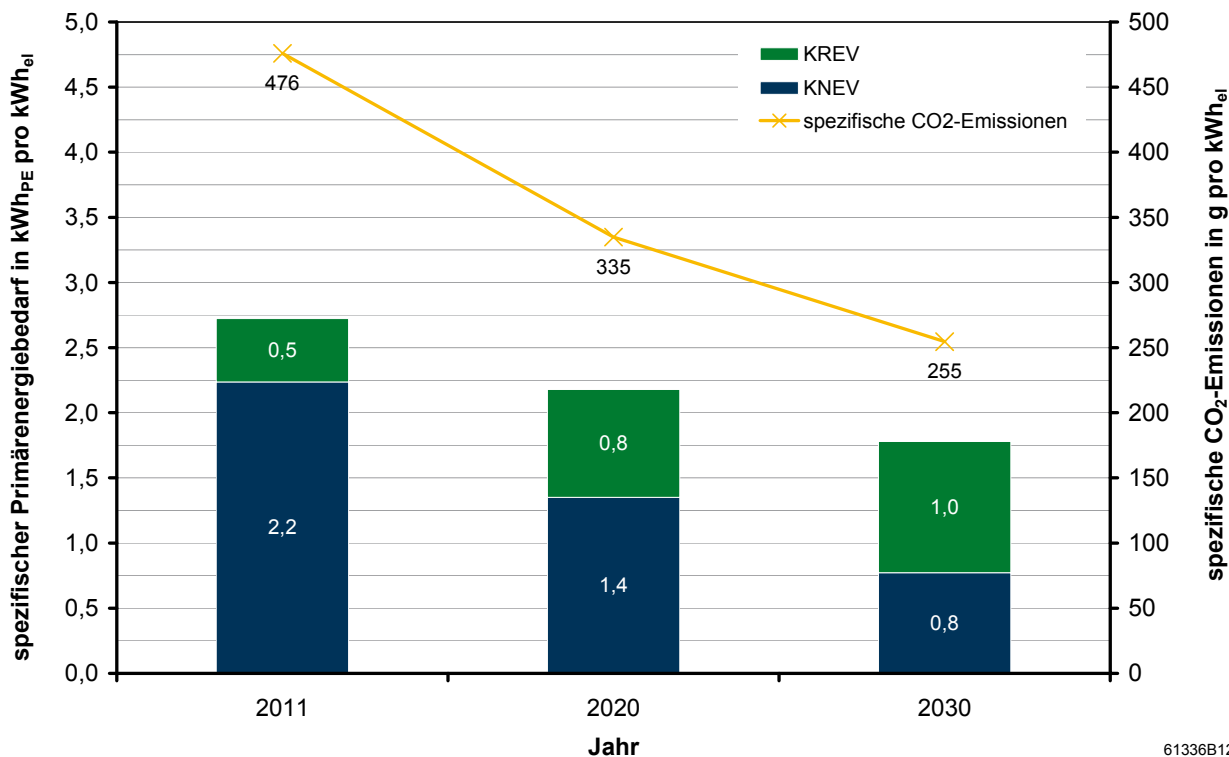


Bild 3.1: Struktur der Stromerzeugung der Jahre 2011, 2020 und 2030 im BMU Basisszenario

Die für 2011 ermittelten spezifischen Emissionen weichen dabei deutlich von den in Tabelle 2.5 ausgewiesenen Werten aus [IINAS12] ab. Dies lässt sich wie folgt erklären: Im Jahr 2011 wurden die acht Kernkraftwerke Biblis A, Biblis B, Brunsbüttel, Isar 1, Krümmel, Neckarwestheim, Philippsburg 1 und Unterweser aufgrund des Moratoriums vom 18. März 2011 außer Betrieb genommen und gingen nach der Novellierung des Atomgesetzes nicht mehr in Betrieb [ATW12]. Im Modell sind Kraftwerke jedoch jeweils für ein ganzes Jahr am Netz und in Betrieb, die acht Kraftwerke konnten deshalb noch für das gesamte Jahr 2011 eingesetzt werden, was aufgrund der weitgehenden Emissionsfreiheit der Stromerzeugung aus Kernkraft zu einer niedrigeren Jahresemissionsmenge als in der Realität führt. Daher wurden in Kapitel 2 für das Jahr 2011 die Werte aus [IINAS12] übernommen.

Des Weiteren wird der Kraftwerkseinsatz in linearen Modellen nur stark vereinfacht abgebildet (z. B. keine Modellierung von zusätzlichen Anfahrverlusten, teillastabhängigen Wirkungsgraden oder von Mindestbetriebs- und Mindeststillstandszeiten möglich). Letzteres führt zu einer maximalen Flexibilität der Kraftwerke im Modell. So können auch Grundlastkraftwerke, wie z. B.

Braunkohleanlagen, bei Bedarf für nur wenige Stunden ausgeschaltet und anschließend wieder in Betrieb genommen werden. Dies ist jedoch in Realität nicht möglich und führt wie auch die anderen Vereinfachungen im Modell tendenziell zu niedrigeren Emissionen.



61336B12

Bild 3.2: Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen und des spezifischen Primärenergiebedarfs der Stromerzeugung im BMU Basisszenario

3.2 Rahmendaten zu den Ausbauszenarios

Ein Vergleich des Stromerzeugungssystems mit und ohne Wärmepumpenausbau erlaubt Aussagen über den Einfluss der Wärmepumpen auf den konventionellen Kraftwerkspark, den Kraftwerkseinsatz und die Einbindung erneuerbarer Energien und ermöglicht eine verursachergerechte Zuweisung von Primärenergiebedarfen und CO₂-Emissionen. Die hierfür notwendigen Rahmendaten zur Darstellung des Stromerzeugungssystems werden im Folgenden aufgezeigt.

Erzeugungsmengen

In **Tabelle 3.1** sind die relevanten Größen zu Strombedarf und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und KWK aus den verwendeten Szenarios des BMU [BMU11] und des BEE [BEE12] aufgeführt. Die charakteristischen Zeitreihen der Last und der Erzeugung aus erneuerbaren Energien und KWK sind aus [KKH12] entnommen. Neben den absoluten Erzeugungsmengen haben diese Charakteristiken einen Einfluss auf mögliche Erzeugungüberschüsse.

Tabelle 3.1: Vergleich relevanter Größen des Szenarios 2011 A der BMU-Leitstudie 2011 und des BEE-Stromszenarios 2030

	Szenario	2011	2020	2030
Bruttostrombedarf in TWh/a	BMU ¹⁾	606,3	573,0	558,0
	BEE ²⁾	607,0	557,3	565,7
Nettostrombedarf in TWh/a	BMU ³⁾	513,1	483,9	449,7
	BEE ⁴⁾	513,7	470,6	455,9
Nettostrombedarf inkl. Netzverluste in TWh/a	BMU ⁵⁾	528,1	498,9	464,7
	BEE ⁵⁾	528,7	485,6	470,9
Bruttostromerzeugung aus EE (ohne Import) in TWh/a	BMU	115,8	233,5	331,9
	BEE	122,4	261,5	419,0
Anteil EE am Bruttostrombedarf in %	BMU	19,1	40,8	59,5
	BEE	20,2	46,9	74,1
Stromerzeugung aus fossiler KWK in TWh/a	BMU ⁶⁾	77,6	104,6	89,2
	BEE ⁷⁾	75,8	96,4	63,3

1) Bruttostromverbrauch, nur Werte für 2010, 2020 und 2030, dazwischen linear interpoliert.

2) Gesamtstromverbrauch.

3) Strom Endenergie, nur Werte für 2010, 2020 und 2030, dazwischen linear interpoliert.

4) kein Nettostromverbrauch angegeben; Verhältnis Brutto- zu Nettostromverbrauch bestimmt aus BMU-Szenario.

5) Annahme für Netzverluste 15 TWh/a.

6) KWK-Stromerzeugung, nur Werte für 2010, 2015, 2020, 2025 und 2030, dazwischen linear interpoliert.

7) keine Angabe zu KWK-Stromerzeugung; Differenz der Biomasse- und Geothermieerzeugung im BEE-Szenario gegenüber BMU wird als reine KWK-Stromerzeugung angenommen; fossile KWK-Stromerzeugung laut BMU wird im BEE-Szenario um diesen Betrag reduziert.

Lastprofile der Wärmepumpen

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, den temperaturabhängigen Strombedarf der Wärmepumpen adäquat abzubilden, da dieser entscheidend ist für den Einsatz der konventionellen Kraftwerke, die die residuale Last zu decken haben. Hierfür werden die Standardlastprofilkurven für Wärmepumpen (Typ HZ2) verwendet [EON12], wie sie auszugsweise in **Bild 3.3** dargestellt sind. Diese Kurven sind normiert auf einen Bedarf von 300 kWh pro Kelvin und Tag und existieren für einen relevanten Temperaturbereich von -17 °C bis +17 °C. Oberhalb von +17 °C wird von einem sich nicht mehr verändernden Bedarf ausgegangen, da in diesem Fall nur noch Wärmebedarf für das Trinkwarmwasser zu decken ist. Als Auslegungstemperatur der Wärmepumpen wurden -17 °C festgesetzt, was bedeutet, dass unter dieser Temperatur nicht mit einer Steigerung des Wärmebedarfs zu rechnen ist.

Das entsprechende Tagesprofil richtet sich dabei stets nach den gewichteten Viertagesmitteltemperaturen, die die thermische Trägheit eines Gebäudes berücksichtigen.

Mit den in der Simulation verwendeten TRY-Daten ergibt sich somit für das Jahr 2011 der in **Bild 3.4** dargestellte Verlauf der elektrischen Last für die Bestandswärmepumpen.

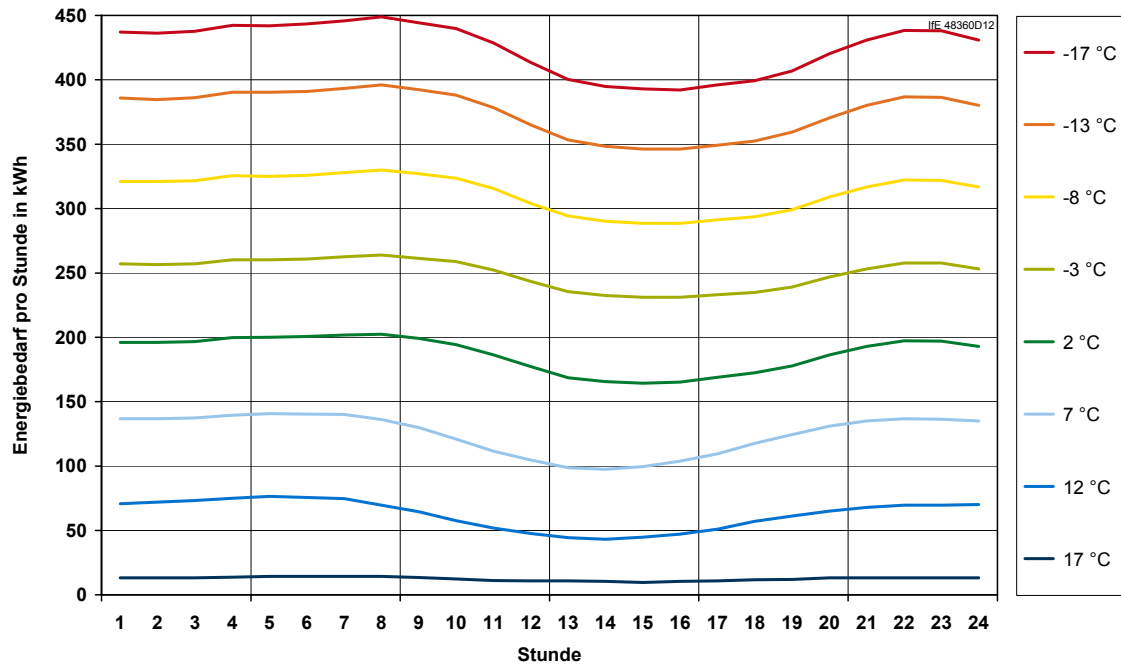


Bild 3.3: Standardlastprofilkurven für Wärmepumpen (Typ HZ2) für ausgewählte äquivalente Tagesmitteltemperaturen normiert auf einen Bedarf von 300 kWh/Kd [EON12]

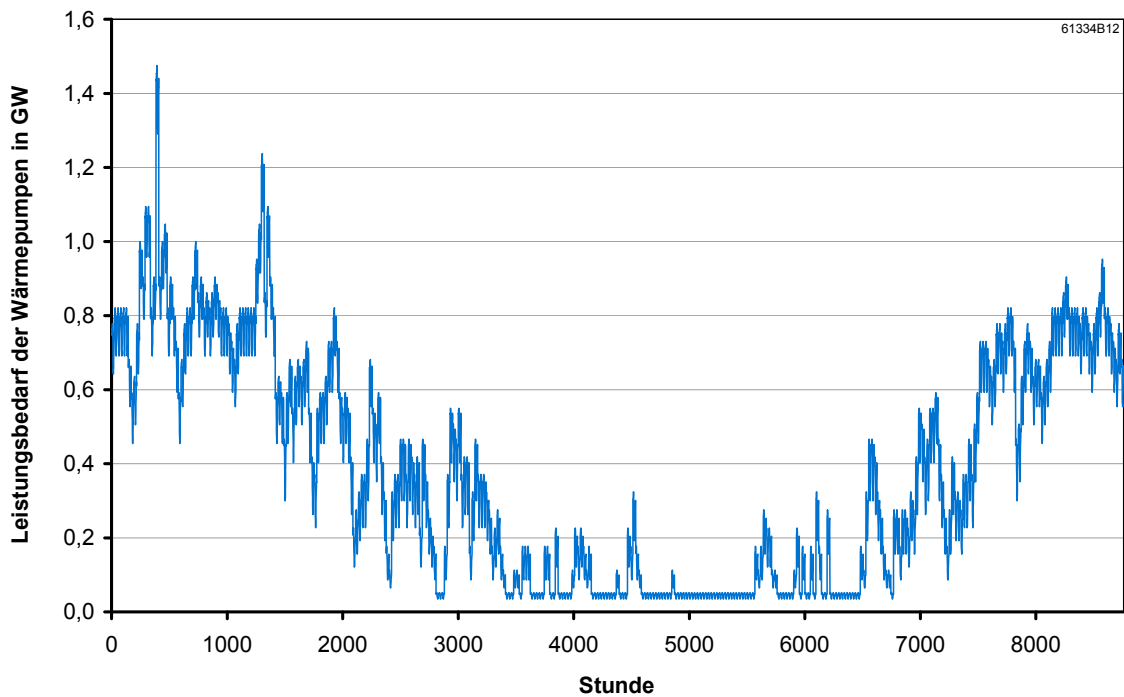


Bild 3.4: Lastprofil des Wärmepumpenbestandes im Jahr 2011

Anzahl und Strombedarf der Wärmepumpen bei einem forcierten Ausbau

Die Auswirkungen eines intensiveren Einsatzes von Wärmepumpen beschreibt Szenario 2 der BWP-Branchenstudie 2011 [BWP11]. Bis 2030 sind demnach rund 3,5 Millionen Elektrowärmepumpen im Einsatz. Der Strombedarf der Elektrowärmepumpen steigt auf 16,8 TWh im Jahr 2030 (**Bild 3.5**).

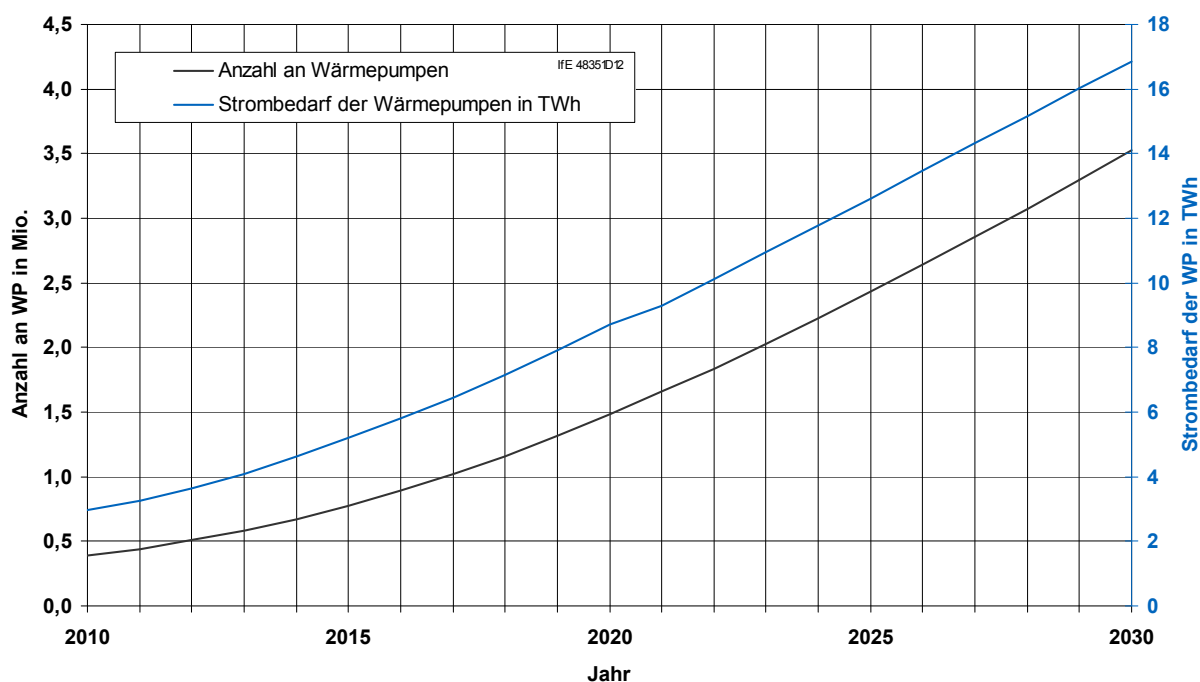


Bild 3.5: Anzahl und Strombedarf der Wärmepumpen im Szenario 2 der BWP-Branchenprognose bis 2030 [BWP11]

Zur Definition der im folgenden Kapitel dargestellten Szenarios sind Angaben zum Strombedarf der Wärmepumpen notwendig. Die entsprechenden Daten der zugrunde liegenden Studien sind in **Tabelle 3.2** aufgeführt.

Tabelle 3.2: Strombedarf der Wärmepumpen nach Quellen

	Szenario	2011	2020	2030
Strombedarf der Wärmepumpen in TWh/a	BMU ¹⁾	3,1	7,1	11,3
	BEE ²⁾	3,1	7,1	11,3
	BWP	3,3	8,7	16,8
Anzahl an Wärmepumpen	BWP	442.471	1.481.141	3.529.649

1) Strom für Wärmepumpen, nur Werte für 2010, 2015, 2020, 2025 und 2030, dazwischen linear interpoliert.

2) keine Angaben; Annahme wie BMU.

3.3 Szenariodefinitionen

Es werden insgesamt vier Szenarios gerechnet: das „Szenario BMU“ und das „Szenario BEE“ mit den in Tabelle 3.1 genannten Rahmendaten jeweils mit forciertem Wärmepumpenausbau laut BWP-Branchenstudie 2011 sowie zum Vergleich jeweils ein Szenario ohne weiteren Wärmepumpenausbau, wobei der Wärmepumpenbestand des Jahres 2011 laut BWP-Branchenstudie 2011 als konstant angenommen wird. Entsprechende Werte für den Strombedarf der Wärmepumpen in den Szenarios sind in **Tabelle 3.3** angegeben.

Tabelle 3.3: Strombedarf der Wärmepumpen und dessen Anteil am gesamten Strombedarf nach Szenario

Jahr	Größe	Einheit	BMU mit WP-Bestand 2011	BMU mit WP-Ausbau	BEE mit WP-Bestand 2011	BEE mit WP-Ausbau
2011	Strombedarf der Wärmepumpen	TWh/a	3,3	3,3	3,3	3,3
	Anteil der Wärmepumpen am Strombedarf	%	0,62	0,62	0,62	0,62
2020	Strombedarf der Wärmepumpen	TWh/a	3,3	8,7	3,3	8,7
	Anteil der Wärmepumpen am Strombedarf	%	0,66	1,74	0,68	1,79
2030	Strombedarf der Wärmepumpen	TWh/a	3,3	16,8	3,3	16,8
	Anteil der Wärmepumpen am Strombedarf	%	0,71	3,58	0,70	3,54

Szenario BMU

Im Szenario BMU werden die Stromnachfrage sowie die gesetzte Erzeugung aus erneuerbaren Energien und KWK laut Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie 2011 angenommen. Die gesamten CO₂-Emissionen der Stromerzeugung werden ebenfalls auf die für Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie angegebenen Emissionsmengen begrenzt. Für den CO₂-Zertifikatehandel sind dabei nur die direkten Emissionen der Stromerzeugung relevant. Da die Emissionen bei Kraftwerksanfahrvorgängen nicht modellendogen abgebildet werden, werden diese mit 2 % der Gesamtemissionen abgeschätzt. Die Emissionen der fossilen KWK-Anlagen werden mithilfe der so genannten „finnischen Methode“ abgeschätzt. In **Tabelle 3.4** sind die nach Abzug der Emissionen der fossilen KWK und der Anfahrvorgänge noch verbleibenden maximalen Emissionsmengen der frei disponierbaren Kraftwerke aufgeführt.

Im Szenario BMU soll der Ausbau des Wärmepumpenbestandes laut BWP-Branchenstudie 2011 betrachtet werden (16,8 TWh im Jahr 2030). Dazu wird zunächst der Strombedarf des Wärmepumpenbestandes laut Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie von der verwendeten Stromnachfrage abgezogen. Der Strombedarf der Wärmepumpen wird dazu mit dem entsprechend skalierten charakteristischen Lastprofil der Wärmepumpen (Bild 3.4) modelliert. Anschlie-

ßend wird unter Verwendung desselben charakteristischen Lastprofils der Strombedarf des Wärmepumpenbestandes laut BWP-Branchenstudie 2011 zur Stromnachfrage addiert.

Tabelle 3.4: CO₂-Emissionsgrenzen der Stromerzeugung im Szenario BMU

<i>in Mio. t</i>	2011	2020	2030
Max. Emissionsmenge laut BMU Szenario 2011 A	273	153	95
Emissionen der fossilen KWK	27	33	28
Emissionen der Anfahrvorgänge	5	3	2
Max. Emissionen der frei disponierbaren Erzeugung	241	117	65

Zum Vergleich wird ein Szenario ohne einen weiteren Wärmepumpenausbau betrachtet. Wie oben beschrieben wird dazu ebenfalls die verwendete Stromnachfrage um den Strombedarf des Wärmepumpenbestandes laut BMU-Leitstudie bereinigt. Anschließend wird zur verbleibenden Stromnachfrage in allen Jahren der Strombedarf eines ab dem Jahr 2011 konstant angenommenen Wärmepumpenbestandes laut BWP-Branchenstudie (3,26 TWh) addiert, wobei wieder das charakteristische Lastprofil entsprechend skaliert wird.

Szenario BEE

Im Gegensatz zum Szenario BMU wird im Szenario BEE die Stromnachfrage laut BEE-Stromszenario 2030 [BEE12] betrachtet. Ebenso wird auch die gesetzte Erzeugung aus erneuerbaren Energien diesem Szenario entnommen. Die Erzeugung der fossilen KWK-Anlagen ist im BEE-Stromszenario hingegen nicht direkt angegeben. Da die regenerative KWK-Erzeugung aus Biomasse- und Geothermieanlagen gegenüber dem Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie deutlich höher ausfällt, wird im Szenario BEE angenommen, dass die fossile KWK-Erzeugung um den entsprechenden Differenzbetrag reduziert wird. Die gesamte KWK-Erzeugung (fossil und regenerativ) ist demnach in den Szenarios BMU und BEE gleich hoch.

Die Begrenzung der gesamten CO₂-Emissionen der Stromerzeugung erfolgt auch in diesem Szenario anhand der maximalen Emissionsmengen laut Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie 2011. Auch die Emissionen bei Anfahrvorgängen sowie die Emissionen der fossilen KWK werden auf die gleiche Weise abgeschätzt. Da die Erzeugung aus fossilen KWK-Anlagen im Szenario BEE wie beschrieben niedriger ausfällt, ergeben sich gegenüber Szenario BMU etwas höhere Werte für die maximal zulässigen Emissionen der frei disponierbaren Erzeugung (**Tabelle 3.5**).

Tabelle 3.5: CO₂-Emissionsgrenzen der Stromerzeugung im Szenario BEE

<i>in Mio. t</i>	2011	2020	2030
Max. Emissionsmenge laut BMU Szenario 2011 A	273	153	95
Emissionen der fossilen KWK	26	31	20
Emissionen der Anfahrvorgänge	5	3	2
Max. Emissionen der frei disponierbaren Erzeugung	241	119	73

Im Szenario BEE wird ebenfalls der Ausbau des Wärmepumpenbestandes laut BWP-Branchenstudie 2011 betrachtet und zum Vergleich ein Szenario mit konstantem Wärmepumpenbestand auf dem Niveau des Jahres 2011 gerechnet. Ausgehend von der verwendeten Stromnachfrage laut BEE Stromszenario 2030 erfolgt die Bestimmung der Stromnachfragen für diese beiden Varianten analog zum oben beschriebenen Vorgehen für Szenario BMU.

3.4 Ergebnisse

Ergebnisse im Szenario BMU

Nach der vorrangigen Einspeisung der gesetzten Erzeugung aus erneuerbaren Energien und wärmegeführten KWK-Anlagen verbleibt die sogenannte residuale Last. Sie stellt den Teil der ursprünglichen Stromnachfrage dar, der noch durch die frei disponierbaren konventionellen Kraftwerke gedeckt werden muss. Durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien kann es zeitweise zu Überschusssituationen kommen, wenn die gesetzte Einspeisung die Stromnachfrage übersteigt (Werte im Bereich der negativen Ordinatenachse). Diese Überschüsse können zunächst nicht genutzt werden. Nur durch den Einsatz von Energiespeichern können diese Überschüsse in das Stromsystem integriert werden. **Bild 3.6** zeigt die geordneten Jahresdauerlinien der Residuallast für das Szenario BMU. Im Jahr 2030 verbleibt nur noch in knapp 6000 Stunden eine positive Residuallast.

Bild 3.7 zeigt die Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen und des spezifischen Primärenergiebedarfs der Stromerzeugung im Szenario BMU als Ergebnis der Optimierung.

Aufgrund der hohen erneuerbaren Einspeisung bleiben die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in den meisten Jahren deutlich unterhalb der maximal erlaubten Emissionsmengen, wie **Tabelle 3.6** zeigt. Der CO₂-Zertifikatspreis ist damit mit wenigen Ausnahmen 0 €. Im Jahr 2030 wird die Emissionsgrenze hingegen erreicht und der CO₂-Preis beträgt ca. 44 €.

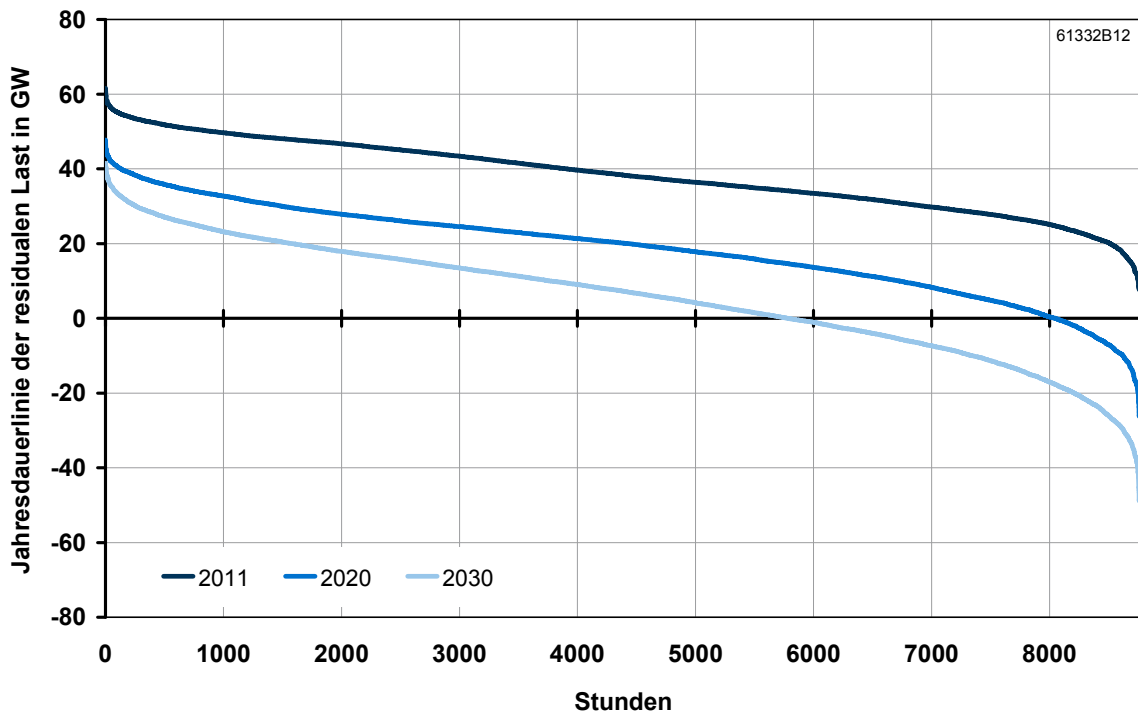


Bild 3.6: Jahresdauerlinien der residualen Last im Szenario BMU (ohne Speicherung)

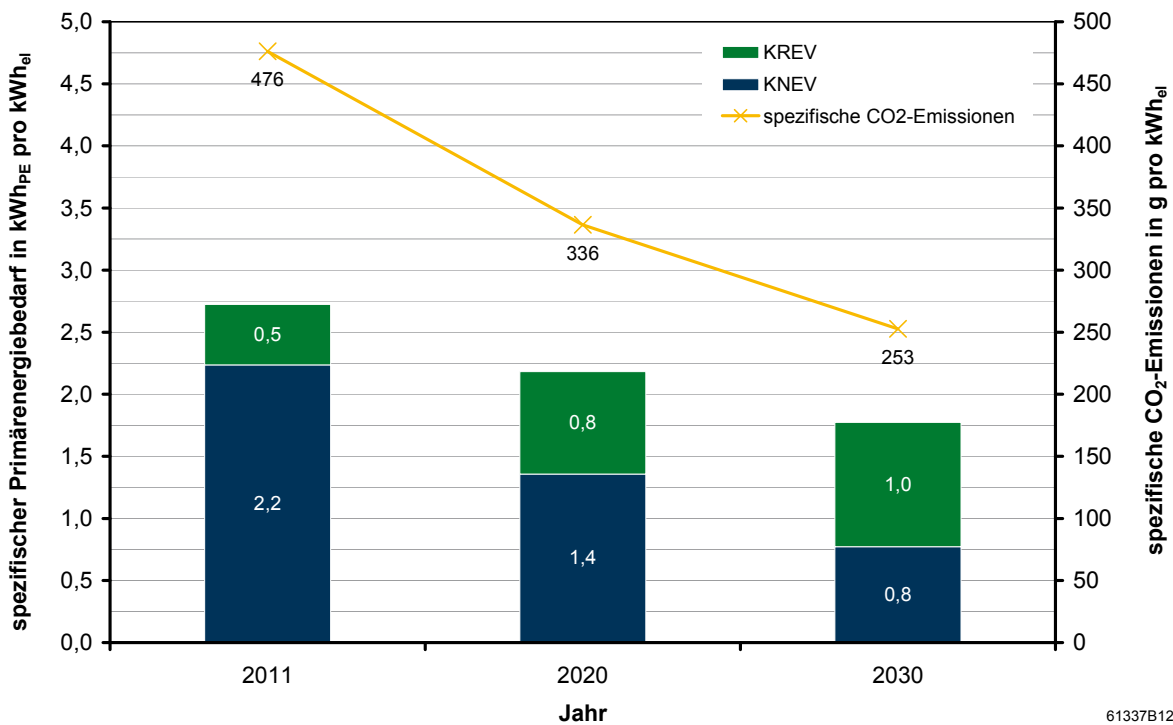


Bild 3.7: Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen und des spezifischen Primärenergiebedarfs der Stromerzeugung im Szenario BMU mit WP-Ausbau

Tabelle 3.6: Maximal zulässige Emissionen der frei disponierbaren Stromerzeugung und resultierende Emissionen der Optimierung im Szenario BMU

<i>Emissionen in Mio. t</i>	2011	2020	2030
Maximal zulässige Emissionen der frei disponierbaren Erzeugung	241	117	65
Emissionen laut Optimierungsergebnis	182	102	65

Ergebnisse im Szenario BEE

Bild 3.8 zeigt die geordneten Jahresdauerlinien der Residuallast für das Szenario BEE. Aufgrund des noch stärkeren Ausbaus der erneuerbaren Energien in diesem Szenario sinkt die Anzahl der Stunden mit positiver Residuallast im Jahr 2030 auf knapp 5000 Stunden und damit auf etwa 1000 Stunden weniger als im Szenario BMU ab.

Bild 3.9 zeigt die Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen und des spezifischen Primärenergiebedarfs der Stromerzeugung im Szenario BEE als Ergebnis der Optimierung.

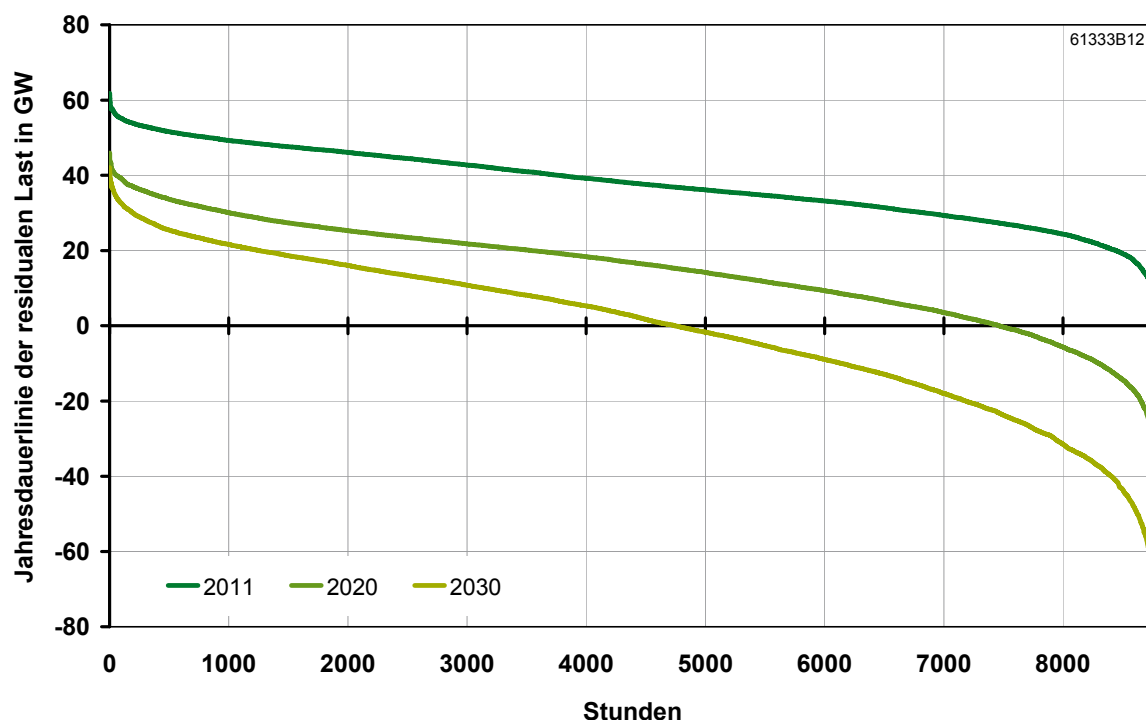
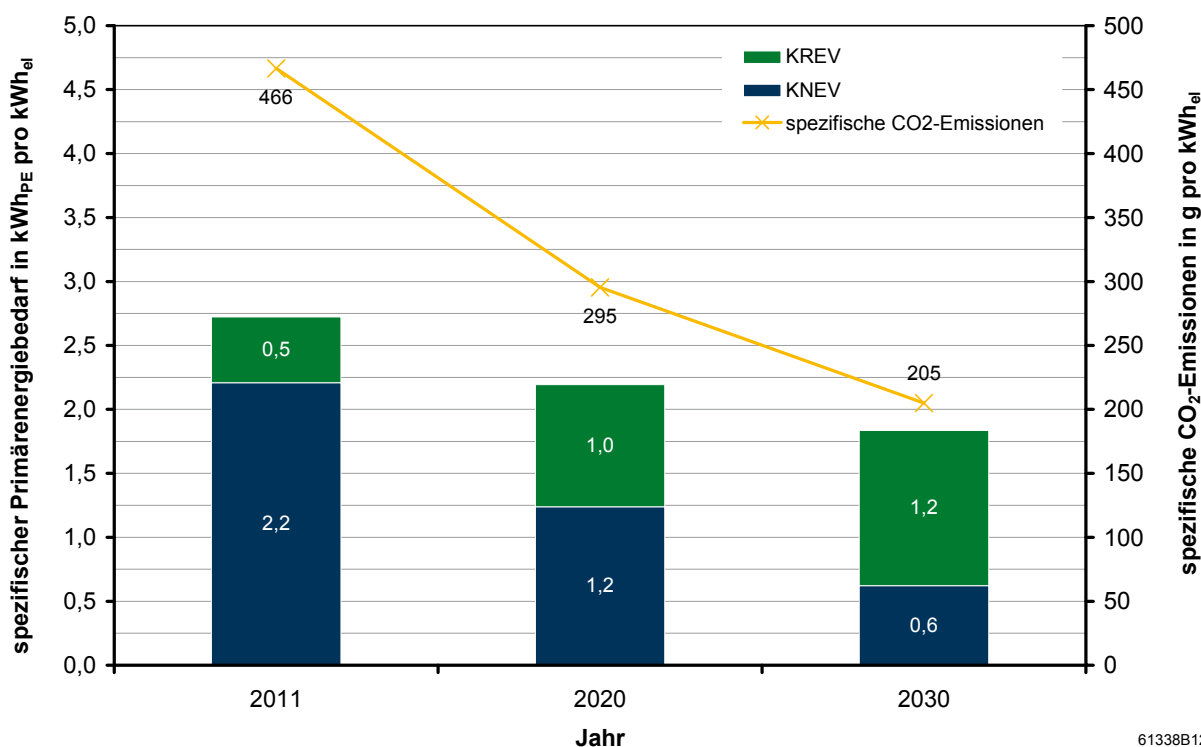


Bild 3.8: Jahresdauerlinien der residualen Last im Szenario BEE (ohne Speicherung)

Tabelle 3.7 zeigt, dass aufgrund der hohen erneuerbaren Einspeisung die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung hier in allen Jahren deutlich unterhalb der maximal erlaubten Emissionsmengen bleiben. Der CO₂-Zertifikatspreis ist damit stets 0 €.



61338B12

Bild 3.9: Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen und des spezifischen Primärenergiebedarfs der Stromerzeugung im Szenario BEE mit WP-Ausbau

Tabelle 3.7: Maximal zulässige Emissionen der frei disponierbaren Stromerzeugung und resultierende Emissionen der Optimierung im Szenario BEE

<i>Emissionen in Mio. t</i>	2011	2020	2030
Maximal zulässige Emissionen der frei disponierbaren Erzeugung	241	119	73
Emissionen laut Optimierungsergebnis	178	81	52

Vergleich der Szenarios BMU und BEE

Der forcierte Ausbau der Wärmepumpennutzung laut BWP-Branchenstudie 2011 in den beiden Szenarios BMU und BEE wurde jeweils mit einem Szenario mit stagnierendem Wärmepumpenbestand auf dem Niveau von 2011 verglichen. Dieser Vergleich lässt auf den Einfluss schließen, den eine Steigerung der Wärmepumpenzahlen in Zukunft auf den Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen der Energieversorgung haben kann.

Der im Vergleich zu einem stagnierenden Wärmepumpenbestand höhere Strombedarf bei einem Wärmepumpenausbau führt sowohl im Szenario BMU als auch im Szenario BEE zunächst zu einer verbesserten Nutzung der gesetzten Einspeisung aus erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). So kann ein Teil der sonst überschüssigen Energiemengen durch die zusätzlichen Wärmepumpen genutzt werden (**Bild 3.10**). Im Jahr 2011 treten in beiden Szenarios noch keine Überschüsse aus gesetzter Einspeisung auf. Trotz des Ausbaus der

Wärmepumpen bleiben im Jahr 2030 noch Überschüsse in Höhe von 27,5 TWh (Szenario BMU) bzw. 63,9 TWh (Szenario BEE) ungenutzt. Der Anteil des durch den Ausbau der Wärmepumpen zusätzlich integrierten Überschussstroms aus EE und KWK beträgt gemessen am zusätzlichen Strombedarf der Wärmepumpen von 13,5 TWh im Jahr 2030 39 % (Szenario BMU) bzw. 50 % (Szenario BEE).

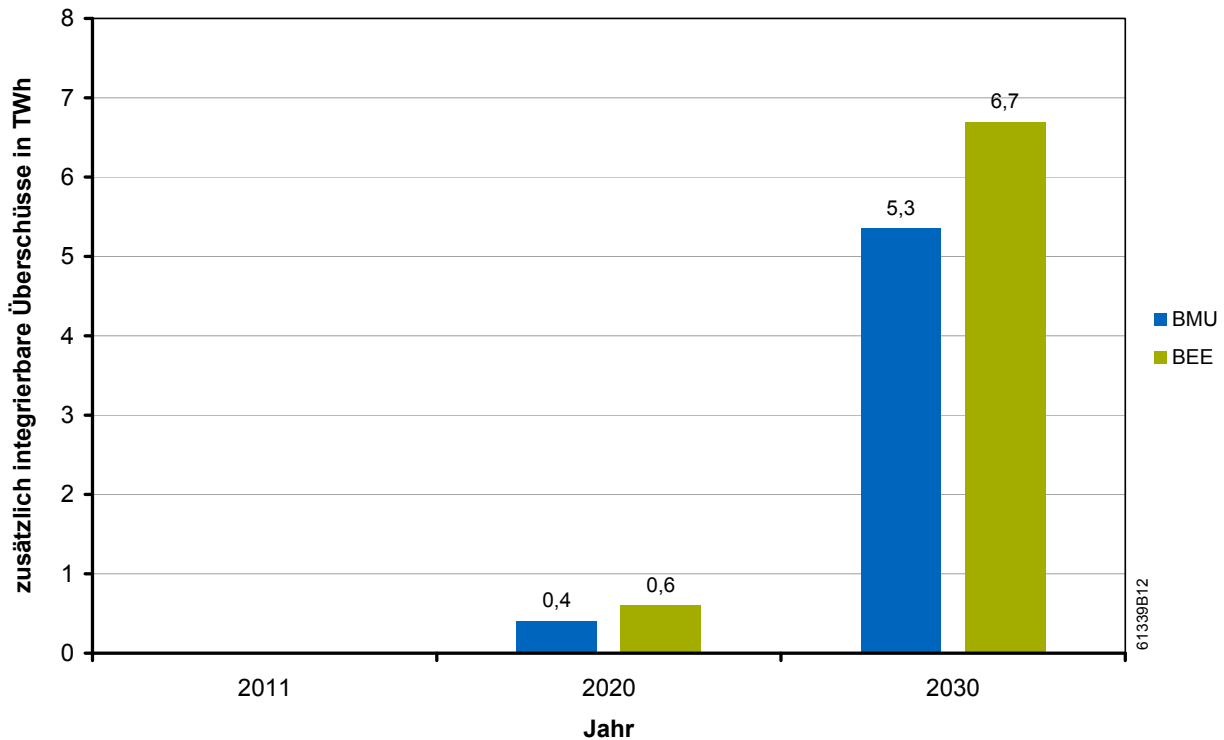


Bild 3.10: Zusätzlich integrierbare Überschüsse aus EE und KWK beim Ausbau der Wärmepumpennutzung

Die in Szenario 2011 A der BMU-Leitstudie 2011 vorgegebenen maximalen CO₂-Emissionsmengen werden bei einem angenommenen Ausbau der Wärmepumpen in beiden Szenarios praktisch nicht erreicht. Dadurch stellen die Emissionsziele bei einem stagnierenden Wärmepumpenbestand und damit niedrigerer Stromnachfrage erst recht keine Begrenzung dar. Der erhöhte Strombedarf für zusätzliche Wärmepumpen wird neben den überschüssigen Mengen aus erneuerbaren Energien und KWK auch durch konventionelle Kraftwerke gedeckt. Da ausreichend Emissionszertifikate vorhanden sind (CO₂-Preis 0 €), haben die Emissionen keinen Einfluss auf die Preisbildung der Stromerzeugung. Unabhängig von den spezifischen Emissionen wird damit vorzugsweise die günstigste konventionelle Erzeugungstechnologie genutzt. Nach dem Kernenergieausstieg sind dies in erster Linie Braunkohlekraftwerke. Der leicht erhöhte Strombedarf durch den Wärmepumpenausbau führt bei einer verursachergerechten Betrachtung zu einem Anstieg der Emissionen im Bereich der Stromerzeugung. Gleichzeitig werden durch die elektrische Wärmebereitstellung Emissionen im Wärmesektor substituiert.

Die folgenden Bilder (**Bild 3.11**, **Bild 3.12** und **Bild 3.13**) zeigen die Struktur der Stromerzeugung für die Betrachtungsjahre 2011, 2020 und 2030 für die beiden Szenarios BMU und BEE. Dabei wird der Strommix im Fall eines auf dem Niveau des Jahres 2011 stagnierenden Wärmepumpenbestandes mit dem Fall des forcierten Ausbaus der Wärmepumpennutzung laut BWP-Branchenstudie 2011 untersucht. Für das Jahr 2011 sind die Wärmepumpenbestände definitiv onsgemäß gleich und auch zwischen den beiden Szenarios BMU und BEE sind noch kaum Unterschiede zu erkennen. Der Anteil der erneuerbaren Erzeugung ist im Szenario BEE nur geringfügig höher.

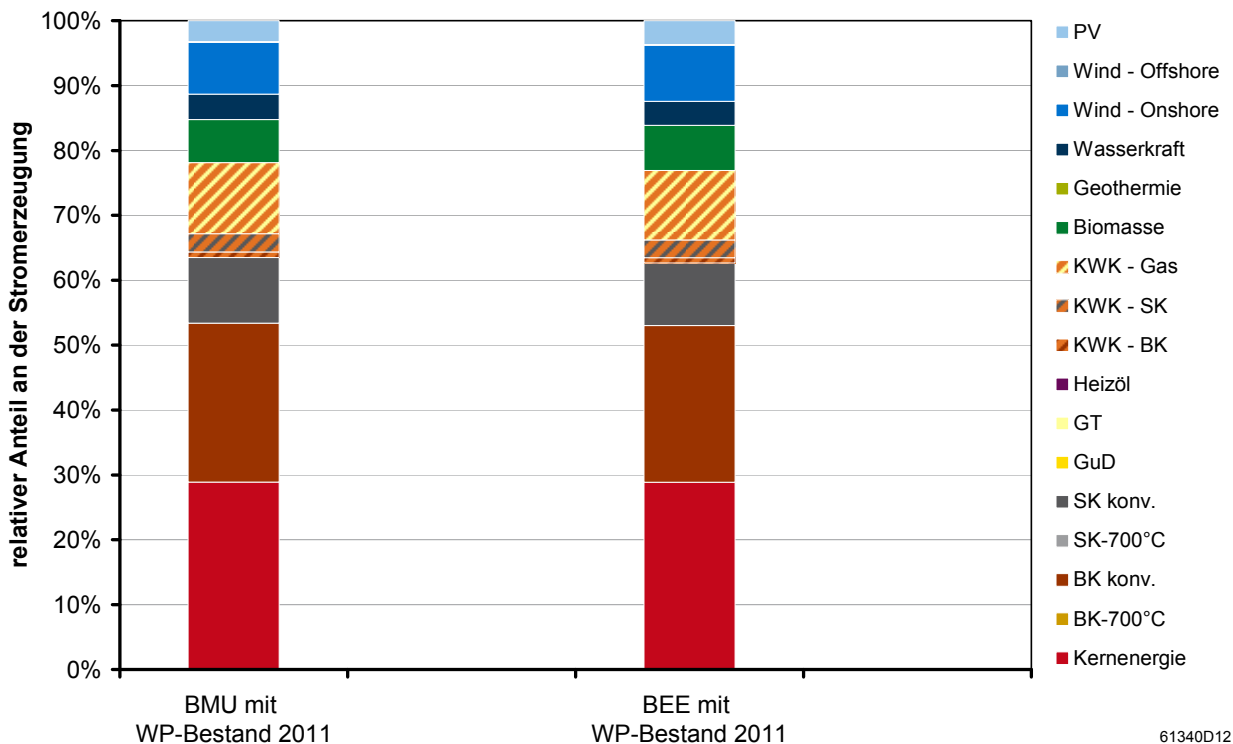


Bild 3.11: Strommix im Jahr 2011 in den Szenarios BMU und BEE

Zwar werden durch den Ausbau der Wärmepumpen prinzipiell zusätzlich erneuerbare Energien genutzt (Bild 3.10), allerdings ist in Bild 3.12 für das Betrachtungsjahr 2020 zu erkennen, dass sowohl im Szenario BMU als auch im Szenario BEE anteilmäßig auch die konventionelle Erzeugung zunimmt. Während im BMU-Szenario neben der Stromerzeugung aus Braunkohle hauptsächlich der Anteil der Stromerzeugung aus Steinkohle zunimmt, geht im BEE-Szenario die Erzeugung aus Steinkohle anteilmäßig leicht zurück und die Stromerzeugung aus Braunkohle steigt an.

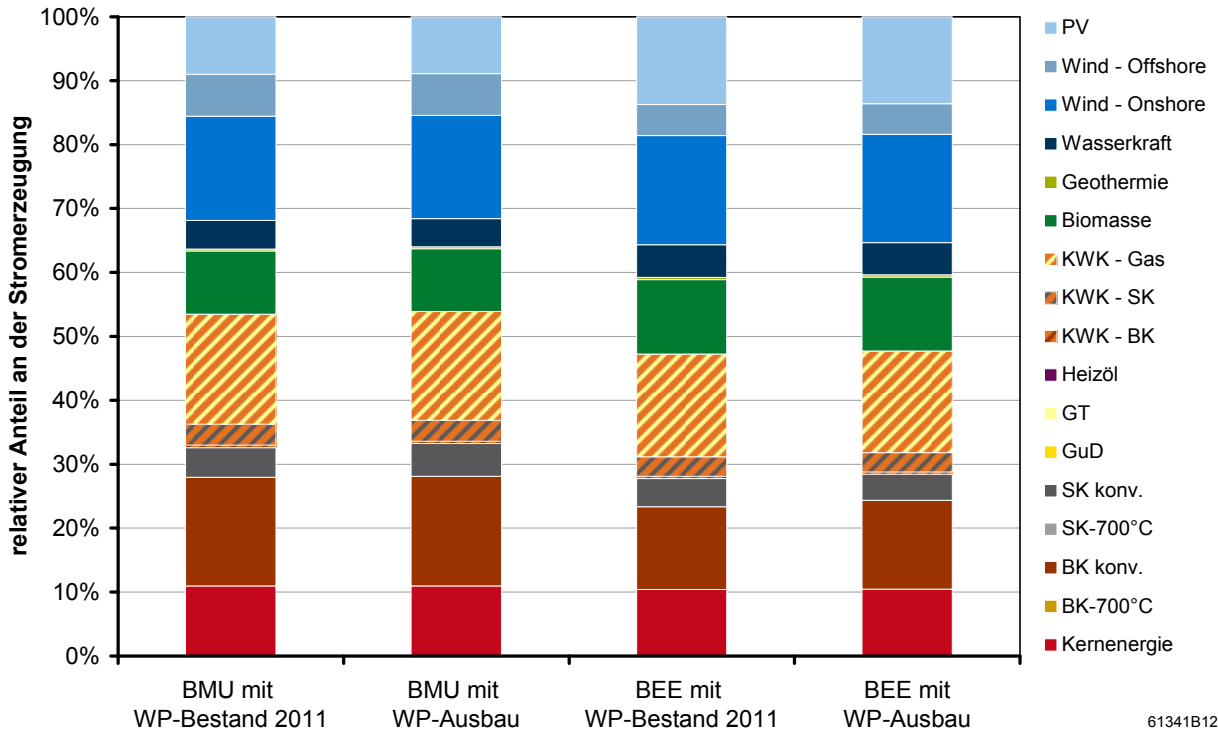


Bild 3.12: Strommix im Jahr 2020 in den Szenarios BMU und BEE mit Stagnation und mit Ausbau des Wärmepumpenbestands

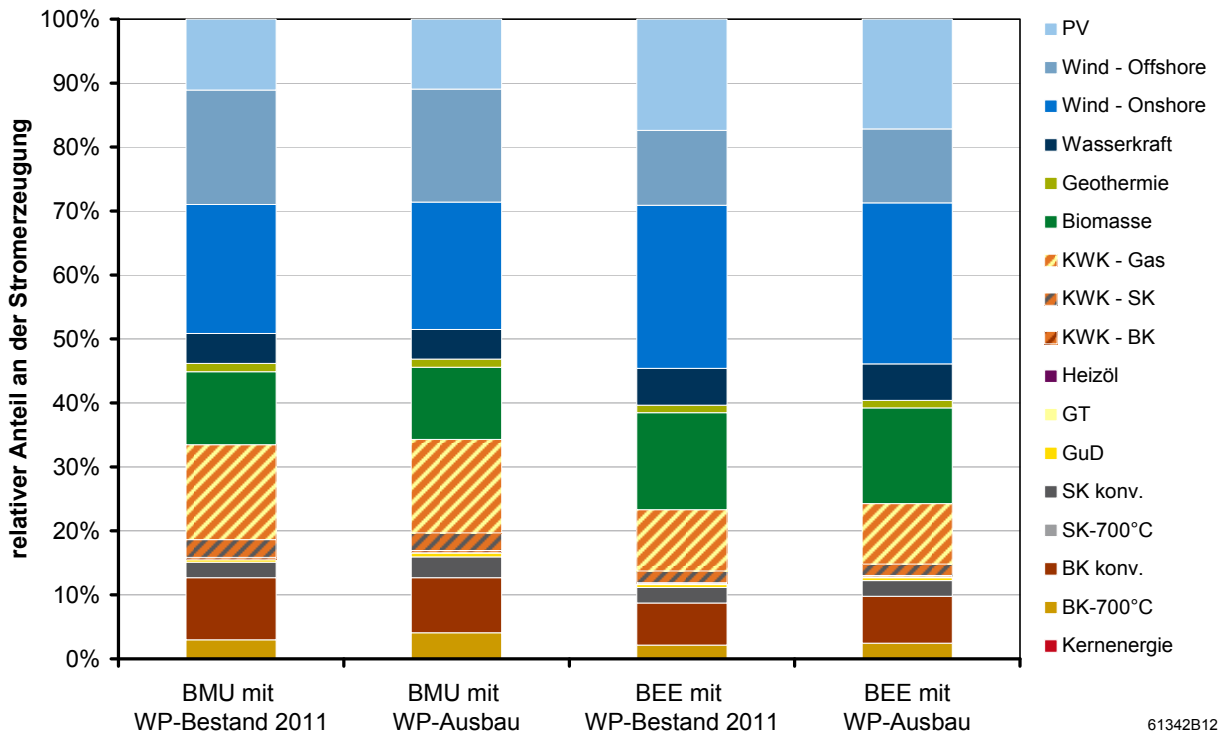


Bild 3.13: Strommix im Jahr 2030 in den Szenarios BMU und BEE mit Stagnation und mit Ausbau des Wärmepumpenbestands

Im Jahr 2030 werden bei einer verursachergerechten Betrachtung die durch den Wärmepumpenausbau bewirkten Unterschiede im Strommix deutlicher. Wiederum nimmt sowohl im Szenario BMU als auch im Szenario BEE der Anteil der konventionellen Stromerzeugung bei einem Ausbau der Wärmepumpen zu. Da im BMU-Szenario im Jahr 2030 die CO₂-Obergrenze erreicht wird, muss die Stromerzeugung im Hinblick auf geringere Emissionen umgestaltet werden. Im Vergleich zur Situation mit einem stagnierenden Wärmepumpenbestand werden neben Steinkohlekraftwerken deshalb verstärkt die effizienteren und damit emissionsärmeren 700 °C-Braunkohlekraftwerke eingesetzt, während der Anteil der Erzeugung konventioneller Braunkohlekraftwerke sinkt. Der Anteil der Erzeugung aus GuD-Kraftwerken steigt ebenfalls an.

Demgegenüber steigt im Szenario BEE durch den Wärmepumpenausbau anteilmäßig hauptsächlich die Erzeugung konventioneller Braunkohlekraftwerke. Aufgrund der geringeren zu erwartenden Ausnutzungsdauern für Grundlastkraftwerke (Bild 3.8) werden im BEE-Szenario tendenziell weniger 700°C-Braunkohlekraftwerke gebaut, da deren Investitionskosten höher sind als bei konventionellen Braunkohlekraftwerken. Die Begrenzung der Emissionen spielt im Szenario BEE wie bereits erwähnt keine Rolle.

4 Fazit

Im Gebäudebestand weisen sowohl die Sole/Wasser-Wärmepumpe als auch die Luft/Wasser-Wärmepumpe gegenüber erdgas- und heizölbefeuerten Systemen einen deutlichen Vorteil bei der Inanspruchnahme nicht-regenerativer Primärenergieressourcen auf. Auf Basis des aktuellen Stromerzeugungsmix betragen die Einsparungen schon heute 41 % bis 52 % gegenüber einem alten Niedertemperaturkessel. Im Neubau können gegenüber einem Gas-/Öl-Brennwertgerät mit solarer Trinkwassererwärmung immerhin noch 30 % bis 43 % nicht-regenerative Primärenergie eingespart werden. Entsprechend ergeben sich Reduktionen der CO₂-Emissionen zwischen 14 % und 45 %.

Bei weiterhin stark steigenden Anteilen erneuerbarer Energien in der Stromversorgung werden bereits heute installierte Elektrowärmepumpen im Jahr 2030 im Gebäudebestand und im Neubau rund 73 % bis 83 % weniger an nicht-regenerativer Primärenergie benötigen als erdgas- oder heizölbefeuerte Anlagen. Dies ist mit einer Minderung des CO₂-Ausstoßes zwischen 56 % und 78 % verbunden.

Anhand von Szenariorechnungen wurden die Auswirkungen eines Ausbaus von Elektrowärmepumpen auf die Struktur und den Einsatz des Kraftwerksparks zur Stromerzeugung untersucht. Dabei wird von einem Zubau an Elektrowärmepumpen von derzeit rund 0,4 Millionen auf 3,5 Millionen installierte Anlagen im Jahr 2030 ausgegangen. Der zusätzliche Jahresstrombedarf beträgt dann rund 13,5 TWh, womit der Strombedarf aller Wärmepumpen rund 3,5 % des Gesamtstrombedarfs in Deutschland ausmacht. Entsprechend dieses kleinen Anteils fallen die Rückwirkungen auf den Erzeugungsmix gering aus.

Das zugrunde gelegte Lastprofil für die Wärmepumpen enthält eine temperaturabhängige aber

annähernd gleichmäßige Verteilung des Strombedarfs über den Tag. Entsprechend wird der Strombedarf der Wärmepumpen tendenziell durch den Einsatz von Grundlastkraftwerken, d. h. insbesondere von Kohlekraftwerken bereitgestellt. Obwohl CO₂-Emissionen und Primärenergieeinsatz im Stromsektor durch den Ausbau der Wärmepumpen zunehmen, ergeben sich für das gesamte Energiesystem deutliche Vorteile. So wird die Wärmebereitstellung konventioneller Heizgeräte substituiert und zusätzliche erneuerbare elektrische Energie im Wärmesektor genutzt.

Signifikant ist jedoch, dass im Jahr 2030 knapp 40 % (BMU Szenario) bzw. 50 % (BEE Szenario) dieses Strombedarfs aus der zusätzlichen Integration erneuerbarer Energien gedeckt werden. Ohne zusätzliche Wärmepumpen müssten Windkraftanlagen und PV-Anlagen im stärkeren Umfang abgeregelt werden.

Werden Wärmepumpen zukünftig im Rahmen eines Smart Grids in eine intelligente Steuerung von Stromverbrauchern einbezogen, so könnte das Dargebot an erneuerbaren Energien noch stärker genutzt werden und ein weiterer Beitrag zur Energiewende geleistet werden.

A Anhang

A.1 Abkürzungsverzeichnis

BEE	Bundesverband Erneuerbare Energie e. V.
BK	Braunkohle
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BW	Brennwert
BWP	Bundesverband Wärmepumpe e. V.
EE	Erneuerbare Energie
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GT	Gasturbinenkraftwerk
GuD	Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
JAZ	Jahresarbeitszahl
KEV	Kumulierter Energieverbrauch
KREV	Kumulierter regenerativer Energieverbrauch
KNEV	Kumulierter nicht-regenerativer Energieverbrauch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NT	Niedertemperatur
PE	Primärenergie
PV	Photovoltaik
SK	Steinkohle
TWE	Trinkwassererwärmung
WP	Wärmepumpe
WSchVO	Wärmeschutzverordnung

A.2 Kenndaten der betrachteten Gebäude und Systeme

Tabelle A.1: Einfamilienhaus 1990, Heizanlage 1990, Beheizung mit Erdgas und Heizöl

Gebäudebilanzierung in Anlehnung an DIN V 4701-10	Gebäude EFH_H (1990), Heizanlage 1990					
	Öl_NT			Gas_NT		
	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Bezugsfläche [m ²]	155,8					
Warmwasser						
Zirkulation	ja					
Solarkollektor	nein					
Trinkwasserwärmebedarf (an Zapfstelle) [kWh/(m ² *a)]	12,5					
Übergabe-, Verteil- und Speicherverluste [kWh/(m ² *a)]	13,7					
Wärmebereitstellung für Trinkwarmwasser [kWh/(m ² *a)]	26,2					
davon aus Solarkollektor [kWh/(m ² *a)]	0					
davon aus Heizanlage [kWh/(m ² *a)]	26,2					
Raumheizung						
Beheizungsart	Radiator					
Abluftanlage (ohne WRG)	nein					
Wärmeerzeuger	Öl-NT-Kessel				Gas-NT-Kessel	
Heizwärmebedarf (Raum) [kWh/(m ² *a)]	148,1					
Übergabe- und Verteilverluste [kWh/(m ² *a)]	5,8					
Wärmebereitstellung Heizanlage [kWh/(m ² *a)]	153,9					
Wärmebereitstellung						
Wärmelieferung Heizanlage [kWh/a]	28.047					
Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl	87%		87%			
Aufwandszahl Wärmeerzeuger	1,15		1,15			
Endenergieträger Wärme	Heizöl		Erdgas			
Endenergiebedarf Wärmebereitstellung [kWh_EE/a]	32.177		32.177			
Hilfsenergieträger	Strom_HH					
Endenergiebedarf Hilfsenergie [kWh_EE/a]	474		474			
Primärenergie						
Bezugsjahr	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Aufwandsfaktor KEV (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE] KEA_	1,19	1,18	1,18	1,15	1,15	1,17
Aufwandsfaktor KEV (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE] KEA_	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KNRA (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE] KNRA_	1,18	1,17	1,17	1,15	1,14	1,16
Aufwandsfaktor KNRA (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE] KNRA_	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Primärenergiebedarf (Wärme) [kWh_PE/a]	38.152	38.012	38.057	37.132	37.002	37.606
Primärenergiebedarf (Hilfsenergie) [kWh_PE/a]	1.298	1.032	842	1.298	1.032	842
Primärenergiebedarf (lokal erneuerbar) [kWh_PE/a]	0	0	0	0	0	0
Primärenergiebedarf gesamt [kWh_PE/a]	39.450	39.044	38.900	38.429	38.034	38.448
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [kWh_PE/a]	39.021	38.309	37.958	38.046	37.351	37.577
CO₂-Emissionen						
CO ₂ -Emissionsfaktor (Wärme) [g/kWh_EE] CO ₂ _ges_	313,2	310,1	308,3	225,4	223,5	225,0
CO ₂ -Emissionsfaktor (Hilfsenergie) [g/kWh_EE] CO ₂ _ges_	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionen (Wärme) [kg/a]	10.078	9.979	9.919	7.253	7.191	7.240
CO ₂ -Emissionen (Hilfsenergie) [kg/a]	268	159	121	268	159	121
CO₂-Emissionen gesamt [kg/a]	10.347	10.138	10.039	7.522	7.349	7.360

Tabelle A.2: Einfamilienhaus 1990, Heizanlage 2011, Beheizung mit Erdgas, Heizöl und Pellets

Gebäudebilanzierung in Anlehnung an DIN V 4701-10		Gebäude EFH_H (1990), Heizanlage 2011								
		Öl_BW			Gas_BW			Pellet		
		2011	2020	2030	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Bezugsfläche	[m ²]				155,8			155,8		
Warmwasser										
Zirkulation					ja			ja		
Solarkollektor					nein			nein		
Trinkwasserwärmebedarf (an Zapfstelle)	[kWh/(m ² *a)]				12,5			12,5		
Übergabe-, Verteil- und Speicherverluste	[kWh/(m ² *a)]				13,7			13,7		
Wärmebereitstellung für Trinkwarmwasser	[kWh/(m ² *a)]				26,2			26,2		
davon aus Solarkollektor	[kWh/(m ² *a)]				0			0		
davon aus Heizanlage	[kWh/(m ² *a)]				26,2			26,2		
Raumheizung										
Beheizungsart					Radiator			Radiator		
Abluftanlage (ohne WRG)					nein			nein		
Wärmeerzeuger		Öl-BW-Kessel			Gas-BW-Kessel			Pellet-Kessel		
Heizwärmebedarf (Raum)	[kWh/(m ² *a)]				148,1			148,1		
Übergabe- und Verteilverluste	[kWh/(m ² *a)]				5,8			5,8		
Wärmebereitstellung Heizanlage	[kWh/(m ² *a)]				153,9			153,9		
Wärmebereitstellung										
Wärmelieferung Heizanlage	[kWh/a]				28.047			28.047		
Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl		92%			92%			73%		
Aufwandszahl Wärmeerzeuger		1,08			1,08			1,37		
Endenergieträger Wärme		Heizöl			Erdgas			Pellet		
Endenergiebedarf Wärmebereitstellung	[kWh_EE/a]	30.336			30.336			38.424		
Hilfsenergieträger					Strom_HH			Strom_HH		
Endenergiebedarf Hilfsenergie	[kWh_EE/a]	474			474			932		
Primärenergie										
Bezugsjahr		2011	2020	2030	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Aufwandsfaktor KEV (Wärme)	[kWh_PE/kWh_EE]	1,19	1,18	1,18	1,15	1,15	1,17	1,10	1,09	1,09
Aufwandsfaktor KEV (Hilfsenergie)	[kWh_PE/kWh_EE]	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KNRA (Wärme)	[kWh_PE/kWh_EE]	1,18	1,17	1,17	1,15	1,14	1,16	0,08	0,06	0,04
Aufwandsfaktor KNRA (Hilfsenergie)	[kWh_PE/kWh_EE]	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Primärenergiebedarf (Wärme)	[kWh_PE/a]	35.970	35.838	35.880	35.008	34.885	35.454	42.338	41.843	41.947
Primärenergiebedarf (Hilfsenergie)	[kWh_PE/a]	1.298	1.032	842	1.298	1.032	842	2.552	2.030	1.657
Primärenergiebedarf (lokal erneuerbar)	[kWh_PE/a]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Primärenergiebedarf gesamt	[kWh_PE/a]	37.267	36.870	36.723	36.305	35.917	36.297	44.891	43.873	43.605
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar	[kWh_PE/a]	36.848	36.154	35.807	35.930	35.251	35.448	5.244	3.467	2.354
CO₂-Emissionen										
CO ₂ -Emissionsfaktor (Wärme)	[g/kWh_EE]	313,2	310,1	308,3	225,4	223,5	225,0	19,1	13,8	11,0
CO ₂ -Emissionsfaktor (Hilfsenergie)	[g/kWh_EE]	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionen (Wärme)	[kg/a]	9.502	9.408	9.351	6.838	6.779	6.825	736	530	421
CO ₂ -Emissionen (Hilfsenergie)	[kg/a]	268	159	121	268	159	121	528	312	238
CO₂-Emissionen gesamt	[kg/a]	9.770	9.567	9.472	7.107	6.938	6.946	1.264	842	658

Tabelle A.3: Einfamilienhaus 1990, Heizanlage 2011, Wärmepumpen

Gebäudebilanzierung in Anlehnung an DIN V 4701-10	Gebäude EFH_H (1990), Heizanlage 2011					
	Erdreich WP			Außenluft WP		
	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Bezugsfläche [m ²]	155,8					
Warmwasser						
Zirkulation	ja					
Solarkollektor	nein					
Trinkwasserwärmebedarf (an Zapfstelle) [kWh/(m ² *a)]	12,5					
Übergabe-, Verteil- und Speicherverluste [kWh/(m ² *a)]	13,7					
Wärmebereitstellung für Trinkwarmwasser [kWh/(m ² *a)]	26,2					
davon aus Solarkollektor [kWh/(m ² *a)]	0					
davon aus Heizanlage [kWh/(m ² *a)]	26,2					
Raumheizung						
Beheizungsart	Radiator					
Abluftanlage (ohne WRG)	nein					
Wärmeerzeuger	Sole/Wasser-WP			Luft/Wasser-WP		
Heizwärmebedarf (Raum) [kWh/(m ² *a)]	148,1					
Übergabe- und Verteilverluste [kWh/(m ² *a)]	5,8					
Wärmebereitstellung Heizanlage [kWh/(m ² *a)]	153,9					
Wärmebereitstellung						
Wärmelieferung Heizanlage [kWh/a]	28.047					
Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl	3,4		2,8			
Aufwandszahl Wärmeerzeuger	0,29		0,35			
Endenergieträger Wärme	Strom_HH					
Endenergiebedarf Wärmebereitstellung [kWh_EE/a]	8.177		9.876			
Hilfsenergieträger	Strom_HH					
Endenergiebedarf Hilfsenergie [kWh_EE/a]	333		333			
Primärenergie						
Bezugsjahr	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Aufwandsfaktor KEV (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE]	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KEV (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE]	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KNRA (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE]	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Aufwandsfaktor KNRA (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE]	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Primärenergiebedarf (Wärme) [kWh_PE/a]	22.405	17.817	14.547	27.059	21.519	17.569
Primärenergiebedarf (Hilfsenergie) [kWh_PE/a]	913	726	593	913	726	593
Primärenergiebedarf (lokal erneuerbar) [kWh_PE/a]	19.870	19.870	19.870	18.171	18.171	18.171
Primärenergiebedarf gesamt [kWh_PE/a]	43.188	38.413	35.009	46.143	40.416	36.333
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [kWh_PE/a]	18.808	11.506	6.570	22.562	13.802	7.881
CO₂-Emissionen						
CO ₂ -Emissionsfaktor (Wärme) [g/kWh_EE]	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionsfaktor (Hilfsenergie) [g/kWh_EE]	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionen (Wärme) [kg/a]	4.636	2.739	2.085	5.599	3.308	2.518
CO ₂ -Emissionen (Hilfsenergie) [kg/a]	189	112	85	189	112	85
CO₂-Emissionen gesamt [kg/a]	4.825	2.851	2.170	5.788	3.420	2.603

Tabelle A.4: Einfamilienhaus 2011, Heizanlage 2011, Beheizung mit Erdgas, Heizöl und Pellets

Gebäudebilanzierung in Anlehnung an DIN V 4701-10	Gebäude EFH_J (2011), Heizanlage 2011								
	Öl_BW+Solar			Gas_BW+Solar			Pellet		
	2011	2020	2030	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Bezugsfläche [m²]	155,8						155,8		
Warmwasser									
Zirkulation	ja						ja		
Solarkollektor	ja						nein		
Trinkwasserwärmebedarf (an Zapfstelle) [kWh/(m²*a)]	12,5						12,5		
Übergabe-, Verteil- und Speicherverluste [kWh/(m²*a)]	12,3						12,3		
Wärmebereitstellung für Trinkwarmwasser [kWh/(m²*a)]	24,8						24,8		
davon aus Solarkollektor [kWh/(m²*a)]	9,2						0		
davon aus Heizanlage [kWh/(m²*a)]	15,6						24,8		
Raumheizung									
Beheizungsart	Fussboden						Fussboden		
Abluftanlage (ohne WRG)	ja						ja		
Wärmeerzeuger	Öl-BW-Kessel			Gas-BW-Kessel			Pellet-Kessel		
Heizwärmebedarf (Raum) [kWh/(m²*a)]	35,1						35,1		
Übergabe- und Verteilverluste [kWh/(m²*a)]	1,3						1,3		
Wärmebereitstellung Heizanlage [kWh/(m²*a)]	36,4						36,4		
Wärmebereitstellung									
Wärmelieferung Heizanlage [kWh/a]	8.097						9.525		
Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl	96%			96%			73%		
Aufwandszahl Wärmeerzeuger	1,04			1,04			1,37		
Endenergieträger Wärme	Heizöl			Erdgas			Pellet		
Endenergiebedarf Wärmebereitstellung [kWh_EE/a]	8.405			8.405			13.050		
Hilfsenergieträger	Strom_HH						Strom_HH		
Endenergiebedarf Hilfsenergie [kWh_EE/a]	966			966			1.284		
Primärenergie									
Bezugsjahr	2011	2020	2030	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Aufwandsfaktor KEV (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE]	1,19	1,18	1,18	1,15	1,15	1,17	1,10	1,09	1,09
Aufwandsfaktor KEV (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE]	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KNRA (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE]	1,18	1,17	1,17	1,15	1,14	1,16	0,08	0,06	0,04
Aufwandsfaktor KNRA (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE]	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Primärenergiebedarf (Wärme) [kWh_PE/a]	9.966	9.929	9.941	9.699	9.666	9.823	14.379	14.211	14.247
Primärenergiebedarf (Hilfsenergie) [kWh_PE/a]	2.646	2.104	1.718	2.646	2.104	1.718	3.517	2.797	2.283
Primärenergiebedarf (lokal erneuerbar) [kWh_PE/a]	1.429	1.429	1.429	1.429	1.429	1.429	0	0	0
Primärenergiebedarf gesamt [kWh_PE/a]	14.041	13.463	13.088	13.774	13.199	12.970	17.896	17.008	16.530
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [kWh_PE/a]	12.054	11.145	10.565	11.799	10.895	10.466	3.919	2.485	1.546
CO₂-Emissionen									
CO ₂ -Emissionsfaktor (Wärme) [g/kWh_EE]	313,2	310,1	308,3	225,4	223,5	225,0	19,1	13,8	11,0
CO ₂ -Emissionsfaktor (Hilfsenergie) [g/kWh_EE]	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionen (Wärme) [kg/a]	2.633	2.607	2.591	1.895	1.878	1.891	250	180	143
CO ₂ -Emissionen (Hilfsenergie) [kg/a]	548	324	246	548	324	246	728	430	327
CO₂-Emissionen gesamt [kg/a]	3.180	2.930	2.837	2.442	2.202	2.137	978	610	470

Tabelle A.5: Einfamilienhaus 2011, Heizanlage 2011, Wärmepumpen

Gebäudebilanzierung in Anlehnung an DIN V 4701-10	Gebäude EFH_J (2011), Heizanlage 2011					
	Erdreich WP			Außenluft WP		
	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Bezugsfläche [m ²]	155,8					
Warmwasser						
Zirkulation	ja					
Solarkollektor	nein					
Trinkwasserwärmebedarf (an Zapfstelle) [kWh/(m ² *a)]	12,5					
Übergabe-, Verteil- und Speicherverluste [kWh/(m ² *a)]	12,3					
Wärmebereitstellung für Trinkwarmwasser [kWh/(m ² *a)]	24,8					
davon aus Solarkollektor [kWh/(m ² *a)]	0					
davon aus Heizanlage [kWh/(m ² *a)]	24,8					
Raumheizung						
Beheizungsart	Fussboden					
Abluftanlage (ohne WRG)	ja					
Wärmeerzeuger	Sole/Wasser-WP			Luft/Wasser-WP		
Heizwärmebedarf (Raum) [kWh/(m ² *a)]	35,1					
Übergabe- und Verteilverluste [kWh/(m ² *a)]	1,3					
Wärmebereitstellung Heizanlage [kWh/(m ² *a)]	36,4					
Wärmebereitstellung						
Wärmelieferung Heizanlage [kWh/a]	9.525					
Nutzungsgrad bzw. Jahresarbeitszahl	3,9		3,1			
Aufwandszahl Wärmeerzeuger	0,25		0,32			
Endenergieträger Wärme	Strom_HH					
Endenergiebedarf Wärmebereitstellung [kWh_EE/a]	2.424		3.034			
Hilfsenergieträger	Strom_HH					
Endenergiebedarf Hilfsenergie [kWh_EE/a]	685		685			
Primärenergie						
Bezugsjahr	2011	2020	2030	2011	2020	2030
Aufwandsfaktor KEV (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE]	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KEV (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE]	2,74	2,18	1,78	2,74	2,18	1,78
Aufwandsfaktor KNRA (Wärme) [kWh_PE/kWh_EE]	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Aufwandsfaktor KNRA (Hilfsenergie) [kWh_PE/kWh_EE]	2,21	1,35	0,77	2,21	1,35	0,77
Primärenergiebedarf (Wärme) [kWh_PE/a]	6.641	5.281	4.312	8.312	6.610	5.397
Primärenergiebedarf (Hilfsenergie) [kWh_PE/a]	1.878	1.493	1.219	1.878	1.493	1.219
Primärenergiebedarf (lokal erneuerbar) [kWh_PE/a]	7.102	7.102	7.102	6.492	6.492	6.492
Primärenergiebedarf gesamt [kWh_PE/a]	15.621	13.877	12.633	16.682	14.596	13.108
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [kWh_PE/a]	6.871	4.204	2.400	8.219	5.028	2.871
CO₂-Emissionen						
CO ₂ -Emissionsfaktor (Wärme) [g/kWh_EE]	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionsfaktor (Hilfsenergie) [g/kWh_EE]	567,0	335,0	255,0	567,0	335,0	255,0
CO ₂ -Emissionen (Wärme) [kg/a]	1.374	812	618	1.720	1.016	774
CO ₂ -Emissionen (Hilfsenergie) [kg/a]	389	230	175	389	230	175
CO₂-Emissionen gesamt [kg/a]	1.763	1.042	793	2.109	1.246	948

Tabelle A.6: Strommix im Jahr 2011 in den Szenarios BMU und BEE mit Stagnation und mit Ausbau des Wärmepumpenbestands (zu Bild 3.11)

<i>in %</i>		BMU mit WP-Bestand 2011	BMU mit WP-Ausbau	BEE mit WP-Bestand 2011	BEE mit WP-Ausbau
Stromerzeugung					
	Biomasse	6,6	6,6	7,0	7,0
	Geothermie	0,0	0,0	0,0	0,0
	KWK - BK	0,9	0,9	0,8	0,8
	KWK - SK	2,8	2,8	2,7	2,7
gesetzte Erzeugung	KWK - Gas	11,0	11,0	10,7	10,7
	PV	3,2	3,2	3,7	3,7
	Wasserkraft	3,9	3,9	3,7	3,7
	Wind - Onshore	8,0	8,0	8,7	8,7
	Wind - Offshore	0,1	0,1	0,1	0,1
	GT	0,0	0,0	0,0	0,0
	GuD	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK konv.	10,1	10,1	9,6	9,6
konventionelle Erzeugung	BK konv.	24,5	24,5	24,2	24,2
	Kernenergie	28,9	28,9	28,9	28,9
	Heizöl	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK-700°C	0,0	0,0	0,0	0,0
	BK-700°C	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle A.7: Strommix im Jahr 2020 in den Szenarios BMU und BEE mit Stagnation und mit Ausbau des Wärmepumpenbestands (zu Bild 3.12)

<i>in %</i>		BMU mit WP-Bestand 2011	BMU mit WP-Ausbau	BEE mit WP-Bestand 2011	BEE mit WP-Ausbau
Stromerzeugung					
	Biomasse	9,9	9,8	11,7	11,6
	Geothermie	0,3	0,3	0,3	0,3
	KWK - BK	0,4	0,4	0,3	0,3
	KWK - SK	3,3	3,3	3,1	3,0
gesetzte Erzeugung	KWK - Gas	17,2	17,0	16,0	15,9
	PV	9,0	8,9	13,7	13,6
	Wasserkraft	4,4	4,4	5,1	5,1
	Wind - Onshore	16,3	16,2	17,1	16,9
	Wind - Offshore	6,6	6,5	4,8	4,8
	GT	0,0	0,0	0,0	0,0
	GuD	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK konv.	4,7	5,1	4,4	4,1
konventionelle Erzeugung	BK konv.	17,0	17,1	12,9	13,9
	Kernenergie	11,0	11,0	10,4	10,4
	Heizöl	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK-700°C	0,0	0,0	0,0	0,0
	BK-700°C	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle A.8: Strommix im Jahr 2030 in den Szenarios BMU und BEE mit Stagnation und mit Ausbau des Wärmepumpenbestands (zu Bild 3.13)

<i>in %</i>		BMU mit WP-Bestand 2011	BMU mit WP-Ausbau	BEE mit WP-Bestand 2011	BEE mit WP-Ausbau
Stromerzeugung					
	Biomasse	11,4	11,3	15,1	14,9
	Geothermie	1,3	1,3	1,2	1,2
	KWK - BK	0,3	0,3	0,2	0,2
	KWK - SK	2,8	2,8	1,8	1,8
gesetzte Erzeugung	KWK - Gas	14,8	14,6	9,6	9,5
	PV	11,1	10,9	17,4	17,2
	Wasserkraft	4,7	4,6	5,8	5,7
	Wind - Onshore	20,2	19,9	25,5	25,2
	Wind - Offshore	17,9	17,7	11,7	11,6
	GT	0,1	0,1	0,2	0,2
	GuD	0,4	0,6	0,4	0,4
	SK konv.	2,4	3,2	2,4	2,4
konventionelle Erzeugung	BK konv.	9,7	8,6	6,6	7,3
	Kernenergie	0,0	0,0	0,0	0,0
	Heizöl	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK-700°C	0,0	0,0	0,0	0,0
	BK-700°C	3,0	4,1	2,1	2,4

A.3 Quellen

- [ATW12] atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Kernkraftwerke in Deutschland, Betriebsergebnisse 2011. Bonn 2012
- [BEE12] Bundesverband Erneuerbare Energie e. V.: Szenario zum Ausbau der erneuerbaren Energien und zur Entwicklung des Stromverbrauchs. Berlin, 25.05.2012
- [BMU11] Nitsch J., Pregger T., Naegler T., et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Studie im Auftrag des BMU, 2012
- [BWP11] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.: BWP-Branchenstudie 2011 - Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. Berlin, August 2011
- [BWP12] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.: Persönliche Information durch den BWP. Oktober 2012.
- [D4701] N. N.: DIN V 4701-10 - Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, August 2003
- [D18599] N. N.: DIN V 18599-1:2011-12 – Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Dezember 2011

- [EEWG] Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich EEWärmeG. Fassung 22.12.2011
- [EON12] E.ON Bayern: Temperaturabhängige Lastprofile (TLP) – HZ2. Aus: http://www.eon-bayern.com/pages/eby_de/Netz/Stromnetz/Netzzugang/Lastprofilverfahren/Temperaturabhaengige_Lastprofile/Waermepumpen_und_Direktheizung.xls am 20.07.2012
- [GEMIS] Fritsche U., Schmidt K.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Version 4.71. Ökoinstitut Darmstadt
- [IINAS12] Fritsche, U. Greß, H.: Der nichterneuerbare Primärenergieverbrauch des nationalen Strommix in Deutschland im Jahr 2011. IINAS, Darmstadt 2012
- [ISE11] Miara, Marek; Günther, Danny; Kramer, Thomas; Oltersdorf, Thore; Wapler, Jeanette: Wärmepumpen Effizienz - Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Fraunhofer ISE. Freiburg, 2011
- [KKH12] Kuhn, P.; Kühne, M.; Heilek C.: Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher; KW21 – Kraftwerke des 21. Jahrhunderts. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München. September 2012. Online-Veröffentlichung unter: <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1115629>