

CLIMATE CHANGE

10/2013

# **Strom- und Wärmever- sorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz- Standards**



# **Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards**

von

**Jens Schuberth  
Katja Tschetschorke**

Umweltbundesamt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4548.html>  
verfügbar.

ISSN 1862-4359

Durchführung  
der Studie: Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau

Abschlussdatum: September 2012

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet I 2.4 Energieeffizienz  
Jens Schuberth, Katja Tschetschorke

Dessau-Roßlau, Juli 2013

## **Kurzbeschreibung**

Die vorliegende Studie untersucht die ökologischen Auswirkungen und die Wirtschaftlichkeit verschiedener gängiger und innovativer Wärmeversorgungssysteme zur Versorgung einer Siedlung: mit Wärme für Heizung und Warmwasser sowie mit Strom für Haushalts- und Betriebsstrom und für die Straßenbeleuchtung.

Gebäudesanierungen verändern das Verhältnis von Strom- und Wärmebedarf. Der Bedarf an Wärme sinkt stärker als der Stromverbrauch, und der Anteil der Verteilverluste in Wärmenetzen steigt. Es stellt sich daher die Frage, ob es in Zukunft noch wirtschaftlich ist, Nah- und Fernwärmenetze zu bauen oder auszubauen.

Die End- und Primärenergiebedarfe, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) und die Kosten (Betriebs-, Verbrauchs- und Investitionskosten) für die verschiedenen Systeme werden sowohl grafisch als auch tabellarisch verglichen und bewertet. In einer Sensitivitätsanalyse werden steigende Energiepreise in die Jahresgesamtkosten einbezogen und die denkbare zukünftige Wirtschaftlichkeit der Systeme beurteilt. Eine weitere Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sich die Klimabilanz der Versorgungssysteme für Wärme und Strom ändert, wenn die Stromversorgung weniger klimaschädlich ist. Zudem werden die Kosten für Umweltschäden, so genannte externe Kosten, bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse internalisiert. In einer Gesamtbetrachtung der untersuchten Kriterien werden Empfehlungen für ökologische und wirtschaftliche Systeme ausgesprochen.

## **Abstract**

The underlying study analyses the ecologic impact and the economic efficiency of several conventional and innovative heat supply systems to provide a quarter heat for space and water heating and electricity for residential and commercial application and for street lighting.

Retrofits of buildings change the ratio of demands for electricity and heat. The demand for heat decreases more than the demand for electricity, and the share of distribution losses in heat grids rises. The question is if it is still economically efficient to build or extend local and long-distance district heating networks.

Demands for final and primary energy, greenhouse gas emissions and costs (for operation, energy consumption and investments) of the different systems are compared and rated both in charts and tables. A sensitivity analysis includes increasing energy purchasing costs and assesses the possible economic efficiency of the supply systems in future. Another sensitivity analysis estimates how the climate impact of the supply systems for heat and electricity changes if electricity generation becomes less harmful for climate. Additionally, costs for environmental damage – so-called external costs – are internalised in the analysis of economic efficiency. In an overall rating ecologic and economically efficient systems are recommended.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	10
Zusammenfassung .....	14
Summary .....	19
1 Einleitung und Ziele der Studie .....	25
2 Klimapolitische Ziele der Bundesregierung .....	26
3 Grundlagen.....	26
3.1 Siedlungstypologie .....	26
3.2 Begriffsbestimmungen.....	28
3.2.1 Energiestandards .....	28
3.2.2 Gebäudenutzfläche nach EnEV .....	29
3.2.3 Energiebezugsfläche nach PHPP und Wohnfläche.....	30
3.2.4 Heizwärmebedarf.....	30
3.2.5 Trinkwasserwärmebedarf.....	30
3.2.6 Heizenergiebedarf.....	30
3.2.7 Trinkwasser-Energiebedarf.....	30
3.2.8 Endenergiebedarf.....	30
3.2.9 Primärenergiebedarf und -faktoren.....	31
3.2.10 Emissionsfaktoren.....	31
3.3 Kennzahlen der Wärmeerzeuger .....	34
3.3.1 Leistungszahl.....	34
3.3.2 Jahresarbeitszahl.....	34
3.3.3 Anlagenaufwandszahl .....	34
3.3.4 Wirkungsgrad.....	34
3.3.5 Nutzungsgrad .....	34
3.4 Berechnung von Referenzlastprofilen für KWK-Anlagen.....	35
3.5 Berechnung der Nettostromerzeugung von BHKW.....	36
3.6 Allokationsmethode zur Berechnung der anteiligen Brennstoffeinsätze für Strom und Wärme von BHKW .....	36
3.7 Nahwärmenetze.....	39
3.7.1 Dimensionierung von Nahwärmenetzen .....	39
3.7.2 Berechnung von Netzwärmeverlusten .....	40
3.7.3 Berechnung Pumpenleistung und Pumpstrombedarf.....	40
3.8 Kosten.....	41

3.8.1	Methoden der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	42
3.8.2	Investitionskosten.....	43
3.8.3	Betriebsgebundene Kosten.....	45
3.8.4	Verbrauchsgebundene Kosten.....	45
3.8.5	Förderung nach dem KWKG.....	46
3.9	Externe Kosten.....	47
4	Untersuchungsgegenstand.....	48
4.1	Siedlungsgebiet „Linkenheim-Hochstetten“.....	48
4.2	Referenzgebäude.....	52
4.2.1	Geometrische und Energetische Parameter der Wohngebäude.....	52
4.2.2	Geometrische und Energetische Parameter der Nicht-Wohngebäude.....	53
4.3	Wärmeversorgungssysteme.....	55
4.3.1	Übersicht.....	55
4.3.2	Dezentrale Wärmeversorgungssysteme.....	56
4.3.3	Zentrale Wärmeversorgungssysteme.....	58
5	Ergebnisse.....	69
5.1	Vorbemerkungen.....	69
5.2	Energie.....	69
5.2.1	Endenergiebedarf.....	69
5.2.2	Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf.....	77
5.3	Emissionen.....	79
5.3.1	Treibhausgas-Emissionen.....	80
5.3.2	Treibhausgas-Emissionen bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromversorgung.....	82
5.3.3	Luftschadstoff-Emissionen.....	85
5.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	87
5.4.1	Investitionskosten.....	88
5.4.2	Betriebsgebundene Kosten.....	89
5.4.3	Verbrauchsgebundene Kosten (ohne Preissteigerung).....	90
5.4.4	Jahresgesamtkosten.....	92
5.4.5	Externe Kosten.....	102
6	Schlussfolgerungen.....	105
6.1	Allgemeines.....	105
6.2	Modellsiedlung.....	107
6.3	Versorgungssysteme.....	109

7	Ausblick.....	111
	Abkürzungsverzeichnis.....	113
	Symbolverzeichnis.....	115
	Literaturverzeichnis .....	118
	Anhang A: Referenzlastprofile der Nicht-Wohngebäude gemäß VDI 4655.....	125
	Anhang B: Berechnung der Nettostromerzeugung.....	127
	Anhang C: Berechnung der KWK-Vergütungen .....	129
	Anhang D: Netzwärmeverluste unterschiedlicher Rohrarten .....	132
	Anhang E: End- und Primärenergiebedarfe .....	133
	Anhang F: THG-Emissionen für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom (Sensitivitätsanalyse).....	136
	Anhang G: Luftschadstoff-Emissionen .....	139
	Anhang H: Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten, Jahresgesamtkosten .....	142
	Anhang I: Sensitivitätsanalyse verbrauchsgebundener Kosten.....	145
	Anhang J: Externe Kosten .....	149



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Siedlungstypen nach Roth.....	27
Abbildung 2:	Siedlungstypologien nach Erhorn-Kluttig u. a.....	28
Abbildung 3:	Wirtschaftliche Strömungsgeschwindigkeit .....	39
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Druck- und Differenzdruckverluste über die Wärmeübergabestation eines vom Heizwerk weit entfernten Abnehmers in Abhängigkeit des Durchflusses und der Außentemperatur.....	41
Abbildung 5:	Vergleich der Verlegekosten zwischen Deutschland und Finnland .....	44
Abbildung 6:	Spezifische Richtpreise (€/kW) in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung von Erdgas-BHKW .....	44
Abbildung 7:	Gemeinde Linkenheim-Hochstetten: rote Markierung grenzt das untersuchte Modellgebiet ein.....	49
Abbildung 8:	Siedlungsstruktur des untersuchten Modellgebietes .....	50
Abbildung 9:	Bilder der unsanierten Referenzgebäude Rathaus Löhne (links) und Josef-Zerhoch-Mittelschule (rechts).....	54
Abbildung 10:	Elektrische Wirkungsgrade in Abhängigkeit der elektrischen Leistung von Erdgas-BHKW .....	58
Abbildung 11:	Topographie der Nahwärmenetze, bestehend aus fünf Teilnetzen (RA = Rohrabschnitt).....	59
Abbildung 12:	Netzvariante 1 und 2: Wärmeverluste unterschiedlicher Rohrarten und Dämmstärken.....	61
Abbildung 13:	Doppelrohr.....	62
Abbildung 14:	Vergleich der relativen Netzwärmeverluste für Einzelrohre mit Standard-Dämmung und Doppelrohre mit 1-fach verstärkte Dämmung .....	63
Abbildung 15:	Energiebilanz der Netzwärmeverluste absolut und relativ zum Gesamtenergiebedarf des Modellgebietes .....	63
Abbildung 16:	Referenzlastprofil des Nahwärme-BHKW nach VDI 4655 für den unsanierten Gebäudebestand.....	64
Abbildung 17:	Referenzlastprofil des Nahwärme-BHKW nach VDI 4655 für die EnEV 2009-Siedlung.....	65
Abbildung 18:	Referenzlastprofil des Nahwärme-BHKW nach VDI 4655 für die Passivhaus-Siedlung.....	65
Abbildung 19:	Endenergiebedarf für Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) (MWh/a) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	70
Abbildung 20:	Zusammensetzung des Siedlungs-Endenergiebedarfes für Strom der BHKW-Varianten .....	71

Abbildung 21:	Endenergiebedarf für Wärme (MWh/a) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	72
Abbildung 22:	Gesamter Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) in MWh/a der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	74
Abbildung 23:	Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) in MWh pro Jahr der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	77
Abbildung 24:	Treibhausgas-Emissionen mit Vorkette (t pro Jahr) der Siedlung für Heizung, Warmwasser und Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) .....	80
Abbildung 25:	THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom (Sensitivitätsanalyse; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette (aktueller Strommix: 638,8 g/kWh) .....	84
Abbildung 26:	Luftschadstoff-Emissionen ohne Vorkette und Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Strom der Siedlung für ausgewählte Systeme; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen .....	86
Abbildung 27:	Investitionskosten (€) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	88
Abbildung 28:	Betriebsgebundene Kosten (€/a) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	90
Abbildung 29:	Verbrauchsgebundene Kosten der Siedlung für Heizung, Warmwasser und Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) (€/a); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	91
Abbildung 30:	Jahresgesamtkosten (€/a) ohne Preissteigerung der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	93
Abbildung 31:	Sensitivitätsanalyse - Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerung (0 %, 3 %, 5 %, 7 % p. a. ); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	96
Abbildung 32:	Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerungsrate von 3 % p.a. (Annuität, betriebsgebundene u. verbrauchsgebundene Kosten); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	97
Abbildung 33:	Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerungsrate von 5 % p.a. (Annuität, betriebsgebundene u. verbrauchsgebundene Kosten); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	98

Abbildung 34:	Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerungsrate von 7 % p.a. (Annuität, betriebsgebundene u. verbrauchsgebundene Kosten); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	99
Abbildung 35:	Jahresgesamtkosten (€/a) und externe Kosten (€/a) der Siedlung, sortiert nach sinkenden THG-Emissionen m. Vork.; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette .....	103
Abbildung 36:	Vergleich Jahresgesamtkosten untersuchten Systeme mit und ohne Internalisierung der externen Kosten (€/a); sortiert nach sinkenden Jahresgesamtkosten ohne externe Kosten .....	104
Abbildung 37:	Referenzlastprofil des Bürogebäudes für Heizung für den unsanierten Gebäudebestand .....	125
Abbildung 38:	Referenzlastprofil des Bürogebäudes für Heizung für den Energiestandard EnEV 2009 .....	125
Abbildung 39:	Referenzlastprofil der Mittelschule für Heizung für den unsanierten Gebäudebestand .....	126
Abbildung 40:	Referenzlastprofil der Mittelschule für Heizung für den Energiestandard EnEV 2009 .....	126

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der zentralen und dezentralen Wärmeversorgungssysteme .....	15
Tabelle 2:	Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung 2010 .....	26
Tabelle 3:	Primärenergiefaktoren .....	31
Tabelle 4:	Emissionsfaktoren (g/kWh) bezogen auf 1 kWh Endenergie.....	33
Tabelle 5:	Typtagkategorien nach VDI 4655 .....	35
Tabelle 6:	Übersicht der Anteile für eingespeisten und vor Ort verbrauchten Nettostrom der BHKW.....	38
Tabelle 7:	Wirkungsgrad-Referenzwerte und Korrekturfaktoren gemäß der Entscheidung der EU-Kommission 2007/74/EG und dem Durchführungsbeschluss der Europäischen Kommission vom 19.12.2011 .....	38
Tabelle 8:	Pumpstrombedarf (kWh/a) der verschiedenen Netzvarianten und Energiestandard .....	41
Tabelle 9:	Nutzungsdauer und Annuitätsfaktor verschiedener Kostenkomponenten.....	42
Tabelle 10:	Baupreisindizes nach DESTATIS .....	45
Tabelle 11:	Energiepreise 2012 (€/kWh) und Quellenangabe.....	45
Tabelle 12:	Energiepreise in 2031 für jährliche, inflationsbereinigte Preissteigerungsraten von 3 %, 5 % und 7 %.....	46
Tabelle 13:	KWK-Zuschlag nach § 4 Abs. 3 Satz 1 in Verbindung mit 7 Abs. 1 Satz 1 und Abs. 2 Satz 2 KWKG in der Fassung vom 19.07.2012.....	47
Tabelle 14:	Kostensätze für Umweltschäden (€/kWh) der Energieträger zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung.....	48
Tabelle 15:	Gegenüberstellung der Angaben von UBA 2010 und der in dieser Arbeit getroffenen Annahmen zur Anzahl der Gebäudetypen im Modellgebiet .....	51
Tabelle 16:	Ausgewählte geometrische Parameter der Referenzgebäude RH_H und MFH_H.....	52
Tabelle 17:	Energetische Parameter der Referenzgebäude RH_H und MFH_H.....	53
Tabelle 18:	Geometrische Parameter der Referenzgebäude Rathaus Löhne und Josef-Zerhoch-Mittelschule .....	54
Tabelle 19:	Energetische Parameter der Nicht-Wohngebäude .....	54
Tabelle 20:	Übersicht der ausgewählten dezentralen Wärmeversorgungssysteme für Einzelgebäude .....	55
Tabelle 21:	Übersicht der ausgewählten zentralen Wärmeversorgungssysteme.....	56
Tabelle 22:	Thermische Leistungen dezentraler Wärmeversorgungssysteme von Nicht-Wohngebäuden.....	57

Tabelle 23:	Übersicht der elektrischen und thermischen Leistungen (kW) und Wirkungsgrade (%) sowie der Stromkennzahlen der dezentralen BHKW .....	57
Tabelle 24:	Rohrdurchmesser der Rohrabschnitte (RA) für die Netzvarianten 1 bis 3.....	60
Tabelle 25:	Endenergiebedarfe der Siedlung unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,8.....	64
Tabelle 26:	Übersicht der thermischen Leistungen der BHKW, Holzheiz- und Spitzenlastkessel für die unterschiedlichen Energiestandards .....	66
Tabelle 27:	Übersicht über die elektrischen und thermischen Leistungen (kW), Wirkungsgrade (%) und Stromkennzahlen der Nahwärme-BHKW .....	66
Tabelle 28:	Vergleich der gesamten Endenergiebedarfe (MWh pro Jahr) der dezentralen Holzfeuerungen (Pellet-/Hackschnitzelkessel bzw. Pelletkessel/Kaminöfen) mit zentralem Holzheizwerk .....	76
Tabelle 29:	Vergleich der gesamten Endenergiebedarfe (MWh pro Jahr) der dezentralen BHKW-Varianten mit den Nahwärme-BHKW-Anlagen .....	76
Tabelle 30:	Vergleich der gesamten Energiebedarfe (MWh pro Jahr) der dezentralen Wärmepumpen-Varianten mit dem kalten Nahwärmenetz .....	76
Tabelle 31:	Primärenergiebedarfe der Nahwärme-Holzheizwerkenach eingesetzten Energieträgern.....	78
Tabelle 32:	Veränderung des Bedarfs nicht-erneuerbarer Primärenergie in der betrachteten Siedlung der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme für Raumwärme, Warmwasser, Haushalts- und sonstigen Strom .....	79
Tabelle 33:	Treibhausgas-Emissionen der Nahwärme-Holzheizwerke nach eingesetzten Energieträgern.....	81
Tabelle 34:	Veränderung der Treibhausgasemissionen in der betrachteten Siedlung der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme für Raumwärme, Warmwasser, Haushalts- und sonstigem Strom.....	82
Tabelle 35:	Veränderung der Jahresgesamtkosten (ohne Energiepreisteigerung) in der betrachteten Siedlung der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme für Raumwärme, Warmwasser und Hilfsenergie (ohne Haushaltsstrom und Straßenbeleuchtung).....	94
Tabelle 36:	Auswertung der Primärenergiebedarfe, der Emissionen und der jährlichen Kosten der Siedlung für Heizung, Warmwasser und Strom.....	106
Tabelle 37:	Berechnung der Nettostromerzeugung der Nahwärme-BHKW.....	127
Tabelle 38:	Berechnung der Nettostromerzeugung der dezentralen BHKW .....	128
Tabelle 39:	KWK-Vergütungssätze .....	129

Tabelle 40:	Berechnung der KWK-Vergütungen Nahwärme-BHKW-Varianten für alle Energiestandards .....	129
Tabelle 41:	Berechnung der KWK-Vergütungen der dezentralen BHKW für den Energiestandard „unsaniert“ .....	130
Tabelle 42:	Berechnung der KWK-Vergütungen der dezentralen BHKW für den Energiestandard „EnEV 2009“ .....	131
Tabelle 43:	Netzwärmeverluste unterschiedlicher Rohrarten .....	132
Tabelle 44:	End- und Primärenergiebedarfe für den Energiestandard „unsaniertes Gebäudebestand“ .....	133
Tabelle 45:	End- und Primärenergiebedarfe für den Energiestandard „EnEV 2009“ .....	134
Tabelle 46:	End- und Primärenergiebedarfe für den Energiestandard „Passivhaus“ .....	135
Tabelle 47:	Sensitivitätsanalyse: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom „unsaniertes Gebäudebestand“ .....	136
Tabelle 48:	Sensitivitätsanalyse: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom „ENEV 2009-Siedlung“ .....	137
Tabelle 49:	Sensitivitätsanalyse: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom „Passivhaus-Siedlung“ .....	138
Tabelle 50:	CO-, NO <sub>x</sub> - und Staub Emissionen für Heizung, Warmwasser und Strom für den Energiestandard „unsaniertes Gebäudebestand“ .....	139
Tabelle 51:	CO-, NO <sub>x</sub> - und Staub Emissionen für Heizung, Warmwasser und Strom für den Energiestandard „EnEV 2009“ .....	140
Tabelle 52:	CO-, NO <sub>x</sub> - und Staub Emissionen für Heizung, Warmwasser und Strom für den Energiestandard „Passivhaus“ .....	141
Tabelle 53:	Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten, Jahresgesamtkosten für den Energiestandard „unsaniertes Gebäudebestand“ .....	142
Tabelle 54:	Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten, Jahresgesamtkosten für den Energiestandard „EnEV 2009“ .....	143
Tabelle 55:	Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten, Jahresgesamtkosten für den Energiestandard „Passivhaus“ .....	144
Tabelle 56:	Verbrauchsgebundene Kosten und Jahresgesamtkosten mit einer Energiepreiserhöhungsraterate von 3 % p. a.....	145
Tabelle 57:	Verbrauchsgebundene Kosten und Jahresgesamtkosten mit einer Energiepreiserhöhungsraterate von 5 % p. a.....	146

Tabelle 58:	Verbrauchsgebundene Kosten und Jahresgesamtkosten mit einer Energiepreissteigerungsrate von 7 % p. a.....	147
Tabelle 59:	Externe Kosten (€/a) für Heizung, Warmwasser und Strom.....	149
Tabelle 60:	Vergleich der Jahresgesamtkosten (€/a) zu den Jahresgesamtkosten mit internalisierten Umweltschäden.....	150

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht die ökologischen Auswirkungen und die Wirtschaftlichkeit verschiedener gängiger und innovativer Wärmeversorgungssysteme zur Versorgung einer Siedlung: mit Wärme für Heizung und Warmwasser sowie mit Strom für Haushalts- und Betriebsstrom und für die Straßenbeleuchtung. Umweltbelastungen durch Mobilität und Transport sind nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Gebäudesanierungen verändern das Verhältnis von Strom- und Wärmebedarf. Der Bedarf an Wärme sinkt stärker als der Stromverbrauch, und der Anteil der Verteilverluste in Wärmenetzen steigt. Es stellt sich daher die Frage, ob es in Zukunft noch wirtschaftlich ist, Nah- und Fernwärmenetze zu bauen oder auszubauen. Folgende Leitfragen führen durch den Vergleich der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme auf Siedlungsebene:

- Welche Umweltbelastungen gehen von der Energieversorgung einer Siedlung aus?
- Wie verhalten sich die Umweltbelastungen und die Wirtschaftlichkeit leitungsgebundener Wärmeversorgungssysteme im Vergleich zu Einzelversorgungssystemen?
- Welche Wärmeversorgungssysteme sind sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch geeignet?
- Sind in Siedlungen mit geringem Wärmebedarf leitungsgebundene Wärmeversorgungssysteme ökologisch und wirtschaftlich geeignet?

Die End- und Primärenergiebedarfe, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) und die Kosten (Betriebs-, Verbrauchs- und Investitionskosten) für die verschiedenen Systeme werden sowohl grafisch als auch tabellarisch verglichen und bewertet. In einer Sensitivitätsanalyse werden steigende Energiepreise in die Jahresgesamtkosten einbezogen und die denkbare zukünftige Wirtschaftlichkeit der Systeme beurteilt. Eine weitere Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sich die Klimabilanz der Versorgungssysteme für Wärme und Strom ändert, wenn die Stromversorgung weniger klimaschädlich ist. Zudem werden die Kosten für Umweltschäden, so genannte externe Kosten, bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse internalisiert. In einer Gesamtbetrachtung der untersuchten Kriterien werden Empfehlungen für ökologische und wirtschaftliche Systeme ausgesprochen.

Die modellhaft ausgewählte Siedlung beruht auf einem Stadtteil der Gemeinde Linkenheim-Hochstetten, der für ein ländliches oder ein Stadtrandgebiet steht. Dort befinden sich 197 Einfamilienhäuser, 57 Mehrfamilienhäuser, zwei Verwaltungsgebäude und ein Schulgebäude. Für die Gebäude der Modellsiedlung wurden einheitlich drei Energiestandards betrachtet:

- unsanierter Gebäudebestand,
- Energieeinsparverordnung 2009 (Neubau) und
- Passivhaus-Niveau.

Die beiden letzteren können auch als anspruchsvolle Sanierungsziele gesehen werden.

Die Auswahl zentraler, d.h. leitungsgebundener, und dezentraler, d.h. gebäudeweiser, Versorgungssysteme zeigt Tabelle 1. Der dezentral erzeugte Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung wird in den Gebäuden selbst genutzt. Ansonsten wird er aus dem Stromnetz der öffentlichen Versorgung bezogen. Solarthermie meint stets solarthermische Unterstützung der Warmwasserbereitung in den Wohngebäuden.



Tabelle 1: Übersicht der zentralen und dezentralen Wärmeversorgungssysteme

Wärmeversorgungssystem <i>(kursiv: leitungsgebundenes Wärmeversorgungssystem)</i>	Brennstoff / Wärmequelle
<b>Energiestandard: unsaniert</b>	
Brennwertkessel (mit / ohne Solarthermie)	Erdgas
Holzessel (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus, Nicht-Wohngebäude - Mehrfamilienhaus	Pellets Hackschnitzel
Luft-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme
dezentrale BHKW (Verbrennungsmotor)	Erdgas
<i>Fernwärme</i>	<i>70 % KWK, 30 % Heizwerk</i>
<i>Nahwärme-BHKW (Verbrennungsmotor) und Spitzenlastkessel</i>	<i>Erdgas</i>
<i>Nahwärme-Holzheizwerk und Spitzenlastkessel (mit/ohne Solarthermie)</i>	<i>Hackschnitzel, Erdgas</i>
<b>Energiestandard: EnEV 2009</b>	
Brennwertkessel (mit / ohne Solarthermie)	Erdgas
Holzessel (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus, Nicht-Wohngebäude - Mehrfamilienhaus	Pellets Hackschnitzel
Luft-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme
dezentrale BHKW (Verbrennungsmotor)	Erdgas
<i>Fernwärme</i>	<i>70 % KWK, 30 % Heizwerk</i>
<i>Nahwärme-BHKW (Verbrennungsmotor) und Spitzenlastkessel</i>	<i>Gas</i>
<i>Nahwärme-Holzheizwerk und Spitzenlastkessel (mit/ohne Solarthermie)</i>	<i>Hackschnitzel, Erdgas</i>
<b>Energiestandard: Passivhaus</b>	
Brennwertkessel (mit / ohne Solarthermie)	Erdgas
Pelletkessel/Kaminöfen (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus (Kaminofen) - Mehrfamilienhaus / Nicht-Wohngebäude (Holzessel)	Scheitholz Pellets
Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus (Luft-Luft-Wärmepumpe) - Mehrfamilienhaus / Nicht-Wohngebäude (Sole-Wasser-Wärmepumpe)	Strom / Umweltwärme
Sole-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme
Stromdirektheizungen (mit / ohne Solarthermie)	Strom
<i>Fernwärme</i>	<i>70 % KWK, 30 % Heizwerk</i>
<i>Nahwärme-BHKW (Verbrennungsmotor) und Spitzenlastkessel</i>	<i>Erdgas</i>
<i>Nahwärme-Holzheizwerk und Spitzenlastkessel (mit/ohne Solarthermie)</i>	<i>Hackschnitzel, Erdgas</i>
<i>Kalte Nahwärme (mit / ohne Solarthermie)</i>	<i>Strom, Umweltwärme</i>

Diese Auswahl an Systemen schließt nicht aus, dass auch andere Techniken ebenso sinnvoll eingesetzt werden können, z. B. andere Wärmequellen (Erdreich, Abwasser, Abwärme) für Wärmepumpen, Gaswärmepumpen, solare Heizungsunterstützung, solare Wärmenetze, Eisspeicher – es ist nicht möglich, alle technischen Entwicklungen auf überschaubarem Raum zu beschreiben.

Diese Untersuchung ist nicht nur als theoretische Untersuchung zu verstehen. Sie kann und soll Denkanstöße geben, die in der Praxis auf ähnliche Weise umgesetzt werden können, indem sie zeigt, welche Systeme unter diesen oder vergleichbaren Umständen gut geeignet sein können, eine Siedlung mit Wärme und Strom zu versorgen. Dennoch müssen im Einzelfall die umzusetzenden Varianten individuell durchgerechnet werden, da sich Randbedingungen stark unterscheiden können.

**Ein geringer Bedarf an Wärme und Strom ist entscheidend, um das Klima und die Umwelt zu entlasten.** Zahlreiche Techniken können die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen vermindern, die durch den Bedarf einer Siedlung an Wärme und Strom verursacht werden. Günstige Versorgungssysteme können die Treibhausgasemissionen um 66 % in der unsanierten Siedlung, um 40 % in der EnEV 2009-Siedlung und um 44 %<sup>1</sup> in der Passivhaus-Siedlung senken. Die Umstellung der Wärmeversorgung allein reicht nicht aus, um die langfristigen Ziele des Klimaschutzes zu erreichen. Stärkere Entlastungen um 68 % bis 83 % kann nur ein geringerer Energiebedarf bewirken. Zusätzliche Beiträge kann künftig auch eine umweltfreundlichere Stromversorgung liefern. Gleichmaßen ist der Umweltschutz zu berücksichtigen, indem auch Luftschadstoffe betrachtet werden: Auch hier verringert ein geringer Energiebedarf in den meisten Fällen die Emissionen, während die Umstellung der Wärmeversorgung oft die Luftschadstoff-Emissionen erhöhen können.

**Ein geringer Energiebedarf verringert die Bedeutung von Energiekosten und schützt vor künftigen Energiepreisteigerungen.** Je geringer der Energiebedarf, desto eher rücken die Investitionskosten für die Energieversorgung der Siedlung in den Vordergrund. So sinken die Anteile der Energiekosten an den Jahresgesamtkosten von 68 % bis 89 % im unsanierten Gebäudebestand auf 38 % bis 67 % in der Passivhaus-Siedlung, wenn die Energiepreise jährlich um 3 % steigen; das schafft gleichzeitig Planungssicherheit. Grundsätzlich können mehr Energiekosten durch einen sinkenden Energiebedarf als mit dem Wechsel der Versorgungstechnik eingespart werden. Fördermittel und Kosten für wärmetechnische Maßnahmen an den Gebäudehüllen wurden nicht betrachtet. Jedoch tragen die Einsparungen an den Jahresgesamtkosten für die Energieversorgung einer Siedlung dazu bei, wärmetechnische Maßnahmen an den Gebäuden zu finanzieren, um den energetischen Standard der Gebäude zu verbessern.

**Es ist sachgerecht, nicht nur die Umweltbelastungen durch die Versorgung einer Siedlung mit Wärme, sondern auch die Umweltbelastungen durch die Stromanwendungen zu untersuchen.** Der Stromverbrauch in unsanierten Wohn- und Nicht-Wohngebäuden, beispielsweise für Beleuchtung, Haushalts- oder Bürogeräte, ist viel geringer als der Energieeinsatz für die Wärmeversorgung. Er verursacht 12 % bis 31 % (bzw. 59 % bis 81 % für Holzheizungen) der Treibhausgasemissionen der Siedlung. Sein Anteil ist jedoch schon ab dem Energiestandard der Energieeinsparverordnung 2009 mit 40 % bis 62 % (bzw. 80 % bis 94 % für Holzheizungen) beträchtlich; er übersteigt den Anteil des Wärmebedarfs. Im Passivhausstandard ist der Anteil mit 38 % bis 74 % (bzw. 79 % bis 94 % für Holzheizungen) noch etwas größer, trotz angenommener Stromsparmaßnahmen. Darüber hinaus treten wirtschaftliche Vorteile auf, wenn in Kraft-Wärme-Kopplung selbst erzeugter Strom vor Ort

---

<sup>1</sup> um 60 % beim Bezug auf Stromdirektheizung

genutzt wird. Daher ist es sinnvoll, Stromanwendungen in Umweltbilanzen von Siedlungen einzubeziehen, um sie umfassend und vollständig bilanzieren zu können und wirkungsvollen Klimaschutz anzustreben. Denn Strom ist in den vielfältigen Anwendungen möglichst sparsam und effizient zu verwenden. Photovoltaik-Anlagen auf den Gebäuden könnten zusätzliche Umweltentlastungen bei der Stromnutzung erschließen.

**Schon heute sind zahlreiche Techniken geeignet, unterschiedlich hohe Energiebedarfe wirtschaftlich und umweltfreundlich zu decken.** Unterschiede ergeben sich je nach Höhe der Energiebedarf: Blockheizkraftwerke sind eher für Siedlungen mit unsanierten Gebäuden geeignet, Wärmepumpen und Holzheizungen für Siedlungen mit geringem Heizwärmebedarf. Je geringer der Energiebedarf ist, desto weniger fallen zwischen den Versorgungstechniken die Unterschiede in den Energieverbräuchen, Emissionen und Kosten ins Gewicht. Über die hier untersuchten Techniken hinaus gibt es weitere, sinnvolle Lösungen (z. B. Wärmequellen höherer Temperatur für Wärmepumpen, solare Wärmenetze).

**Leitungsgebundene Systeme können auch bei niedrigem Wärmebedarf und trotz auftretender Leitungsverluste wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll sein.** Bei allen Energiestandards von unsanierten Gebäuden bis zu Passivhäusern fanden sich Lösungen, Wärme mittels Wärmenetzen wirtschaftlich und ökologisch bereitzustellen. Darunter finden sich klassische (z. B. Fernwärme) und innovative Techniken für energieeffiziente Gebäude: Nahwärme-Lösungen mit Blockheizkraftwerk, Holzheizwerk oder „kalte Nahwärme“, bei der mehrere Wärmepumpen ein Erdsondenfeld gemeinsam nutzen. Bei niedrigem Wärmebedarf ist es wichtig, die Verteilverluste eines Wärmenetzes zu verringern z. B. mit Doppelrohren und verstärkter Wärmedämmung; die zusätzlichen Kosten für die Isolierung sind im Vergleich zu den Investitionskosten des Wärmenetzes gering bis vernachlässigbar.

**Versorgungssysteme auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung lohnen sich ökonomisch, wenn ein großer Anteil des erzeugten Stroms selbst verbraucht wird, und ökologisch, solange die ungekoppelte Stromerzeugung klimaschädlich und ineffizient ist.** Strom in einem Blockheizkraftwerk selbst zu erzeugen und selbst zu nutzen ist wirtschaftlich günstiger, als den erzeugten Strom in das Stromnetz einzuspeisen und Strom einzukaufen. Nahwärme-Blockheizkraftwerke stehen vor dem Problem, dass Betreiber und Stromverbraucher in der Regel nicht identisch sind und Durchleitungsgebühren durch das örtliche Stromnetz anfallen. Ökologische Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung rühren von der momentan noch ineffizienten Stromerzeugung mit klimaschädlichen Brennstoffen her; dies ändert sich zukünftig, wenn der Anteil Erneuerbarer Energien im Strommix steigt. Mittel- bis langfristig sind alternative Gasquellen für die Kraft-Wärme-Kopplung nötig, beispielsweise Wasserstoff oder Methan aus überschüssigem Strom aus Photovoltaik oder Windenergie.

**Holz ist grundsätzlich ein klimafreundlicher und kostengünstiger Brennstoff, der im unsanierten Gebäudebestand allerdings nicht nachhaltig einsetzbar ist und beträchtliche Emissionen an Luftschadstoffen verursacht.** Die Treibhausgas-Emissionen wären am niedrigsten, wenn die Wärmeversorgung auf Holzbrennstoffe umgestellt würde. Vor allem im unsanierten Gebäudebestand ist der Brennstoffbedarf allerdings so hoch, dass die negativen Auswirkungen der Luftschadstoffemissionen den Beitrag zum Klimaschutz übersteigen. Dagegen ist das Emissionsniveau einer mit Holz beheizten Passivhaus-Siedlung sehr gering; lokale Immissionen von Luftschadstoffen sind unabhängig davon zu berücksichtigen. Holz als nachwachsender Brennstoff ist nur begrenzt verfügbar und daher möglichst in

energieeffizienten Gebäuden einzusetzen, solange nicht umweltfreundlichere Alternativen bestehen.

### **Elektrische Wärmepumpen eignen sich gut für Gebäude mit niedrigem Heizenergiebedarf;**

**Wärmenetze eröffnen innovative Einsatzmöglichkeiten.** Gebäude mit geringem Heizenergiebedarf können mit niedrigen Vorlauftemperaturen beheizt werden, die Wärmepumpen effizienter arbeiten lassen. Umgekehrt können Wärmepumpen, die Außenluft als Wärmequelle nutzen, in unsanierten Gebäuden ihre Vorteile nicht ausspielen. Fördermittel, die hier nicht betrachtet wurden, verringern die Jahresgesamtkosten. Wärmenetze mit kalter Nahwärme eröffnen neue Einsatzgebiete. Haben darin nicht alle Gebäude eigene, kleine Wärmepumpen, sondern teilen sich größere Wärmepumpen, ließe sich die Wirtschaftlichkeit noch weiter verbessern. Grundsätzlich sollten geeignetere Wärmequellen als Luft erschlossen werden: Erdreich, Abwärme, Abwasser, Kombinationen mit Eisspeichern usw. – diese sind auch in lokalen Wärmenetzen einsetzbar. Langfristig profitieren Wärmepumpen von einem größeren Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung.

### **Solarthermische Warmwasserbereitung verringert die Umweltwirkungen der**

**Versorgungssysteme.** Anschaffungskosten erhöhen zwar die Investitionskosten; Fördermittel federn diesen Effekt jedoch ab. Steigende Energiepreise verbessern die Wirtschaftlichkeit. Über die untersuchten Varianten hinaus bestehen vielfältigere und lohnende Einsatzmöglichkeiten: solarthermische Heizungsunterstützung erreicht höhere Solarerträge und damit eine größere Umweltentlastung als solarthermische Warmwasserbereitung. Gleiches gilt für solare Wärmenetze.

### **Die Umwelteffekte der untersuchten Versorgungssysteme mittels „externer Kosten“ zu**

**betrachten, ändert die wirtschaftliche Bewertung kaum.** Insgesamt zeigen sich nur geringe Abweichungen. So verursacht der Einsatz von Holz zwar Luftschadstoffemissionen in großem Ausmaß, jedoch tragen Strom oder Gas zum Klimawandel bei, dessen Auswirkungen ebenfalls volkswirtschaftliche Kosten verursachen. Lediglich bei den Varianten mit Blockheizkraftwerken verringern die Primärenergie-Gutschriften für den erzeugten KWK-Strom die Aufschläge für die externen Kosten im Vergleich zu den anderen Systemen.

### **Auf dem Weg zum nahezu klimaneutralen Gebäudebestand**

Die Untersuchungen zeigen, dass es für die unterschiedliche Situationen einer Siedlung viele Handlungsmöglichkeiten und Lösungen gibt, die technisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll sein können – die dargestellten Lösungen sind als erste Anregungen für den Umbau des Gebäudebestands zu verstehen. Eine zentrale Herausforderung wird dabei sein, schrittweise die Wärmeversorgung einer Siedlung umzubauen und den Energiebedarf der Gebäude zu verringern. Dies wird zu einem hohen Bedarf an Koordination führen, nachdem die Gebäudeeigentümer mit ihren unterschiedlichen Interessen und Lebenslagen eingebunden und überzeugt wurden. Derart (um)gestaltete Siedlungen können dann einen großen Beitrag zu den langfristigen Erfordernissen des Klimaschutzes leisten, indem der Gebäudebestand nahezu klimaneutral wird.

## Summary

The underlying study analyses the ecologic impact and the economic efficiency of several conventional and innovative heat supply systems to provide a quarter heat for space and water heating and electricity for residential and commercial application and for street lighting. Environmental impacts of mobility and transport are not subject of this study.

Retrofits of buildings change the ratio of demands for electricity and heat. The demand for heat decreases more than the demand for electricity, and the share of distribution losses in heat grids rises. The question is if it is still economically efficient to build or extend local and long-distance district heating networks. The following questions are central for the comparison of different heat supply systems for a quarter:

- What environmental impact is caused by the energy supply of a quarter?
- How do the environmental impact and the economic efficiency differ between distributed and collective heat supply systems?
- Which supply systems are both economically and ecologically feasible?
- Are collective heat supply systems using heat networks economically and ecologically also feasible for quarters with low heat demand?

Demands for final and primary energy, greenhouse gas emissions and costs (for operation, energy consumption and investments) of the different systems are compared and rated both in charts and tables. A sensitivity analysis includes increasing energy purchasing costs and assesses the possible economic efficiency of the supply systems in future. Another sensitivity analysis estimates how the climate impact of the supply systems for heat and electricity changes if electricity generation becomes less harmful for climate. Additionally, costs for environmental damage – so-called external costs – are internalised in the analysis of economic efficiency. In an overall rating ecologic and economically efficient systems are recommended.

The chosen exemplary quarter is based on a district of the community Linkenheim-Hochstetten, which is typical both for a rural area and for a suburban area. There are 197 single-family buildings, 57 apartment buildings, two office buildings and one school. For all buildings of the exemplary quarter, three levels of energy efficiency have been considered:

- unmodernised (similar to unmodernised building stock),
- newly-built (according to minimum requirements for new buildings according to Energieeinsparverordnung 2009 – energy saving ordinance),
- passive house.

The second and third level can also be seen as ambitious target levels for the modernisation of existing buildings.

The sample of collective and distributed supply systems is shown in the table below. Electricity from distributed cogeneration units is used within the respective buildings. Otherwise it is supplied by the public electricity grid. Solar thermal collectors contribute to domestic hot water production.

Table 1: Overview of collective and distributed heat supply systems

Heat supply system <i>(in italics: collective heat supply system)</i>	Fuel / heat source
<b>Level of energy efficiency: unmodernised</b>	
Condensing boilers (with / without solar thermal collectors)	Natural gas
Wood boilers (with / without solar thermal collectors) - single family buildings, non-residential buildings - apartment buildings	Wood pellets Wood chips
Air-to-water heat pumps (with / without solar thermal collectors)	Electricity, ambient heat
Distributed cogeneration units (combustion engine)	Natural gas
District heating	70 % cogeneration, 30 % heating plant
Collective cogeneration heating plant (combustion engine) with peak-load boiler	Natural gas
Collective wood heating plant with peak-load boiler (with / without solar thermal collectors)	Wood chips, natural gas
<b>Level of energy efficiency: newly-built</b>	
Condensing boilers (with / without solar thermal collectors)	Natural gas
Wood boilers (with / without solar thermal collectors) - single family buildings, non-residential buildings - apartment buildings	Wood pellets Wood chips
Air-to-water heat pumps (with / without solar thermal collectors)	Electricity, ambient heat
Distributed cogeneration units (combustion engine)	Natural gas
District heating	70 % cogeneration, 30 % heating plant
Collective cogeneration heating plant (combustion engine) with peak-load boiler	Natural gas
Collective wood heating plant with peak-load boiler (with / without solar thermal collectors)	Wood chips, natural gas
<b>Level of energy efficiency: Passive house</b>	
Condensing boilers (with / without solar thermal collectors)	Natural gas
Wood boilers/stoves (with / without solar thermal collectors) - single family buildings - apartment buildings, non-residential buildings	Log wood Wood pellets
Air-/Brine-to-water heat pumps (with / without solar thermal collectors) - single family buildings: air-to-air heat pumps - apartment buildings, non-residential buildings: brine-to-water heat pumps	Electricity, ambient heat
Brine-to-water heat pumps (with / without solar thermal collectors)	Electricity, ambient heat
Joule resistance heaters (with / without solar thermal collectors)	Electricity
District heating	70 % cogeneration, 30 % heating plant
Collective cogeneration heating plant (combustion engine) with peak-load boiler	Natural gas

Heat supply system <i>(in italics: collective heat supply system)</i>	Fuel / heat source
Collective wood heating plant with peak-load boiler (with / without solar thermal collectors)	Wood chips, natural gas
„Cold“ local heating (with / without solar thermal collectors)	Electricity, ambient heat

This sample of supply systems does not rule out that it may make sense to use also other systems like other heat sources (soil, waste water, waste heat) for heat pumps, gas driven heat pumps, solar space heating, solar local heating, ice storages – it is not possible to describe and assess all technical developments and innovations within one study.

This study is not only meant to be a theoretic assessment. It is also supposed to propose suggestions for local implementation by showing which supply systems may be suitable to provide heat and electricity to a quarter under similar conditions. However, for each particular case the potential solutions have to be assessed individually as the boundary conditions can vary to a large extent.

**Low demand for heat and electricity is the key to reduce impacts on climate and environment.** A lot of technologies are able to reduce emissions of greenhouse gases and other pollutants which are caused by supply of heat and electricity for a quarter. Favourable supply systems are able to reduce greenhouse gas emissions by 66 % in the unmodernised quarter, by 40 % in the newly-built quarter and by 44 %<sup>2</sup> in the passive house quarter. Changing only the supply systems is not sufficient to meet the long-term climate protection requirements. Mitigation of greenhouse gas emissions of 68...83 % can only be realised by decreased energy demand. In future, electricity generation also contributes to this by becoming more environmental friendly. Likewise environmental protection has to be considered by also looking at the emission of air pollutants: Decreased energy demand reduces emissions in most cases while changing heat supply systems often can increase emissions of air pollutants.

**A low energy demand decreases the relevance of energy costs and guards against future energy price increases.** The lower the energy demand, the more the investment costs of the energy supply for the quarter become important. The shares of energy costs on the total annual costs reach from 68...89 % in the unmodernised quarter. The share decreases to 38...67 % in the passive house quarter<sup>3</sup>. These smaller shares ensure planning security. In principle, by lowering energy demand more energy costs can be saved than by changing the supply system. Financial incentives and costs for thermal retrofits of the building shells have not been considered. The savings of total annual costs for energy supply can, however, contribute to financing of thermal improvement of the buildings to increase their level of energy efficiency.

**It is appropriate to assess the environmental impact of energy supply of a quarter not only for heating, but also for electric appliances.** The electricity consumption in unmodernised residential and non-residential buildings for lighting, domestic or office appliances is low compared to the energy use for heat supply. Electricity consumption causes

---

<sup>2</sup> by 60 % if joule resistance heating is included, which is rarely used and not favourable.

<sup>3</sup> Figures are valid for the scenario of an energy price increase by 3 % p.a.

12...31 % (59...81 % if heating with wood) of the greenhouse gas emissions of the quarter. With 40...62 % (80...94 % if heating with wood), its share is already high for the level of newly-built buildings; it thus exceeds the share of heat demand. In the passive house quarter the share of electricity reaches 38...74 % (79...94 % if heating with wood) what is even higher – despite of electricity saving measures. In addition, economic benefits occur if electricity is generated on site in combined heat and power units and is also used on site. Both make it useful to include electricity applications in the assessments in order to strive for comprehensive environmental analyses and effective climate protection. Electricity in its multiple appliances should be used as economically and efficiently as possible. Additional environmental gains could be achieved through photovoltaic systems on the buildings in the quarter.

**Already today there are multiple technologies available to provide energy in an economically efficient and environmentally friendly way.** This also applies for different levels of energy demand. Differences appear between the levels of energy demand: Cogeneration units are more appropriate for quarter with unmodernised buildings, whereas heat pumps or wood boilers are more appropriate for quarters with low heat demand. The lower the energy demands are, the lower are the differences between the supply systems in energy consumption, emissions and costs. Beyond the supply systems assessed in this study, there are more appropriate solutions, for example heat sources of higher temperature for heat pumps, solar district heating etc.

**Collective heat supply systems also can be economically and ecologically attractive for low energy demands despite occurring distribution losses.** For all levels of energy efficiency - from unmodernised buildings to passive houses - economically and ecologically attractive solutions have been found to provide heat via district heat networks. These solutions comprise both conventional technologies (like district heating) and innovative technologies for energy efficient buildings: Local heating with a cogeneration or wood chips heating plant or with a “cold local heating”, where distributed heat pumps share a collective field of borehole heat exchangers. If the heating demand is low, it is important to reduce distribution losses of the heat network, for example by using increased insulation or double pipes which incorporate feed and return pipes in one insulated containment. Additional costs for increased insulation of pipe work are very small or even negligible compared to the investment costs for the whole heat network.

**Supply systems based on combined heat and power generation are economically attractive if a large extent of produced electricity can be used on site.** They are ecologically attractive as long as conventional electricity generation is inefficient and not climate friendly. Generating electricity in a cogeneration unit and using this electricity on site is economically more attractive than feeding generated electricity into the grid and to purchase electricity from the grid. Cogeneration units for local heating face the problem that operators of the units and electricity consumers are different persons so that grid fees have to be paid. Ecologic benefits of cogeneration arise from inefficient electricity generation with carbon-based fossil fuels; this will change in future with more electricity from renewable energy sources. From a mid-term or long-term perspective, cogeneration needs other fuel sources to compete with other technologies, for example hydrogen or methane produced from surplus electricity from photovoltaics or wind power.

**In principle wood is a climate friendly and cost-effective fuel, but it is not sustainable especially in unmodernised buildings and causes significant amounts of emissions of air**



**pollutants.** Greenhouse gas emissions would be lowest if heat supply would be switched to wooden fuels. Especially in unmodernised buildings the fuel demand would, however, be so large that the negative impact of emissions of air pollutants would exceed the contribution to climate protection. Contrary to this, the emission level of a wood heated passive house quarter is comparatively low; local emissions of air pollutants are, of course, still to be considered. Wood is a renewable fuel though limited in its availability. Wood should preferably be used in energy efficient buildings as long as more environment friendly alternatives do not exist.

**Electric heat pumps are appropriate for buildings with low energy demand; local heat networks open doors to innovative applications.** Buildings with low energy demand can be heated with low feed temperatures what makes heat pumps more efficient in operation. Vice versa, heat pumps using outdoor air as heat source cannot provide advantages in unmodernised buildings. Financial incentives would decrease the high investment costs – this has not been investigated in this study. Heat networks providing “cold heat” create new fields of application. The economic efficiency would increase further if groups of buildings would share a few heat pumps of higher capacity instead using many distributed heat pumps of small capacity. Generally, more useful heat sources than ambient air should be used: ground heat, waste heat, waste water, combinations with ice storages etc. – these are also applicable in local heat networks. In the long term the climate impact of electric heat pumps benefits from higher shares of renewable energy sources in the electricity generation.

**Solar thermal collectors for water heating lower the environmental impact of supply systems.** Purchasing costs for these additional installations increase total investment costs, but financial incentives exist to reduce this burden. Increasing fuel costs improve the economic efficiency. Beyond the alternatives assessed in this study, there are also multiple and more promising fields of application: solar thermal space heating reaches higher solar gains and thus higher environmental profits than solar water heating. The same applies for solar local heat networks.

**Evaluating the environmental impact of the examined supply systems by means of “external costs” does not change the economic rating significantly.** External costs increase the total annual costs of all supply systems. In total, there are only little differences. The combustion of wooden fuels generates large amounts of air pollutants. On the other side, electricity generation and natural gas contribute to climate change that causes economic costs as well. Only for cogeneration, primary energy credits for produced electricity lower the surcharges of external costs compared to other supply systems.

### **On the way to an almost climate neutral building stock**

The analysis shows that there are many technically, economically and ecologically useful possibilities and solutions for the different situations of a quarter. The technical solutions shown in this study are meant as first proposals for the conversion of the entire building stock. A central challenge will be to convert the heat supply of a quarter and to decrease the energy demand of the buildings step by step. This will lead to a huge need of coordination after the building owners with their different interests and situations in life have been integrated and convinced. By making the building stock almost climate neutral, quarters (re)designed in such manner can contribute to the long-term requirements of climate protection



## 1 Einleitung und Ziele der Studie

Durch Gebäudesanierungen steigt der Anteil des Strombedarfs am Endenergiebedarf in Haushalten. Der zukünftig weiter sinkende Heizenergiebedarf stellt andere Anforderungen an die Wärmeversorgung von Gebäuden, insbesondere an die leitungsgebundene Wärmeversorgung mit Fern- oder Nahwärme. Mit verbesserten Dämmstandards gewinnt die Warmwasserbereitung an Bedeutung. Dabei stellt sich die Frage, mit welchen Systemen der Heiz-, Warmwasser- und Strombedarf einer Siedlung ökologisch und wirtschaftlich gedeckt werden kann. Eine umfassende Datenbasis soll Vergleiche zwischen verschiedenen leitungsgebundenen (zentralen) und nicht leitungsgebundenen (dezentralen) Wärmeversorgungssystemen anhand charakteristischer Umweltkriterien und Kostenvergleiche ermöglichen. Dafür sollen unterschiedliche Energiestandards der Siedlung (unsanierter Gebäudebestand, EnEV 2009 und Passivhaus) untersucht werden. Die Übersicht soll sowohl gängige als auch innovative Versorgungssysteme umfassen.

Der Betrachtungshorizont des Umweltvergleichs soll ein konkretes Siedlungsgebiet, beispielhaft für eine Stadtrandsiedlung und den ländlichen Bereich umfassen und neben dem Heizenergiebedarf auch den Energiebedarf für Warmwasser, Haushalts- und Betriebsstrom sowie Strom für die Straßenbeleuchtung einschließen. Dieser erweiterte Bilanzierungsrahmen soll eine sachgerechte Bewertung zentraler und dezentraler Versorgungssysteme (für Wärme und Strom) ermöglichen. Folgende Umwelt-Wirkungskategorien werden bei der Bewertung berücksichtigt:

- Endenergiebedarf,
- Primärenergiebedarf,
- Treibhausgasemissionen und
- Luftschadstoffemissionen.

Die Wirtschaftlichkeit der Systeme soll anhand der Jahresgesamtkosten – unter Berücksichtigung von gesetzlichen Fördermöglichkeiten – beurteilt werden. Außerdem erfolgt eine Analyse der Wirtschaftlichkeit aus volkswirtschaftlicher Perspektive unter Einbeziehung der externen Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.

Durch den Vergleich der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme sollen folgende Leitfragen betrachtet werden:

- Welche Umweltbelastungen gehen von der Energieversorgung einer Siedlung aus?
- Wie verhalten sich die Umweltbelastungen und die Wirtschaftlichkeit leitungsgebundener Wärmeversorgungssysteme im Vergleich zu Einzelversorgungssystemen?
- Welche Wärmeversorgungssysteme sind sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch empfehlenswert?
- Sind in Siedlungen mit niedrigem Wärmebedarf leitungsgebundene Wärmeversorgungssysteme ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll?

Grundlage für den Vergleich ist die Studie „Umweltwirkungen von Heizungssystemen in Deutschland“ (Ecofys 2010), die verschiedene Heiztechniken in Ein- und Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlichen Energiestandards untersuchte. Diese Untersuchung wird hier erweitert auf einen Siedlungsraum einschließlich einiger Nicht-Wohngebäude und um mehrere leitungsgebundene Techniken für die Versorgung der Siedlung mit Strom und Wärme.

## 2 Klimapolitische Ziele der Bundesregierung

Die Bundesregierung hat 2010 ein Energiekonzept beschlossen, das die energiepolitische Ausrichtung Deutschlands bis 2050 beschreibt. Die darin festgelegten langfristigen Entwicklungspfade zur Umsetzung der Ziele zum Klimaschutz, zu erneuerbaren Energien und zur Energieeffizienz sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Die Leitplanken der Klimaschutzziele sind die Treibhausgasemissionen um 40 % bis 2020 zu reduzieren und die Zielsetzung der Industriestaaten, ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80 % – Referenzjahr ist jeweils 1990 – zu reduzieren (vgl. BMWi/BMU 2010: 5).

Tabelle 2: Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung 2010

	Klimaschutz	Erneuerbare Energien		Energieeffizienz (gegenüber 2008)		
	Emissionen von Treibhausgasen (ggüb. 1990)	Anteil am Stromverbrauch	Anteil am Endenergieverbrauch	Primärenergieverbrauch	Stromverbrauch	Gebäudesanierungsrate verdoppeln, klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Steigerung der Energieproduktivität um 2,1 % p.a.
2020	-40 %	35 %	18 %	-20 %	↓ -10 %	
2030	-55 %	50 %	30 %	-	-	
2040	-70 %	65 %	45 %	-	-	
2050	-80...-95 %	80 %	60 %	-50 %	↓ -25 %	

Rund 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs und ca. ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind dem Gebäudebereich zuzurechnen (vgl. BMU 2010: 22). Die Gebäudesanierung ist ein wichtiger Baustein des Energiekonzeptes. Die Bundesregierung strebt einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 an. Neben dem Ziel, die Sanierungsrate von jährlich 1 % auf 2 % zu erhöhen, wurde die Reduktion des Wärmeenergiebedarfs bis 2020 um 20 % und des Primärenergiebedarfs bis 2050 um 80 % beschlossen. Der restliche Energiebedarf soll weitgehend durch erneuerbare Energien gedeckt werden (vgl. BMU 2010: 22).

Die Umsetzung des Energiekonzeptes erfordert einen grundlegenden Umbau der Energieversorgungssysteme. Die Bundesregierung hat deshalb in 2011 die Energiewende beschlossen und konkrete Maßnahmen zur Umsetzung festgelegt.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Siedlungstypologie

Mit seiner Studie „Wechselwirkungen zwischen Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen“ legte Roth 1980 die Grundsteine der Siedlungstypologie. Er definierte neun Siedlungstypen, die von verschiedenen Wissenschaftlern aufgegriffen und an die Gegebenheiten der Zeit angepasst wurden (vgl. Erhorn-Kluttig u. a. 2011: 22, 32).

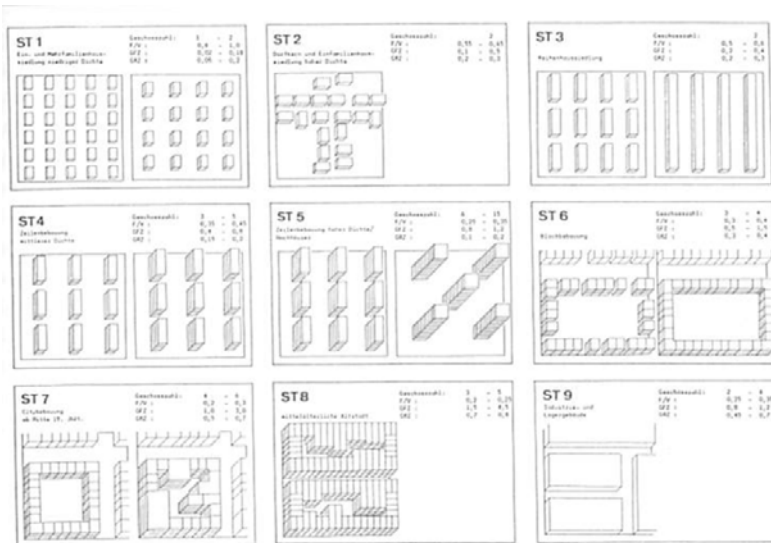


Abbildung 1: Siedlungstypen nach Roth (Schweizer Ingenieur und Architekt 44/81, zitiert nach: Erhorn-Kluttig 2004: 23)

Blesl unterscheidet in seiner Studie „Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturbedarfs“ aus dem Jahr 2002 zwischen 18 Siedlungstypologien (vgl. Blesl 2002: 137ff.). Buchert geht in seiner Studie „Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland“ aus dem Jahr 2004 hingegen von sieben Siedlungstypologien aus (vgl. Buchert u. a. 2004). In 2011 ist das Buch „Energetische Quartiersplanung“ von Erhorn-Kluttig u. a. erschienen. Ausgehend von den Siedlungstypologien von Roth und Blesl sind 12 Siedlungstypologien für den Wohngebäudebereich beschrieben. Zudem wurde ein zusätzlicher Siedlungstyp für Freiflächen aufgenommen (vgl. Erhorn-Kluttig 2011: 36).

Die Abgrenzung der verschiedenen Siedlungstypen erfolgt anhand der Agglomeration von Gebäuden, deren Ausrichtung am Straßenverlauf und deren Lage innerhalb der räumlichen Umgebung (vgl. Erhorn-Kluttig 2011: 33).

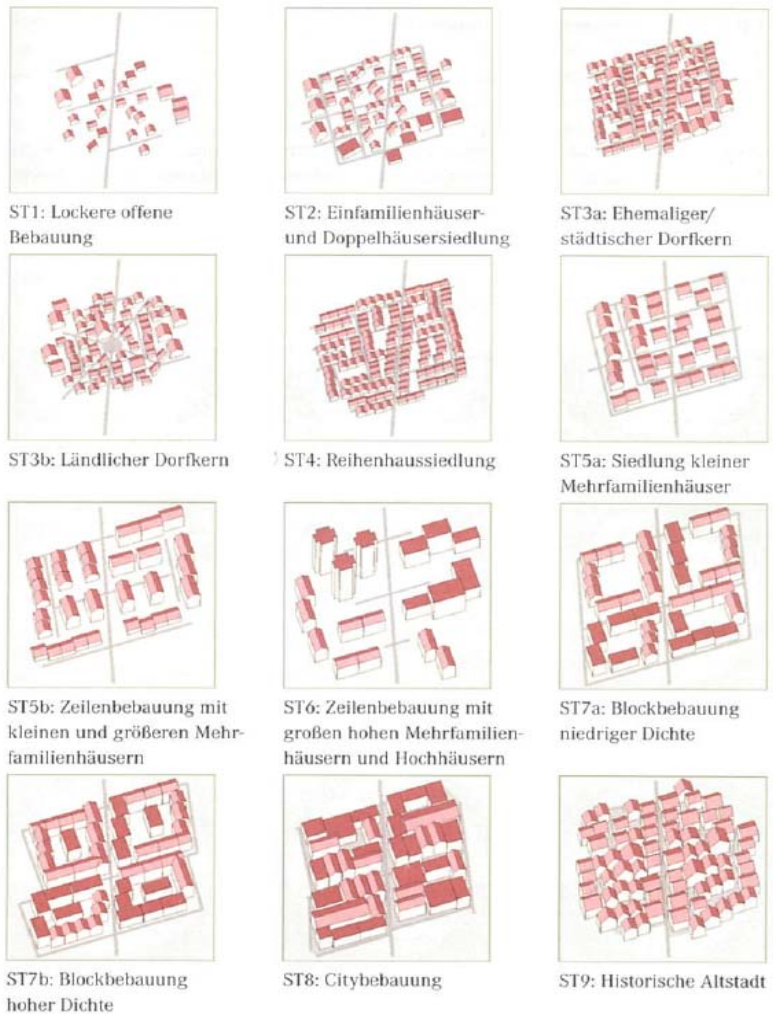


Abbildung 2: Siedlungstypologien nach Erhorn-Kluttig u. a. (Erhorn-Kluttig u. a. 2011: 43)

## 3.2 Begriffsbestimmungen

### 3.2.1 Energiestandards

Die Untersuchung bezieht sich auf Referenzgebäude mit drei Energiestandards: unsaniertes Gebäudebestand, Sanierung auf EnEV 2009-Niveau und Sanierung auf Passivhaus-Niveau.

#### *Unsaniertes Gebäudebestand*

Unsaniertes Gebäudebestand bedeutet, dass die Gebäude keinen oder einen schlechten Wärmeschutz haben. Bei den unsanierten Wohngebäuden wird angenommen, dass deren Parameter den Gebäudetypen RH\_H und MFH\_H der Gebäudetypologie des Institutes Wohnen und Umwelt (IWU) und der Baualtersklasse 1984 bis 1994 entsprechen (IWU 2005: 5f.). Der unsanierte Zustand der Nicht-Wohngebäude ist in den Förderanträgen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beschrieben. Danach wurde der erste Bauabschnitt des Büro-Referenzgebäudes „Rathaus Löhne“ 1968 und der zweite Bauabschnitt 1977 fertiggestellt (vgl. Löhne 2010: 2). Das Schul-Referenzgebäude „Josef-Zerhoch-Mittelschule“ wurde 1970/1971 gebaut (vgl. Josef-Zerhoch-Mittelschule 2011: 3). Die Architektur und verwendeten Materialien entsprechen bei beiden Referenzgebäuden der Bauzeit.

### *EnEV 2009*

Die Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (EnEV) 2009 begrenzt den Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie von Gebäuden. Sie unterscheidet zwischen Anforderungen, die an neu zu errichtende und an bereits bestehende Gebäude gestellt werden. Der als „EnEV 2009“ bezeichnete Energiestandard entspricht etwa den Anforderungen für neu zu errichtender Wohngebäude gemäß § 3 EnEV 2009 bzw. neu zu errichtender Nicht-Wohngebäude gemäß § 4 EnEV 2009, obwohl es sich um eine Bestandssiedlung handelt. Das spiegelt sowohl künftige Verschärfungen der EnEV-Anforderungen, deren Prüfung in den Beschlüssen der Bundesregierung angekündigt wurde, als auch anspruchsvollere Sanierungen nach den KfW-Standards wider. Gemäß EnEV hätten die ausgewählten Varianten den gleichen Primärenergiebedarf, die Heizwärmebedarfe würden sich je nach Heiztechnik unterscheiden. Jedoch ist der Primärenergiebedarf als Zielniveau kein geeigneter Ausgangspunkt für Systemvergleiche. Die vorliegenden Varianten weisen daher den gleichen Heizwärmebedarf auf.

### *Passivhaus-Standard*

Die grundlegenden Rahmenbedingungen für den Passivhaus-Energiestandard werden vom Darmstädter Passivhaus-Institut festgelegt. Ein Passivhaus muss danach folgende Kriterien erfüllen<sup>4</sup>:

- Heizwärmebedarf  $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- Primärenergiebedarf (einschließlich Haushaltsstrom)  $\leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- Luftdichtheit von mindestens  $n_{50}^5 = 0,6/\text{h}$

### **3.2.2 Gebäudenutzfläche nach EnEV**

Die Gebäudenutzfläche  $A_N$  ( $\text{m}^2$ ) bildet die Bezugsfläche für den Heiz-, Warmwasser-, Primär- und Endenergiebedarf. Sie ist eine fiktive Größe und wird gemäß § 2 Nummer 14 EnEV 2009 nach Anlage 1 Nummer 1.3.3 der EnEV 2009 wie folgt berechnet:

$$A_N = 0,32 \text{ m}^{-1} \cdot V_e$$

$V_e$  ist dabei das beheizte Gebäudevolumen in  $\text{m}^3$ .

Für alle drei Energiestandards wurde die Energiebezugsfläche des Passivhaus-Projektierungspaketes<sup>6</sup> (PHPP) (siehe 4.2.3) verwendet, um eine vergleichbare Datenbasis der Energiekennwerte zu gewährleisten.

---

<sup>4</sup> Vgl. Passivhaus Institut 2012a.

[http://www.passiv.de/de/02\\_informationen/02\\_qualitaetsanforderungen/02\\_qualitaetsanforderungen.htm](http://www.passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm)  
(30.06.2012).

<sup>5</sup>  $n_{50}$ -Wert bedeutet Drucktestkennwert oder Gebäuderestleckwert und ist ein Maß für die Undichtheit der Gebäudehülle. „Dieser Wert wird in Luftwechseln bei einem Drucktest-Differenzdruck von 50 Pa angegeben (Maßeinheit h-1).“ (vgl. Passivhaus Institut 2012b).

<sup>6</sup> PHPP ist ein Tool zur Auslegung und optimierten Planung eines Passivhauses (vgl. Passivhaus Institut 2012c).

### 3.2.3 Energiebezugsfläche nach PHPP und Wohnfläche

Die im PHPP verwendete Energiebezugsfläche für Wohngebäude wird nach der 2. Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche ermittelt. Bezugsgröße für Nicht-Wohngebäude ist die Nutzfläche nach DIN 277. Sowohl bei Wohn- als auch bei Nicht-Wohngebäuden werden – im Gegensatz zur Wohnfläche – nur die Flächen innerhalb der thermischen Hülle betrachtet.

### 3.2.4 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  (kWh/(m<sup>2</sup>a)) entspricht der Wärmemenge, die dem Raum bzw. Gebäude vom Heizsystem zur Verfügung gestellt werden muss, um die entsprechende Solltemperatur aufrecht zu erhalten (vgl. DIN V 4701-10 2009: 11). Laut DIN V 4108-6 setzt er sich aus den Wärmeverlusten über die Gebäudehülle (Transmissionswärmeverlust) und aus der Belüftung des Gebäudes (Lüftungswärmeverlust) zusammen. Außerdem werden solare Wärmegewinne aus der Erwärmung über die Fenster und interne Wärmegewinne durch die Wärmeabgabe der Bewohner sowie durch Kochen, Duschen, Beleuchtung und Haushaltsgeräte gegengerechnet.

$$Q_h = Q_{l,HP} - \eta_{HP} \cdot Q_{g,HP} \quad (\text{Index: HP = Heizperiode})$$

$Q_{l,HP}$  = Wärmeverluste aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlust (Index: l = losses)

$Q_{g,HP}$  = Wärmegewinne aus internen und solaren Wärmegewinnen (Index: g = gain)

$\eta_{HP}$  = Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne

### 3.2.5 Trinkwasserwärmebedarf

Der Trinkwasserwärmebedarf  $Q_{tw}$  (kWh/(m<sup>2</sup>a)) entspricht der Wärmemenge, die zur Erwärmung der gewünschten Menge Trinkwarmwasser benötigt wird (vgl. DIN V 4701-10 2009: 11).

### 3.2.6 Heizenergiebedarf

Der jährliche Heizenergiebedarf  $Q_H$  (kWh/(m<sup>2</sup>a)) entspricht der Energiemenge, die dem Heizsystem zur Deckung des Heizwärmebedarfs  $Q_h$  zugeführt werden muss (vgl. DIN V 4701-10 2009: 11). Im Unterschied zu  $Q_h$  beinhaltet  $Q_H$  die thermischen Verluste des Heizsystems.

### 3.2.7 Trinkwasser-Energiebedarf

Der jährliche Trinkwasser-Energiebedarf  $Q_{TW}$  (kWh/(m<sup>2</sup>a)) entspricht der Energiemenge, die dem Trinkwassersystem zur Deckung des Trinkwasser-Wärmebedarfs  $Q_{tw}$  zugeführt werden muss (vgl. DIN V 4701-10 2009: 11). Im Unterschied zu  $Q_{tw}$  beinhaltet  $Q_{TW}$  die thermischen Verluste des Trinkwasser-Erwärmungssystems.

### 3.2.8 Endenergiebedarf

Der jährliche Endenergiebedarf  $Q_E$  (kWh/(m<sup>2</sup>a)) ist die Energiemenge (z. B. Gas, Holz, Strom, Fernwärme), die zur Deckung des Jahresheizenergiebedarfs  $Q_H$  und des Trinkwarmwasser-Energiebedarfs  $Q_{TW}$  unter Berücksichtigung der Verluste der Anlagentechnik (Verluste der Wärmeerzeugung, Speicherung, Verteilung, Übergabe) benötigt wird (vgl. DIN V 4701-10 2009: 11).



### 3.2.9 Primärenergiebedarf und -faktoren

Der Primärenergiebedarf  $Q_P$  (kWh/(m<sup>2</sup>a)) ist die Energiemenge, die zur Deckung des Jahresendenergiebedarfs  $Q_E$  unter Berücksichtigung der Energiemenge, die in den vorgelagerten Prozessketten außerhalb der Systemgrenze „Gebäude“ für die Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der eingesetzten Brennstoffe benötigt wird.

Er berechnet sich aus der summierten Endenergie  $Q_E$ , die mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor bewertet wird (vgl. DIN V 18599-1:2011-12: 45).

$$Q_P = \sum_j (Q_{E,j} \cdot f_{p,j}) \quad (\text{Index: } j = \text{Energieträger})$$

Der Primärenergiefaktor  $f_p$  bildet das Verhältnis der eingesetzten Primärenergie zu abgegebener Endenergie ab. In der DIN V 18599-1:2011-12 Anhang A Tabelle A.1 sind die Primärenergiefaktoren für verschiedene Brennstoffe (Erdgas, Holz, etc.), Nah- und Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)<sup>7</sup> und Heizkraftwerken sowie Strom und Umweltenergie festgelegt. In der Tabelle 3 sind die hier relevanten Primärenergiefaktoren zusammengefasst. Der Primärenergiefaktor für Strom wurde aus der EnEV 2009 übernommen<sup>8</sup>.

Tabelle 3: Primärenergiefaktoren (vgl. DIN V 18599, EnEV 2009)

Energieträger	$f_p$
Erdgas	1,1
Pellets, Hackschnitzel, Scheitholz	0,2
Strom	2,6
Fernwärme	0,7

Holz ist eine begrenzte Ressource, weshalb sie nachhaltig eingesetzt werden sollte. Dieser Aspekt spiegelt sich jedoch nicht in dem Primärenergiefaktor der Brennstoffe Pellets, Hackschnitzel und Scheitholz wieder. Dieser Sachverhalt wird in der Publikation „Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012 – Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit“ im Zusammenhang mit der Novellierung der EnEV 2009 diskutiert (vgl. BMVBS 2012: 17 ff.). Ein Lösungsansatz ist, den Primärenergiefaktor für erneuerbare Brennstoffe (z. B. Holz derzeit 0,2) nur für ein begrenztes Budget (z. B. 25 kWh/(m<sup>2</sup>a) Heizwärmebedarf) zu verwenden. Dadurch wird sowohl ein Anreiz für gute Wärmedämmung als auch für erneuerbare Brennstoffen gesetzt. Offen ist die Frage, nach welchen Kriterien die Budgetgrenzen festgelegt werden sollten.

### 3.2.10 Emissionsfaktoren

Der Emissionsfaktor bildet das Verhältnis von der Masse eines freigesetzten Stoffes zur eingesetzten Menge des Ausgangsstoffes (hier: Energie) ab (vgl. UBA 2009: 5). Tabelle 4 zeigt die für die hier relevanten Emissionsfaktoren der verschiedenen Brennstoffe und Strom mit Quellenangabe. Untersucht wurden die Treibhausgasemissionen (Kohlenstoffdioxid-

<sup>7</sup> Der KWK-Anteil beträgt 70 %.

<sup>8</sup> Gemäß Anlage 1 EnEV 2009 ist für die Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs für den nicht-erneuerbaren Teil des elektrischen Stroms für Wohngebäude der Primärenergiefaktor 2,6 anzusetzen (vgl. Anlage 1, 2.1.1).

Äquivalente<sup>9</sup> CO<sub>2-Äq</sub>) mit Vorkette. Darüber hinaus wurden die Luftschadstoff-Emissionen des säurebildenden Schadstoffes Stickoxid (NO<sub>x</sub>), des Vorläuferstoffes für die Bildung bodennahen Ozons Kohlenmonoxid (CO) und von Staub jeweils *ohne* Vorkette untersucht.

„Vorkette“ bezeichnet die indirekten Emissionen, die durch vorgelagerte „Prozesse der Gewinnung, Bereitstellung und Verarbeitung von Materialien und Brennstoffen, die zur Errichtung und zum Betrieb von Anlagen zur Energieerzeugung benötigt werden“, entstehen (UBA 2009: 7). Die direkten Emissionen umfassen die Emissionen, „die direkt mit dem Anlagenbetrieb verbunden sind, z. B. bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern oder Biomasse in einer Feuerungsanlage“ (UBA 2009: 4).

Zahlreiche Quellen (GEMIS10 4.71, Zentrales System Emissionen (ZSE)<sup>11</sup>, UBA 2009, UBA 2010, UBA 2012a) nennen Emissionsfaktoren. Jedoch sind wenige Daten belastbar und für diese Untersuchung geeignet. Die Luftschadstoff-Emissionsfaktoren wurden ohne Vorkette untersucht, weil für Hackschnitzel keine belastbaren Emissionsfaktoren der Vorkette verfügbar sind. Um die Ergebnisse aller Wärmeversorgungssysteme vergleichen zu können, wurden deshalb die Emissionsfaktoren ohne Vorkette herangezogen. Bei den Luftschadstoffemissionen konnten nur CO, NO<sub>x</sub> und Staub ausgewertet werden. Die Emissionen der Luftschadstoffe hängen von der jeweiligen Wärmeerzeugungsanlage ab, während die Treibhausgasemissionen brennstoffabhängig sind. Die vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlichten Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe (UBA 2009, UBA 2012a) gelten für den gesamten Anlagenbestand, d. h. auch überholte Technik, in Deutschland. Da jedoch Versorgungssysteme untersucht werden sollen, die dem Stand der Technik entsprechen, wurden die Emissionsfaktoren aus UBA 2010 verwendet, die sich auf die drei o.g. Luftschadstoffe beschränkt.

---

<sup>9</sup> Die CO<sub>2-Äq</sub>-Emissionen umfassen die Emissionen aller Treibhausgase, umgerechnet auf das Global Warming Potential (GWP) von CO<sub>2</sub> (vgl. UBA 2009: 4). Die wichtigsten Treibhausgase neben CO<sub>2</sub> sind Methan (GWP: 21), Lachgas/Distickstoffoxid (GWP: 310), Fluorkohlenwasserstoffe (GWP: 140 – 11.700) und Schwefelhexafluorid (GWP: 23.900) (vgl. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2346> (24.08.2012)).

<sup>10</sup> GEMIS (engl. für Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) ist „eine Datenbank mit Bilanzierungs- und Analysemöglichkeiten für Lebenszyklen von Energie-, Stoff- und Transportprozessen sowie ihrer beliebigen Kombination“ ([www.gemis.de](http://www.gemis.de)).

<sup>11</sup> Zentrales System Emissionen (ZSE) ist eine Datenbank des Umweltbundesamtes für die Emissionsberichterstattung im Rahmen des Kyoto-Protokolls. Die Datenbank ist öffentlich nicht zugänglich.

Tabelle 4: Emissionsfaktoren (g/kWh) bezogen auf 1 kWh Endenergie

Brennstoff (Technik)	THG m. Vork. (g/kWh)	Quellen	CO (g/kWh)	Quellen	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	Quellen	Staub (g/kWh)	Quellen
Erdgas (Gas-Brennwertkessel)	250,8	UBA 2009 u. UBA 2012a: Anhang 4, S. 1	0,068	UBA 2010: 98	0,047	UBA 2010: 98	0	UBA 2010: 98
Erdgas (dezentrale BHKW)			0,085	UBA 2011a: 14	0,095	UBA 2011a: 14	0	UBA 2011a: 14
Erdgas (Nahwärme-BHKW unsaniert, EnEV 2009)			0,331	ASUE 2011	0,551	ASUE 2011	0	ASUE 2011
Erdgas (Nahwärme-BHKW Passivhaus)			0,220		0,275			
Pellets (Holzkessel)	32,0	UBA 2012d	0,659	siehe Erdgas	0,281	siehe Erdgas	0,079	siehe Erdgas
Scheitholtz (Holzkessel)	12,3	siehe Pellets	1,537	siehe Erdgas	0,302	siehe Erdgas	0,162	siehe Erdgas
Strom (Wärmepumpe)	638,8	UBA 2012a: Anhang 4, S. 1	0,220	ZSE <sup>3</sup>	0,410	ZSE <sup>3</sup>	0,020	ZSE <sup>3</sup>
Fernwärme (Mix aus Heiz- und Heizkraftwerken) <sup>4</sup>	214,0	UBA 2008: 14	0,094	UBA 2012d	0,231	UBA 2012d	0,006	UBA 2012d
Hackschnitzel (Holzkessel < 1 MW) <sup>5</sup>	12,9	Gemis 4.71	1,062	siehe Erdgas	0,349	siehe Erdgas	0,144	siehe Erdgas
Hackschnitzel (Holzkessel ≥ 1 MW) <sup>6</sup>	10,3		0,264	Gemis 4.71	0,196	Gemis 4.71	0,026	Gemis 4.71

<sup>3</sup> Vgl. UBA 2012e. Datenbasis ist das Jahr 2010. Für 2011 lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung keine belastbaren Daten vor.

<sup>4</sup> Die Berechnung der THG-Emissionen erfolgt nach der „eta-Methode“ auch Finnische Methode genannt (UBA 2008: 8). Der KWK-Anteil der Fernwärme wird in der Quelle nicht angegeben. Ein Vergleich mit dem in Gemis 4.71 ausgewiesenen Emissionsfaktor für THG m. Vork. von 215,69 g/kWh für „Wärme-Fern-mix-DE-2010/en“ mit einem 80%igen KWK-Anteil zeigt, dass die in der UBA-Publikation 2008 veröffentlichten Emissionsfaktoren mit einem KWK-Anteil kleiner 80 % berechnet wurden. Auch bei den Luftschadstoffen können keine Angaben zum Kraftwerksmix gemacht werden.

<sup>5</sup> Eigene Berechnung: Ergebnisse für „Holz-HS-Waldholz-Heizung-10 kW (Endenergie)“, Einstellungen der Hilfsprodukte (Netz-el-DE-HH/KV-2010 u. Metall\Stahl-mix-DE-2010) = 0.

<sup>6</sup> Eigene Berechnung: Ergebnisse für „Holz-HS-Waldholz-Heizwerk-1 MW- 2010 (Endenergie)“, Einstellungen der Hilfsprodukte (Netz-el-DE-HH/KV-2010 u. Metall\Stahl-mix-DE-2010) = 0.

### 3.3 Kennzahlen der Wärmeerzeuger

#### 3.3.1 Leistungszahl

Die Leistungszahl  $\varepsilon$  ist ein Momentanwert, der bei bestimmten Betriebsbedingungen gemessen wird. Sie beschreibt das Verhältnis des abgegebenen Nutzwärmestroms  $\dot{Q}_{WP}$  bezogen auf die zugeführte elektrische Leistung  $P_{el}$  für den Antrieb des Verdichters und der Hilfsantriebe nach DIN EN 14511/DIN EN 255-3 (vgl. VDI 4650: 5).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{el}}$$

#### 3.3.2 Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl  $\beta$  ist das Verhältnis der in einem Jahr abgegebenen Nutzwärme  $W_{Nutz}$  bezogen auf die elektrische Energie, die für den Antrieb des Verdichters und der Hilfsantriebe  $W_{el}$  eingesetzt wird (vgl. VDI 4650: 5). Sie ist das ausschlaggebende Maß für die Energieeffizienz einer Wärmepumpe. Die Berechnung der Jahresarbeitszahl erfolgt nach VDI 4650.

$$\beta = \frac{W_{Nutz}}{W_{el}}$$

#### 3.3.3 Anlagenaufwandszahl

Die Anlagen-Aufwandszahl  $e_p$  beschreibt das Verhältnis von Aufwand (aufgenommene Primärenergie) und Nutzen (abgegebene Nutzwärme) der Anlagentechnik. Sie entspricht dem Kehrwert des Nutzungsgrades. Ein energetisch günstiges Heizungssystem hat eine kleine Aufwandszahl.

$$e_p = \frac{1}{\eta}$$

#### 3.3.4 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist das Verhältnis von abgegebener Leistung  $P_{ab}$ , die ein Wärmeerzeuger an das Heizsystem eines Gebäudes abgibt, zu zugeführter Leistung  $P_{zu}$ , die der Wärmeerzeuger in der Regel als Brennstoff aufnimmt. Er beschreibt die Effizienz der Umwandlung bei Nennlastbetrieb einer Anlage und ist eine Momentaufnahme.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

#### 3.3.5 Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad  $\eta$  ist das Verhältnis von abgegebener Energie  $E_{ab}$  zu zugeführter Energie  $E_{zu}$  bei einer Anlage. Er ist in der Regel geringer als der Wirkungsgrad, weil er die verschiedenen Betriebszustände (Teillast, Vollast, An- und Abfahrtsvorgänge) einer Anlage berücksichtigt. Im Gegensatz zum Wirkungsgrad bezieht sich der Nutzungsgrad auf einen bestimmten Zeitraum. Beträgt der Zeitraum ein Jahr, spricht man vom Jahresnutzungsgrad.

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}}$$

### 3.4 Berechnung von Referenzlastprofilen für KWK-Anlagen

Die Auslegung der Blockheizkraftwerke (BHKW) erfolgte anhand der ermittelten Referenzlastprofile. Die Referenzlastprofile für die zentralen BHKW wurden anhand der VDI 4655 „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“ berechnet (vgl. Krimmling 2011: 128). Mit der VDI 4655 kann anhand von typischen Tagesgangkurven der Jahresgang für Wohngebäude ermittelt werden.

Die VDI 4655 unterscheidet zehn verschiedene Typtagkategorien (siehe Tabelle 5) und teilt Deutschland in 15 Klimazonen (TRY 1 – TRY 15) ein (vgl. VDI 4655: 7, 10). Anhand der Faktoren für den Energiebedarf für Heizung, Warmwasser und Strom je Typtag ( $F_{Heiz,TT}$ ,  $F_{el,TT}$ ,  $F_{TWW,TT}$ ), die in den Tabellen 10 bis 24 der VDI 4655 für jede Klimazone angegeben sind, kann ein Referenzlastprofil des Temperaturjahrgangs für Wohngebäude ermittelt werden.

Tabelle 5: Typtagkategorien nach VDI 4655 (VDI 4655: 7)

Jahreszeit	Werktag W		Sonntag S	
	Heiter H	Bewölkt B	Heiter H	Bewölkt B
Übergang Ü	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer S	SWX		SSX	
Winter W	WWH	WWB	WSH	WSB

Die Tagesenergiebedarfe der Typtage für Heizung ( $Q_{Heiz,TT}$ ), elektrischen Strom ( $W_{TT}$ ) und Warmwasser ( $Q_{TWW,TT}$ ) lassen sich wie folgt ermitteln (VDI 4655: 16):

$$Q_{Heiz,TT} = Q_{Heiz,a} \cdot F_{Heiz,TT}$$

$$Q_{TWW,TT} = Q_{TWW,a} \left( \frac{1}{365} + N_{Pers./WE} \cdot F_{TWW,TT} \right)$$

$$W_{TT} = W_a \left( \frac{1}{365} + N_{Pers./WE} \cdot F_{el,TT} \right)$$

Dabei sind  $Q_{Heiz,a}$  und  $Q_{TWW,a}$  der Jahresendenergiebedarf für Heizung und Warmwasser,  $W_a$  der Jahresbedarf Strom und  $N_{Pers./WE}$  die Anzahl der Personen pro Wohneinheit.

Die Referenzlastprofile der Referenzgebäude RH\_H und MFH\_H wurden gemäß der VDI 4655 für die Klimazone TRY 13 ermittelt. Die Referenzlastprofile der Nicht-Wohngebäude wurden in Anlehnung an die VDI 4655 berechnet und im Anhang A dargestellt. In der Regel werden die Nicht-Wohngebäude an den Sonntagen nicht genutzt, weswegen der Energiebedarf für die Typtage ÜSH, ÜSB, SSX, WSH und WSB mit 0 kWh/d angenommen wurde. Die für die Referenzgebäude ermittelten Referenzlastprofile wurden mit der Anzahl der jeweiligen Gebäudeart für das Modellgebiet hochgerechnet.

### 3.5 Berechnung der Nettostromerzeugung von BHKW

Der von einem BHKW abgegebene Strom (Nettostrom  $A_{\text{Bne KWK}}$ ) entspricht dem im Generator erzeugten Strom (Bruttostrom<sup>12</sup>), abzüglich des für den Betrieb des BHKW benötigten Hilfsenergiebedarfs (vgl. AGFW 2011: 10).  $A_{\text{Bne}}$  ist das Produkt aus der Stromkennzahl des KWK-Prozesses ( $\sigma_{\text{ne KWK}}$ ) und der KWK-Nettowärmeerzeugung ( $Q_{\text{Bne KWK}}$ )<sup>13</sup> (vgl. AGFW 2011: 10f., Richtlinie der Europäischen Union (EU) 2004/8/EG Anhang II).

$$A_{\text{Bne KWK}} = \sigma_{\text{ne KWK}} \cdot Q_{\text{Bne KWK}} \quad (\text{Indizes: B = Betriebsarbeit, ne = netto})$$

Dabei ist  $\sigma_{\text{ne KWK}}$  der Quotient aus dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad.

$$\sigma_{\text{ne KWK}} = \frac{\eta_{\text{el}}}{\eta_{\text{th}}}$$

Der erzeugte Nettostrom wurde sowohl für die zentralen BHKW der Nahwärme-Varianten berechnet als auch für die Varianten, in der jedes einzelne Gebäude mit einem BHKW ausgestattet ist (siehe Anhang B).

### 3.6 Allokationsmethode zur Berechnung der anteiligen Brennstoffeinsätze für Strom und Wärme von BHKW

BHKW produzieren in nur einem Verbrennungsprozess sowohl Wärme als auch Strom. Aufgrund des doppelten Nutzens stellt sich die Frage, wie der eingesetzte Brennstoff sowie die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen den beiden Produkten zugerechnet werden können. Dieses Problem stellt sich besonders bei der ökologischen Bewertung von BHKW im Vergleich zu anderen Wärme- oder Stromerzeugungsanlagen (vgl. IWU 2002: 1). Für die Lösung des Problems wurden verschiedene Allokationsmethoden entwickelt. Neben der Finnischen Methode, der Methode der Internationalen Energieagentur (IEA) und der Wirkungsgradmethode sind die Strom- und Wärmegutschrift-Methoden zu nennen (vgl. Mauch 2010: 1).

Die Finnische Methode ist auf EU-Ebene (z. B. in der EU-Richtlinie 2004/8/EG) verankert, weshalb sie hier verwendet wurde. Die Brennstoffeinsätze und die Emissionen von KWK-Anlagen werden auf die einzelnen Produkte Strom und Wärme aufgeteilt (vgl. UBA 2011a: 11). Für die Berechnung hat die Europäische Kommission europaweit einheitliche Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Wärme und Strom festgelegt<sup>14</sup>. Die Einzel-Wirkungsgrade bei der gekoppelten Produktion von Strom und

---

<sup>12</sup> AGFW definiert die Bruttostromerzeugung als „die in einer Berichtszeit erzeugte elektrische Arbeit gemessen an den Generatorklemmen.“ (vgl. AGFW2011: 10).

<sup>13</sup>  $Q_{\text{Bne KWK}}$  ist definiert als die in einem Berichtszeitraum gemessene Nettowärmeerzeugung eines Heizkraftwerkes bzw. einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage, abzüglich der Wärmemengen aus ungekoppelter Erzeugung (Spitzenheizkesselanlage, Heizwerk oder Frischdampfentnahme) (vgl. AGFW2011: 10).

<sup>14</sup> Gemäß Artikel 4 Abs. 1 Satz 1 der EU-Richtlinie 2004/8/EG ist die EU-Kommission verpflichtet, bis spätestens 21.02.2006 harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme festzulegen. Die Wirkungsgrad-Referenzwerte wurden in den Anhängen I und II der Entscheidung der Kommission vom 21. Dezember 2006 zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie

Wärme sind bei BHKW in der Regel geringer als bei der getrennten Produktion der Referenzanlagen. Dem stehen jedoch ein höherer Gesamtwirkungsgrad sowie die Verringerung des Brennstoffeinsatzes und von Emissionen gegenüber (vgl. UBA 2011a: 11, UBA 2008: 8).

Die Primärenergieeinsparung (PEE) berechnet sich gemäß Anhang III b) der EU-Richtlinie 2004/8/EG wie folgt:

$$PEE = \left(1 - \frac{1}{\frac{\eta_{KWKth}}{\eta_{REFth}} + \frac{\eta_{KWKel}}{\eta_{REFel}}}\right)$$

Dabei sind  $\eta_{KWKth}$  und  $\eta_{KWKel}$  der thermische und elektrische Wirkungsgrad der KWK-Anlage bei gekoppelter Erzeugung.  $\eta_{REFth}$  und  $\eta_{REFel}$  sind die Wirkungsgrade der Referenzanlagen.

Die Wirkungsgrad-Referenzwerte werden gemäß den Anhängen I und II des Durchführungsbeschlusses der EU-Kommission vom 19.12.2011 verwendet. Demnach beträgt für Erdgasanwendungen  $\eta_{REFth}$  90 % und  $\eta_{REFel}$  52,5 %. Die elektrischen Wirkungsgrad-Referenzwerte werden entsprechend den Korrekturfaktoren nach den Anhängen III und IV des Durchführungsbeschlusses korrigiert. Der Korrekturfaktor nach Anhang III für die Umgebungstemperatur ergibt sich aus der Differenz der ISO-Standardbedingungen (15 °C) und der jährlichen Durchschnittstemperatur. Demnach wird der Wirkungsgrad-Referenzwert um 0,1 Prozentpunkte für jedes Grad Celsius unter 15 °C herauf- und über 15 °C herabgesetzt. Für die untersuchte Siedlung (Hochstetten) war keine mittlere Durchschnittstemperatur ermittelbar, so dass diese für Karlsruhe als den nächst größeren Ort in der Nähe herangezogen wurde. Die jährliche Durchschnittstemperatur von Karlsruhe beträgt 10,3 °C, woraus sich ein Korrekturfaktor von 0,5 Prozentpunkten ergibt. Die Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste betragen gemäß Anhang IV für eine Netzspannung von 0,4 Kilovolt 94,5 % für in das Stromnetz eingespeisten Strom und 92,5 % für vor Ort verbrauchten Strom. Die in die Berechnung einfließenden Anteile an vor Ort verbrauchtem und eingespeistem Strom sind in der Tabelle 6 für die jeweiligen BHKW dargestellt. Bei den Nahwärme-Varianten wird angenommen, dass der gesamte erzeugte Nettostrom – mit Ausnahme des Eigenbedarfs der Anlage und des Pumpstrombedarfs des Wärmenetzes – eingespeist wird. Den erzeugten KWK-Strom in der Siedlung zu nutzen, wäre am günstigsten. Jedoch existiert kein eigenes Elektrizitätsnetz für die Verteilung des KWK-Stroms in dem Modellgebiet. Es müssten mit den Anliegern Stromlieferverträge geschlossen werden, was ein aufwändiges Verfahren sein kann. Daher wird der erzeugte KWK-Strom – abzüglich der Hilfsenergie für die Anlagen und des Pumpstroms für das Wärmenetz – in das Stromnetz eingespeist.

---

2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Mit dem Durchführungsbeschluss vom 19.12.2011 hat die EU-Kommission die Wirkungsgrad-Referenzwerte bis 2015 fortgeschrieben.

Tabelle 6: Übersicht der Anteile für eingespeisten und vor Ort verbrauchten Nettostrom der BHKW

BHKW-Anlage	Anteil eingespeister Nettostrom	Anteil verbrauchter Nettostrom vor Ort
<b>Dezentrale BHKW</b>		
EFH unsaniert	59 %	41 %
EFH EnEV 2009	0 %	100 %
MFH unsaniert	26 %	74 %
MFH EnEV 2009	0 %	100 %
Bürogebäude unsaniert	82 %	18 %
Bürogebäude EnEV 2009	45 %	55 %
Schule unsaniert	61 %	39 %
Schule EnEV 2009	0 %	100 %
<b>Nahwärme-BHKW</b>		
unsaniert	98,6 %	1,4 %
EnEV 2009	97,1 %	2,9 %
Passivhaus	95,5 %	4,5 %

Die sich daraus ergebenden Wirkungsgrad-Referenzwerte sind in der Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Wirkungsgrad-Referenzwerte und Korrekturfaktoren gemäß der Entscheidung der EU-Kommission 2007/74/EG und dem Durchführungsbeschluss der Europäischen Kommission vom 19.12.2011

	Referenz-wirkungsgrad (Anhang I und II)	Korrektur-faktor Temperatur (Anhang III)	Korrektur-faktoren Netzverluste (Anhang IV)	Korrigierter Referenz-wirkungs-grad
<b>Dezentrale BHKW</b>				
$\eta_{REFth}$	90 %	-	-	90 %
$\eta_{REFel}$ RH unsaniert	52,5 %	0,5 %	0,945 (Netzeinspeisung)	49,6 %
$\eta_{REFel}$ RH EnEV 2009				49,0 %
$\eta_{REFel}$ MFH unsaniert				49,3 %
$\eta_{REFel}$ MFH EnEV 2009				49,0 %
$\eta_{REFel}$ Bürogebäude unsaniert			0,925 (Eigenbedarf)	49,9 %
$\eta_{REFel}$ Bürogebäude EnEV 2009				49,5 %
$\eta_{REFel}$ Schule unsaniert				49,7 %
$\eta_{REFel}$ Schule EnEV 2009				49,0 %
<b>Nahwärme-BHKW</b>				
$\eta_{REFth}$	90 %	-	-	90 %
$\eta_{REFel}$ unsaniert	52,5 %	0,5 %	0,945 (Netzeinspeisung)	50,1 %
$\eta_{REFel}$ EnEV 2009				50,1 %
$\eta_{REFel}$ Passivhaus			0,925 (Eigenbedarf)	50,0 %



Die so errechnete Primärenergieeinsparung wird auf die Produkte Wärme und Strom aufgeteilt, woraus sich die anteiligen Brennstoffeinsätze gemäß den folgenden Gleichungen ergeben (vgl. UBA 2011a: 11, UBA 2008: 8):

$$W_{th} = W \cdot (1 - PEE) \cdot \frac{\eta_{KWKth}}{\eta_{KWKth}}$$

$$W_{el} = W \cdot (1 - PEE) \cdot \frac{\eta_{KWKel}}{\eta_{REFel}}$$

### 3.7 Nahwärmenetze

#### 3.7.1 Dimensionierung von Nahwärmenetzen

Die erforderliche Übertragungsleistung im Nahwärmenetz verändert sich mit jedem Hausanschluss, weshalb die Berechnung der Rohrdurchmesser für einzelne Rohrabschnitte erfolgt (siehe Tabelle 24). Mit

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

kann die Wärmeleistung sowohl für den jeweiligen Hausanschluss als auch für das gesamte Nahwärmenetz berechnet werden (vgl. Rötsch 1999: 140).

Die wirtschaftliche Strömungsgeschwindigkeit kann dem Diagramm der Abbildung 3 entnommen werden. Die Rohrdurchmesser sind iterativ zu ermitteln. Tabelle 24 zeigt die Rohrdurchmesser der Rohrabschnitte der verschiedenen Netzvarianten.

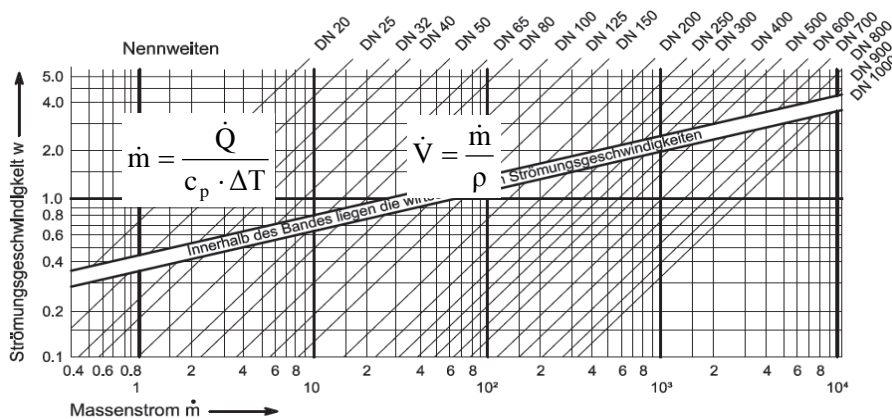


Abbildung 3: Wirtschaftliche Strömungsgeschwindigkeit (vgl. isoplus 2011: 2/8)

In einer Siedlung werden in der Regel nicht alle Anschlüsse gleichzeitig benutzt, so dass der effektive Leistungsbedarf der Siedlung  $\dot{Q}_{Nutz,eff}$  unter der Summe der

Anschlussleistungen  $\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{N,i}$  liegt. Das Verhältnis von effektivem Leistungsbedarf und der

Summe der Anschlussleistungen bildet der Gleichzeitigkeitsfaktor (GZF) ab (Krimmling 2011: 107, Winter u. a. 2001: 3).

$$GZF = \frac{\dot{Q}_{Nutz,eff}}{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{N,i}}$$

Laut Krimmling beträgt der GZF bei Nahwärmenetzen 0,8 (vgl. Krimmling 2011: 108). Diese Angaben decken sich mit den Erhebungen von Blesl, der für die Siedlungstypen ST3a „Ehemaliger/städtischer Dorfkern“ und ST5a „Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser“ ebenfalls einen Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,8 angibt (vgl. Blesl 2002: 190). Weitere Ausführungen zum Siedlungsgebiet und Siedlungstypologie siehe 4.1. und 5.1.

### 3.7.2 Berechnung von Netzwärmeverlusten

Die Wärmeverluste  $\dot{Q}_v$  in Watt in Rohrleitungen sind abhängig vom Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  (W/mK), der Vor- und Rücklauftemperatur  $T_v$  und  $T_R$  (°C), der Erdreichtemperatur  $T_E$  (°C) sowie der Rohrlänge  $l$  (m) (vgl. isoplus 2011: 2/19):

$$\dot{Q}_v = l \cdot U \left( \frac{T_v + T_R}{2} - T_E \right)$$

Die Wärmedurchgangskoeffizienten wiederum hängen von der Wärmeleitfähigkeit des Rohr- und Dämmmaterials sowie den Rohrdurchmessern ab und werden in der Regel von den Herstellern angegeben. Die Wärmeverluste wurden für die einzelnen Rohrabschnitte berechnet (siehe Abbildung 11). Aus der Summe der Wärmeverluste pro Rohrabschnitt ergibt sich der gesamte Wärmeverlust des Netzes.

### 3.7.3 Berechnung Pumpenleistung und Pumpstrombedarf

Die Pumpenleistung  $P_n$  in Watt, die für den Ausgleich des Druckverlustes im Nahwärmenetz benötigt wird, berechnet sich aus dem Volumenstrom  $\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/s) und der gewünschten Druckerhöhung  $\Delta p$  (Pa) (vgl. Althaus/Wigbels 2002: 49).

$$P_n = \dot{V} \cdot \Delta p$$

Die gewünschte Druckerhöhung entspricht dem Druckverlust der längsten Strecke des Nahwärmenetzes. Für überschlägige Berechnungen kann ein spezifischer Druckverlust von 100 Pa/m (= 1 mbar/m) angenommen werden (vgl. Althaus/Wigbels 2002: 49). Zudem sind die Druckverluste aller am Nahwärmenetz angeschlossenen Hausanschlüsse zu berücksichtigen. In der Abbildung 4 ist das Verhältnis von Volumenstrom und Differenzdruckverlust von Wärmeübergabestationen dargestellt.

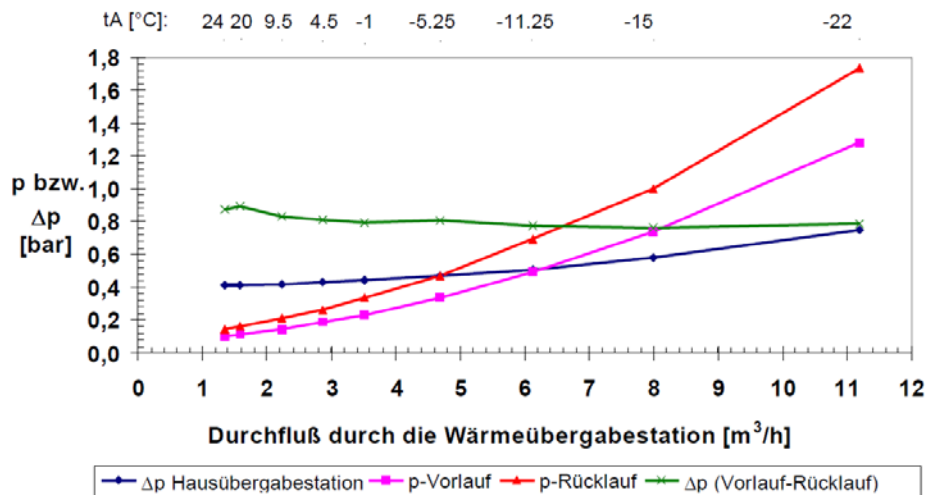


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Druck- und Differenzdruckverluste über die Wärmeübergabestation eines vom Heizwerk weit entfernten Abnehmers in Abhängigkeit des Durchflusses und der Außentemperatur (Obernberger 1997: 17)

Anhand der ermittelten Pumpenleistung und der Zeit  $t$  (h) lässt sich der Pumpstrombedarf der jeweiligen Nahwärmenetz-Variante berechnen. Die Nahwärmenetze werden ganzjährig, d. h. 8.760 h pro Jahr betrieben.

$$W_{el} = P_n \cdot t$$

Tabelle 8 fasst die Pumpstrombedarfe für die verschiedenen Netzvarianten (siehe Seite 59) und Energiestandards zusammen. Die Pumpstrombedarfe für die BHKW- und Holzheizwerk-Nahwärmenetze sind gleich hoch und wurden für das Fernwärmenetz übernommen (Spalte „Nah- und Fernwärmenetze“ in Tabelle 8). Aufgrund der unterschiedlichen Rohrdimensionierung für die kalte Nahwärme wurde der Pumpstrombedarf neu berechnet. Bei der Berechnung der Pumpstrombedarfe wurde mangels Literaturangaben angenommen, dass die Nahwärmenetze ganzjährig unter Vollast betrieben werden. In der unsanierten Siedlung beläuft sich der Pumpstrombedarf auf 120 MWh/a, was ca. 3 % des gesamten Strombedarfs der Siedlung ausmacht. In der EnEV 2009-Siedlung sinkt der Pumpstrombedarf auf 72 MWh/a und in der Passivhaus-Siedlung auf 57 MWh/a. In der Praxis sind die Wärmenetze nicht ganzjährig ausgelastet, sondern werden im Teillastbereich betrieben. Deswegen entsprechen die berechneten Pumpstrombedarfe bei den Nahwärmenetzen einer oberen Abschätzung. Hingegen dürfte es sich bei den Fernwärmenetzen aufgrund der längeren Netztrasse und der größeren Rohrdimensionierung um eine untere Abschätzung handeln.

Tabelle 8: Pumpstrombedarf (kWh/a) der verschiedenen Netzvarianten und Energiestandard

Energiestandard	Pumpstrombedarf Nah- und Fernwärmenetze (kWh/a)	Pumpstrombedarf kalte Nahwärme (KWh/a)
unsaniert	120.174	-
EnEV 2009	72.451	-
Passivhaus	56.855	76.054

### 3.8 Kosten

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt anhand der Jahresgesamtkosten, die sich aus den Investitionskosten bzw. den jährlichen Annuitäten, den betriebs- und den

verbrauchsgebundenen Kosten zusammensetzen. Außerdem sind die Förderungsmöglichkeiten nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) berücksichtigt (Details hierzu siehe 4.8.5.).

### 3.8.1 Methoden der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeit von Investitionen kann anhand unterschiedlicher Verfahren ermittelt werden, wobei zwischen statischen<sup>15</sup> und dynamischen<sup>16</sup> Verfahren unterschieden wird (vgl. Wöhe 1996: 748f., 754f.). Bei der Annuitätenmethode werden die Investitionskosten ( $A_0$ ) einer Anschaffung auf die Nutzungsdauer ( $t$ ) verteilt. Diese Methode eignet sich besonders, um verschiedene Investitionsmöglichkeiten zu bewerten. Die Annuität ( $A_{N,K}$ ) einer Investition lässt sich wie folgt berechnen (vgl. VDI 2067 Blatt 1: 14):

$$A_{N,K} = A_0 \cdot ANF$$

ANF ist der Annuitätsfaktor, mit dem die kapitalgebundenen Kosten der Investition unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer und der angenommenen realen Verzinsung ( $i$ ) auf die jährlichen Kosten umgerechnet werden. Dadurch können die einmaligen Investitionskosten und die jährlich anfallenden betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten zusammengefasst werden. Der ANF wird gemäß der nachstehenden Gleichung berechnet (vgl. Wöhe 1996: 761):

$$ANF = \frac{(1+i)^t \cdot i}{(1+i)^t - 1}$$

Tabelle 9 fasst die Nutzungsdauern der verschiedenen Kostenkomponenten der Wärmeversorgungssysteme zusammen. Bei einem angenommenen realen Zinssatz von 3,5 %<sup>17</sup> ergeben sich die ebenfalls in der Tabelle 9 berechneten Annuitätsfaktoren.

Tabelle 9: Nutzungsdauer und Annuitätsfaktor verschiedener Kostenkomponenten

Kostenkomponenten	t (a)	Quellen für t	ANF
Wärmeerzeuger	20	UBA 2011a: 25	0,070
Solarthermie	15		0,087
Wärmespeicher	30		0,054
Wärmeverteilung	30		0,054
Einbau u. Anschluss	20		0,070
Tank/Lager	20		0,070
Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	20		0,070

<sup>15</sup> Statische Verfahren dienen der Feststellung, welche von mehreren Investitionsmöglichkeiten die vorteilhaftere ist (vgl. Wöhe 1996: 748). Zu den statischen Verfahren zählen die Kosten-, Gewinn- und Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie die Amortisationsrechnung (vgl. Wöhe 1996: 749ff.).

<sup>16</sup> Mittels dynamischer Verfahren sollen die finanziellen Auswirkungen einer Investitionsentscheidung über den gesamten Investitionszeitraum erfasst und ausgewertet werden (vgl. Wöhe 1996: 754). Zu den dynamischen Verfahren zählen die Kapitalwert- und Annuitätenmethode sowie die Methode des internen Zinsfußes (vgl. Wöhe 1996: 754 ff.).

<sup>17</sup> Vgl. BMBS 2012: 31.

Gas- und Elektroinstallation	50		0,043
Kreiselpumpe	10	Jagnow/Wolff 2011:	0,120
Nahwärmenetz	30	62	0,054

Um die jährliche Annuität der Planungskosten eines Nahwärmenetzes zu berechnen, sind die Nutzungsdauern und die Annuitätenfaktoren der jeweiligen in Tabelle 9 aufgeführten Kostenkomponenten zugrunde zu legen.

### 3.8.2 Investitionskosten

Bei den Investitionskosten (inkl. MwSt.) handelt es sich um bei der Anschaffung getätigte Ausgaben. Bei den dezentralen Wärmeversorgungsvarianten wurden die Investitionskosten für

- Wärmeerzeuger,
- Solarthermische Kollektoren,
- Wärmespeicher,
- Wärmeverteilung,
- Einbau und Anschluss,
- Tank und Lager,
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sowie
- Gas- und Elektroinstallationen

berücksichtigt. Die Kosten für die Wohngebäude wurden von UBA 2011a übernommen, jedoch ohne die Kosten für den Bau eines Schornsteines, weil von einer Bestandssiedlung ausgegangen wurde.

Bei den leitungsgebundenen Wärmeversorgungssystemen wurden zusätzlich auch die Material- und Verlegekosten für das Wärmenetz sowie die Kosten für den zentralen Pufferspeicher, zentralen Tank/Lager, die Kreiselpumpe, Wärmeübergabestationen und Kosten für die Planung eingerechnet. Die Planungskosten wurden pauschal mit 15 % der Investitionskosten angesetzt (vgl. Pehnt u. a. 2009: 194). Die Investitionskosten für das Fernwärmenetz wurden in UBA 2011a nicht separat ausgewiesen, sondern als Teil des Energiepreises für Fernwärme verstanden. Zu den Investitionskosten der Nahwärmenetze wurden folgende Annahmen getroffen (Details zu den Netzvarianten siehe Seite 59):

- Netzvariante 1 (unsaniert / EnEV 2009): Berücksichtigung der Investitionskosten für einen Netzneubau (inkl. KWK-Förderung gemäß § 7a Absatz 1 Satz 2 Nummer 2 KWKG (siehe 4.8.5.) bei Nahwärme-BHKW).
- Netzvarianten 2 und 3 (Passivhaus / kalte Nahwärme): Aufgrund fehlender Daten zu Kosten für Netzsanierungen, werden ebenfalls die Kosten für einen Netzneubau zugrunde gelegt (bei Nahwärme-BHKW jedoch ohne KWK-Förderung). Je nach Sanierungsmethode können die Kosten für eine Netzsanierung unter denen eines Netzneubaus liegen oder gleich hoch ausfallen<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> Bei einer Netzsanierung, bei der Rohre kleineren Durchmessers in das vorhandene Rohrsystem eingeführt werden, ist mit geringeren Kosten als bei einem Netzneubau zu rechnen. Es muss nicht die gesamte Trasse freigelegt werden, was die

Skandinavische Verlegungsmethoden sind um den Faktor drei günstiger, weil kleinere Leitungsdurchmesser erforderlich sind (UBA 2007e: 76). In Deutschland wirken sich besonders der typische Einkauf nach Stücklisten, Sondernormen und hohe Kontrollanforderungen sowie die üblichen Vergabeverfahren kostensteigernd aus (Fabricius 2005). Ein Forschungsvorhaben der AGFW zeigt, dass auch neuere Verlegetechniken in Deutschland noch deutlich über denen von Finnland liegen (Sirola 2004; AGFW 1997) (siehe Abbildung 5). Ein Vergleich der Verlegekosten zeigt, dass es in Deutschland noch weiteres Optimierungspotential gibt.

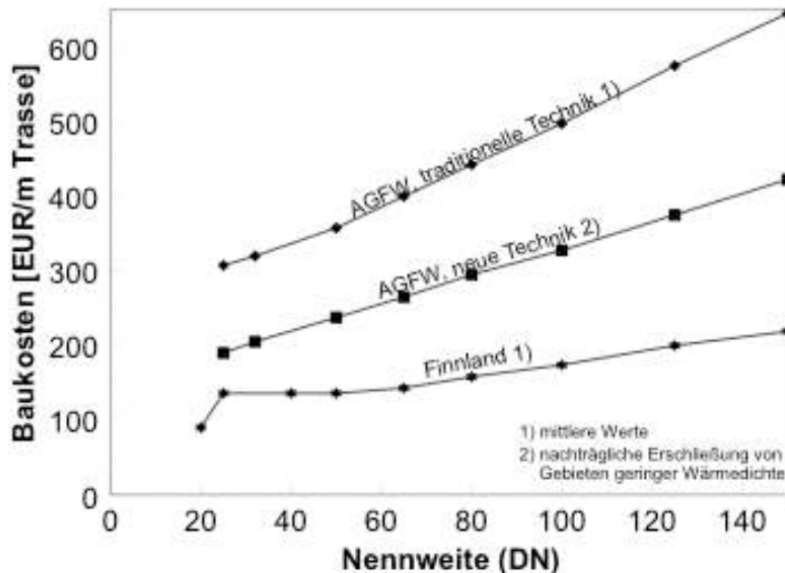


Abbildung 5: Vergleich der Verlegekosten zwischen Deutschland und Finnland (UBA 2007e: 76)

Bei den BHKW-Anlagen machen sich Skalen-Effekte bei den Investitionskosten mit zunehmender elektrischer Leistung bemerkbar (vgl. Abbildung 6).

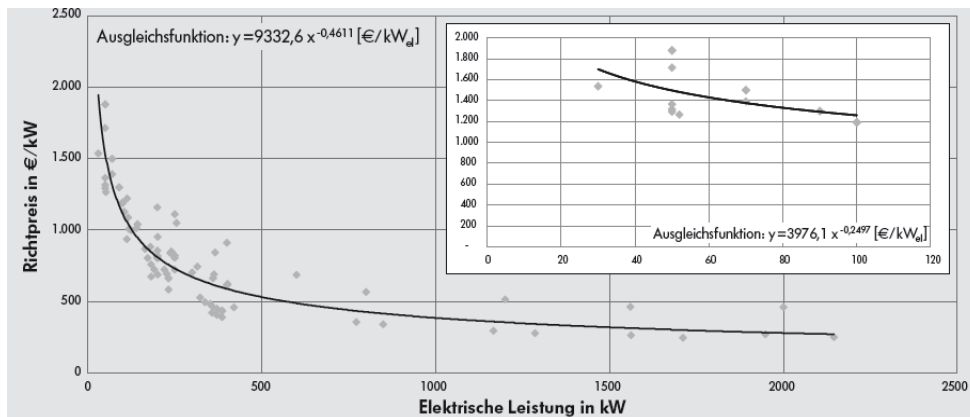


Abbildung 6: Spezifische Richtpreise (€/kW) in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung von Erdgas-BHKW (ASUE 2011: 12)

Sofern Investitionskosten aus älteren Literaturangaben übernommen wurden, wurden diese mit den Baupreisindizes des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) auf das Jahr 2012

Netzbaukosten erheblich reduziert. Wird bei der Sanierung die gesamte Trasse aufgerissen und die alten Rohrleitungen durch neue ersetzt, dürften die Kosten der Netzsanierung in etwa so hoch ausfallen wie beim Netzneubau.

hochgerechnet (vgl. Tabelle 10). Bei den Nicht-Wohngebäuden wurden für die einzelnen Komponenten Datenquellen aus zwei verschiedenen Jahren verwendet, weswegen hier zwei Baupreisindizes angegeben sind.

Tabelle 10: Baupreisindizes nach DESTATIS<sup>19</sup> (vgl. DESTATIS 2012a, DESTATIS 2012b)

Baupreisindizes	III 2007	IV 2008	II 2010	I 2012	Baupreisindex
EFH	-	-	113,5	118,9	1,04758
MFH	-	-	114,6	120,3	1,04974
Nicht-Wohngebäude	-	-	114,8	120,3	1,04791
Nicht-Wohngebäude	109,5	-	-	120,3	1,09863
Ortskanal	-	112,9	-	118,5	1,04960

### 3.8.3 Betriebsgebundene Kosten

Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören die Kosten, die durch das Betreiben der Anlage anfallen (vgl. VDI 2067 Blatt 1: 13). Bei den dezentralen Wärmeversorgungsvarianten wurden die Kosten für die Wartung und den Schornsteinfeger einbezogen. Auch hier wurden die Daten für die Wohngebäude aus UBA 2011a übernommen. Die Wartungskosten für die Wärmeversorgungssysteme der Sondergebäude wurden selbst ermittelt. Sofern hierfür keine Daten verfügbar waren, wurden die Wartungskosten des Referenzgebäudes MFH aus UBA 2011a zugrunde gelegt und an die Größe der Sondergebäude angepasst.

Auch die betriebsgebundenen Kosten des Fernwärmenetzes wurden in UBA 2011a nicht separat ausgewiesen, sondern sind in den Energiekosten bereits enthalten. Bei den Nahwärmenetzen wurden neben den Wartungskosten für die zentralen Wärmeversorgungssysteme und Pufferspeicher auch die Wartungskosten für das Wärmenetz und den zentralen Tank bzw. Lager berücksichtigt.

### 3.8.4 Verbrauchsgebundene Kosten

Die verbrauchsgebundenen Kosten sind die Energiekosten, die für den Wärme- und Strombedarf der einzelnen Gebäude und Wärmenetze anfallen. Außerdem wurde der Strombedarf für die Straßenbeleuchtung der Siedlung berücksichtigt. Tabelle 11 gibt die Energiekosten für die jeweiligen Brennstoffe mit Quellenangabe an.

Tabelle 11: Energiepreise 2012 (€/kWh) und Quellenangabe

Brennstoff	Energiepreis 2012 (€-Cent/ kWh)	Quelle
Erdgas	6,66	BMW I 2012: Tabelle 26 (Haushalte (einschl. MwSt.))
Fernwärme	8,23	
Strom	25,08	
Pellets	4,93	C.A.R.M.E.N. 2012
Hackschnitzel	3,01	

<sup>19</sup> Basisjahr für Baupreisindizes ist das 3. Quartal 2005 mit einem Baupreisindex von 100.

Brennstoff	Energiepreis 2012 (€-Cent/ kWh)	Quelle
Scheitholz	5,36	
Strom Wärmepumpe <sup>20</sup>	17,52	UBA 2011a: 17

Für die verbrauchsgebundenen Kosten wird eine Sensitivitätsanalyse mit jährlichen, inflationsbereinigten Preissteigerungsraten von 3 %, 5 % und 7 % gemittelt über einen Zeitraum von 20 Jahren durchgeführt. Es wird angenommen, dass alle Energieträger den gleichen Preissteigerungsraten unterliegen. Die Energiepreise bildet Tabelle 12 ab.

Tabelle 12: Energiepreise in 2031 für jährliche, inflationsbereinigte Preissteigerungsraten von 3 %, 5 % und 7 %

Energiepreise in 2031 [€-Cent/ kWh]	Faktor 20 Jahre	Erdgas	Pellets	Hack-schnitzel	Scheit-holz	Strom	Strom Wärmepumpe	Fernwärme
Energiepreis 2011	1,0	6,66	4,93	3,01	5,26	25,08	17,52	8,23
Preissteigerung 3 % p. a.	1,4	9,1	6,7	4,1	7,3	34,2	23,9	11,2
Preissteigerung 5 % p. a.	1,7	11,3	8,4	5,1	9,1	42,7	29,8	14,0
Preissteigerung 7 % p. a.	2,1	14,2	10,5	6,4	11,5	53,6	37,4	17,6

### 3.8.5 Förderung nach dem KWKG

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) regelt die Abnahme und Vergütung von Strom aus

Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWKG-Strom). Verwendet wurden die Vergütungssätze des KWKGs in der Fassung vom 19.07.2012. Demnach setzen sich die Erlöse von KWKG-Anlagen aus drei Komponenten zusammen:

1. Preis für Grundlaststrom an der Strombörse der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig im jeweils vorangegangenen Quartal (für Anlagen mit einer Erzeugungsleistung von bis zu 2 MW, vgl. § 4 Absatz 3 Satz 3 KWKG),
2. KWKG-Zuschlag gemäß § 4 Absatz 3 Satz 1 in Verbindung mit § 7 ff. KWKG und
3. Entgelte für dezentrale Einspeisung gemäß § 4 Absatz 3 Satz 2 KWKG in Verbindung mit § 18 Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV).

Die erzeugte Strommenge wurde pro Jahr berechnet. Da der Einspeisezeitpunkt in der Zukunft liegt, kann die Berechnung der ersten Komponente nicht anhand des von der EEX angegebenen Preises für Grundlaststrom aus dem jeweils vorangegangenen Quartal erfolgen. Stattdessen wurde hierfür pauschal der Wert von 5 €-Cent/kWh angenommen<sup>21</sup>.

<sup>20</sup> Die Preise für Wärmepumpenstrom sind regional sehr unterschiedlich. Zudem wird zwischen Tag- und Nachtpreisen unterschieden. Ein überschlägiger Vergleich der in der UBA-Publikation 2011a angegebenen Preise für Wärmepumpenstrom wurde am Beispiel der Preisliste der Stadtwerke Karlsruhe (Stand: 01.02.2011) durchgeführt. Der überschlägige Vergleich ergab, dass der Preis aus der UBA-Publikation als geeignet erachtet werden kann.

<sup>21</sup> Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2012.



Der KWK-Zuschlag richtet sich nach dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme und der elektrischen Leistung der BHKW. Die angenommenen elektrischen Leistungen der dezentralen BHKW sind in der Tabelle 23 und die der Nahwärme-BHKW in der Tabelle 27 dargestellt. Da es sich um neu errichtete Anlagen handelt, richtet sich der KWK-Zuschlag nach § 7 Absatz 1 Satz 1 und Absatz 2 Satz 2 KWKG (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: KWK-Zuschlag nach § 4 Abs. 3 Satz 1 in Verbindung mit 7 Abs. 1 Satz 1 und Abs. 2 Satz 2 KWKG in der Fassung vom 19.07.2012

KWK-Zuschlag	KWK-Zuschlag (€-Cent/kWh)
Kleine KWK-Anlagen mit elektrischer Leistung bis zu 50 kW (§ 7 Abs. 1 Satz 1 KWKG)	
< 50 kW	5,41
Kleine KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 50 kW bis max. 2 MW (§ 7 Abs. 2 Satz 2 KWKG)	
> 50kW bis <del>+</del> 250 kW	4,00
> 250 kW bis <del>+</del> 2.000 kW	2,40

Die Berechnungsverfahren zur Ermittlung der dritten Komponente (Entgelte für dezentrale Einspeisung) sind sehr komplex und regional unterschiedlich. Die Netzvermeidungskosten wurden mit 0,5 €-Cent/kWh berücksichtigt<sup>22</sup>, da nicht alle für die Berechnung erforderlichen Daten ermittelt werden konnten. Die für die untersuchten BHKW berechneten KWK-Vergütungen sind im Anhang C aufgeführt.

Neben der Vergütung des KWK-Stroms fördert der Gesetzgeber auch den Netzausbau, indem er die Investitionskosten für den Neu- und Ausbau von Wärmenetzen bezuschusst. Der mittlere Nenndurchmesser des BHKW-Nahwärmenetzes beträgt 109,7 mm. Hierfür sieht das KWKG einen Förderzuschuss in Höhe von 30 % der ansatzfähigen Investitionskosten vor (§ 7a Absatz 1 Satz 2 Nummer 2 KWKG). Dieser beträgt 520.507 €. Die Förderung kommt nur für die Netzvariante 1 (siehe Seite 59) in der unsanierten und der EnEV 2009 Siedlung in Betracht. In der Passivhaussiedlung wird von einer Netzsanierung ausgegangen, die keinen Fördertatbestand des KWKG darstellt. Neben der Nahwärme-BHKW-Variante profitiert auch das Fernwärmenetz von der Förderung. Mit einem KWK-Anteil von 70 % erfüllt es den Fördertatbestand des § 5a Absatz 1 Nummer 2 in Verbindung mit § 7a Absatz 1 Nummer 2 KWKG<sup>23</sup>. Hier wurde die gleiche Höhe des Förderungszuschusses wie für die Nahwärmenetze angenommen.

### 3.9 Externe Kosten

Bei der Herstellung privater Güter (z. B. Stromerzeugung) werden (Umwelt-)Ressourcen (z. B. Luft) unentgeltlich in Anspruch genommen. Beeinträchtigt die unentgeltliche Inanspruchnahme der (Umwelt-)Ressourcen die Möglichkeit anderer diese (Umwelt-)Ressourcen zu nutzen (z. B. durch Luftverschmutzung), entstehen externe Effekte (vgl. Endres/Radke 2002: 57). Werden externe Effekte monetarisiert spricht man von externen Kosten. Externe Kosten beschränken sich auf den Teil der Kosten, der nicht den

<sup>22</sup> Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2012.

<sup>23</sup> Aufgrund der längeren Strecke und der höheren zu transportierenden Wärmemenge, ist davon auszugehen, dass der durchschnittliche Rohrdurchmesser der Fernwärme über dem des Nahwärmenetzes liegt. Damit ist ebenfalls der Fördertatbestand des § 7a Absatz 1 Nummer 2 KWKG erfüllt.

Verursachern angelastet wird (vgl. UBA 2013: 10). Damit erweitern externe Kosten ökonomische Betrachtungen von der betriebswirtschaftlichen Perspektive einzelner Akteure zur gesamten, volkswirtschaftlichen Perspektive.

Das UBA hat eine Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten entwickelt, in der Maßstäbe für die ökonomische Bewertung von externen Umweltkosten untersucht und festgelegt wurden (vgl. UBA 2007c). Auf der Basis dieser Methodenkonvention wurden die Kostensätze für externe Effekte für den Verkehr-, Energie- und Gebäudebereich ermittelt und 2012 aktualisiert (vgl. UBA 2007a, Fraunhofer ISI 2012). Die hier verwendeten Kostensätze führt Tabelle 14 auf.

Tabelle 14: Kostensätze für Umweltschäden (€/kWh) der Energieträger zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung (vgl. Fraunhofer ISI 2012)

Energieträger zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung	Externe Kosten (€/kWh)
Strommix Deutschland 2010 (mit Kernkraft) <sup>24</sup>	0,078
Erdgas	0,0228
Biomasse*	0,0188
Fernwärme mit Netzverlusten**	0,0348

\* Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert für Biomasse gasförmig, flüssig und fest (Haushalte und Industrie), Bandbreite von 0,56 – 3,2 €-Cent/kWh.

\*\* Angaben zum Kraftwerksmix wurden nicht gemacht.

Diese Kostensätze für Umweltschäden beziehen sich auf den Anlagenbestand in Deutschland. Derzeit liegen keine Kostensätze für Anlagen nach dem Stand der Technik vor, weshalb die vorgenannten Kostensätze verwendet werden. Es handelt sich also um eine obere Abschätzung.

Die Kostensätze für externe Effekte können im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsanalysen als Energiepreiszuschläge auf die marktüblichen Energiepreise aufgeschlagen werden (vgl. UBA 2007a: 63).

## 4 Untersuchungsgegenstand

### 4.1 Siedlungsgebiet „Linkenheim-Hochstetten“

Untersucht werden soll eine Siedlung, die sowohl repräsentativ für ein ländliches Gebiet als auch für ein Stadtrandgebiet ist. Die Wahl fiel auf einen Stadtteil der Gemeinde Linkenheim-Hochstetten. Die Abbildung 7 zeigt einen Auszug der ausgewählten Gemeinde, wobei die rote Markierung das untersuchte Modellgebiet eingrenzt. Das Modellgebiet war 2009/2010 Gegenstand eines Forschungsvorhabens (UBA 2010), weshalb geeignete Daten zum Gebäudebestand des Modellgebietes zur Verfügung standen.

---

<sup>24</sup> Der Wert für die externen Kosten „Strommix Deutschland (mit Kernkraft)“ entspricht den Kosten der Stromerzeugung im Jahr 2010. Die Streubreiten für die Bewertung der externen Kosten der Kernkraft sind sehr hoch, weswegen man sich an der politischen Zahlungsbereitschaft zum Ausstieg aus der Kernenergie orientiert hat. Demnach werden die Risiken der Kernenergie mindestens so hoch eingeschätzt wie die durch Braunkohle verursachten Umweltschäden. Entsprechend wurde für die Kernenergie die Höhe der externen Kosten der Braunkohle (0,1075 €/kWh) angesetzt (vgl. UBA 2007a: 62, UBA 2012b: 29).

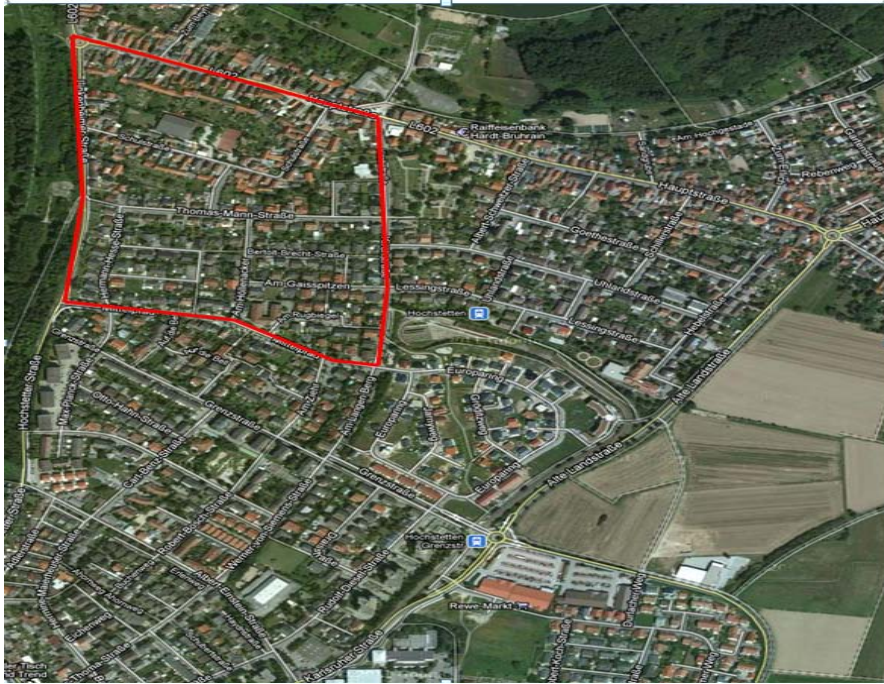


Abbildung 7: Gemeinde Linkenheim-Hochstetten: rote Markierung grenzt das untersuchte Modellgebiet ein (Auszug aus Google-Maps)

Die Gemeinde Linkenheim-Hochstetten liegt in Baden-Württemberg, ca. 18 km nördlich von Karlsruhe, und zählt 11.883 Einwohner<sup>25</sup>. In dem untersuchten Modellgebiet leben ca. 975 Personen (vgl. UBA 2010: 13). In der Abbildung 8 ist die Siedlungsstruktur des untersuchten Modellgebietes dargestellt. Das untersuchte Siedlungsgebiet ist in einen älteren Ortsbereich mit Straßenrandbebauung (orange Markierung) und in einen Bereich mit einer Bebauungsstruktur, die typisch für junge Baugebiete ist (blaue Markierung) aufgeteilt (vgl. UBA 2010: 13).

---

<sup>25</sup> Vgl. Das Kreismagazin 2012.



Abbildung 8: Siedlungsstruktur des untersuchten Modellgebietes (UBA 2010: 14)

Der ältere Ortsbereich mit Straßenrandbebauung entspricht dem Siedlungstyp „ehemaliger/städtischer Dorfkern“ (ST3a, siehe Kapitel 4.1.). Mit den am Straßenverlauf ausgerichteten Häusern, die direkt an den Gehweg grenzen, weist dieser Bereich ein wesentliches Merkmal des Siedlungstyps ST3a auf. Typischerweise sind bei diesem Siedlungstyp Ein-, Zwei- und kleine Mehrfamilienhäuser mit gewerblicher Nutzung und kleine öffentliche Gebäude zu finden (vgl. Erhorn-Kluttig u. a. 2011: 38). Es wird angenommen, dass die Mehrfamilienhäuser nicht der gewerblich, sondern ausschließlich zu Wohnzwecken genutzt werden. Außerdem befindet sich in diesem Bereich ein Schulgebäude. Das jüngere Baugebiet weist hingegen wesentliche Merkmale des Siedlungstyps ST5a „Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser“ auf. Die Häuser sind entsprechend dem Siedlungstyp ST5a am Straßenrand ausgerichtet, und das Straßennetz ist geometrisch angeordnet. Jedoch unterscheiden sich die hier zu findenden Gebäudetypen von dem Siedlungstyp ST5a insofern, dass statt Mehrfamilienhäusern hier überwiegend Einfamilienhäuser zu finden sind.

165 Einfamilienhäuser (EFH), 32 Reihenhäuser (RH) und Doppelhaushälften (DHH), 57 Mehrfamilienhäuser (MFH), 57 Anbauten, Scheunen und Werkstätten sowie 9 Sondergebäude befinden sich in dem Modellgebiet<sup>26</sup>. Aus Gründen der Praktikabilität werden folgende Annahmen zum Gebäudebestand getroffen:

---

<sup>26</sup> Vgl. IFK2011.

- Die Gebäudetypen EFH, RH und DHH werden zu einem Gebäudetyp "EFH" zusammengefasst. Nähere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 5.2. Referenzgebäude.
- Anbauten, Scheunen und Werkstätten werden nicht berücksichtigt, weil für diese Gebäudetypen keine Daten von Sanierungsprojekten vorliegen.
- Damit der Energiebedarf der Sondergebäude den gesamten Energiebedarf der Siedlung nicht dominiert, wird die Anzahl der Sondergebäude von neun auf drei reduziert. Näher Erläuterungen hierzu im Kapitel 5.2. Referenzgebäude.

In der Tabelle 15 sind die Angaben von UBA 2010 den getroffenen Annahmen zur Anzahl der jeweiligen Gebäudetypen im untersuchten Modellgebiet gegenübergestellt.

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Angaben von UBA 2010 und der in dieser Arbeit getroffenen Annahmen zur Anzahl der Gebäudetypen im Modellgebiet

Gebäudetyp	Anzahl nach Angaben der Autoren (UBA 2010)	Annahmen der vorliegenden Studie
Einfamilienhaus	165	197 (EFH)
Reihenendhaus, Doppelhaushälfte	32	
Mehrfamilienhaus	57	57 (MFH)
Anbauten, Scheune, Werkstatt	57	0
Nicht-Wohngebäude	9	3
<b>Summe</b>	<b>320</b>	<b>257</b>

Die Wärmehöchstlast des Modellgebietes beträgt 8,9 MW im unsanierten Gebäudebestand, 3,2 MW in der EnEV 2009-Siedlung und 1,1 MW in der Passivhaus-Siedlung.

Es wurde auch der Strombedarf der Siedlung für die Straßenbeleuchtung berücksichtigt. Bei der Berechnung des Stromverbrauches für die Straßenbeleuchtung wird zwischen zwei Szenarien unterschieden. Im unsanierten Gebäudebestand und beim Energiestandard EnEV 2009 wird von einem Stromverbrauch von 42 kWh pro Jahr und Einwohner ausgegangen, was in Summe einen Stromverbrauch von 40.950 kWh/a ergibt. Der Wert von 42 kWh pro Jahr und Einwohner entspricht dem mittleren jährlichen Verbrauch einer Kommune (ages GmbH 2005: 78). Es wird davon ausgegangen, dass die Sanierung einer gesamten Siedlung auf Passivhaus-Niveau über einen langen Zeitraum erfolgt. Deswegen wird in der Passivhaus-Siedlung ein Stromverbrauch von 10,5 kWh pro Jahr und Einwohner angenommen, was einem Gesamtstromverbrauch von 10.238 kWh/a und einer Effizienzsteigerung von 75 % entspricht<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Nach Angaben von meer.sh in „mehr Energieeinsparung und regenerative Energien für Schleswig-Holstein“ (meer.sh) kann bei der Straßenbeleuchtung durch den Einsatz von Natriumdampf-Hochdrucklampen mit zeitgemäßen Vorschaltgeräten der Energieverbrauch um 75% reduziert werden. Der Stromverbrauch lässt sich auch durch folgende Maßnahmen optimieren: 1. Spannungsabsenkung mit dem Ziel der gleichmäßigen Reduzierung der Beleuchtungsstärke: bedarfsgerechte Anpassung der Lichtintensität, 2. Halbnachtschaltung: intelligente selbstregelnde elektronische Steuerungen in den Leuchten, so dass einzelne Lampen flexibel ausgeschaltet werden können, 3. Austausch älterer Sensoren (vgl. Investitionsbank Schleswig-Holstein 2006).



## 4.2 Referenzgebäude

### 4.2.1 Geometrische und Energetische Parameter der Wohngebäude

Die Gebäudetypen EFH, RH und DHH entsprechen dem Gebäudetyp RH\_H des IWU (vgl. IWU 2005: 5, Diefenbach/Loga 2011). Der IWU-Gebäudetyp RH\_H ist ein Reihenendhaus und wurde ausgesucht, weil dessen Oberflächen-Volumen-Verhältnis ( $A/V$ ) zwischen dem eines Einfamilienhauses und dem eines Reihemittelhauses liegt (vgl. UBA 2010: 3). Als Referenzgebäude für den Gebäudetyp MFH dient der IWU-Gebäudetyp MFH\_H (vgl. IWU 2005: 6).

Die wichtigsten geometrischen Parameter können der Tabelle 16 entnommen werden. Die Baualtersklasse beider Gebäudetypen beträgt 1984 bis 1994. Für detaillierte Informationen wird auf die Datensätze des IWU verwiesen.

Tabelle 16: Ausgewählte geometrische Parameter der Referenzgebäude RH\_H und MFH\_H (vgl. IWU 2005: 5, 6)

Geometrische Parameter	RH_H	MFH_H
Energiebezugsfläche nach PHPP (m <sup>2</sup> )	116	707,4
Gebäudenutzfläche nach EnEV (m <sup>2</sup> )	134,7	772,2
Anzahl Vollgeschosse	2	3
Anzahl Wohneinheiten	1	10

Zu den wichtigsten energetischen Parametern für die Auslegung der untersuchten Wärmeversorgungssysteme gehören der Heizwärme- und Warmwasserbedarf sowie die Heizlast. Die energetischen Parameter der Heizwärmebedarfe und Heizlasten wurden aus UBA 2011a entnommen. Der Warmwasserbedarf beträgt 12,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) bezogen auf die EnEV-Gebäudenutzfläche  $A_N$ . Die energetischen Kennzahlen wurden auf die Energiebezugsfläche nach PHPP bezogen und der Warmwasserbedarf entsprechend umgerechnet. Außerdem wurde der Strombedarf der Wohngebäude berücksichtigt. Nach Angaben der Energieagentur.NRW beträgt der Strombedarf eines 2,5 Familienhaushaltes ohne elektrische Warmwasserbereitung 3.733 kWh/a (vgl. Energieagentur.NRW 2011: 5). Dieser Wert wurde für den unsanierten Gebäudebestand und für den Energiestandard EnEV 2009 sowohl für das Referenzgebäude RH\_H als auch für MFH\_H pro Wohneinheit angenommen. Für die Passivhaus-Siedlung wurde für das Referenzgebäude RH\_H ein Gesamtstromverbrauch von 1.624 kWh/a bei den Varianten mit Solarthermie angenommen. Diese Stromverbräuche entsprechen den Angaben des Passivhaus Institutes. Demnach kann bereits zum heutigen Zeitpunkt der Stromverbrauch für Haushaltsstrom, Lüftung und alle übrigen Stromverbräuche inkl. Solarregelung und Pumpen auf 14 kWh/(m<sup>2</sup>a) gesenkt werden (vgl. Passivhaus Institut 2012d). Bei dem Referenzobjekt RH\_H ohne Solarthermie wurde entsprechend der Strombedarf für die Solarpumpe von 33 kWh/a abgezogen, wodurch sich ein Gesamtstrombedarf von 1.591 kWh/a ergibt. Diese Werte wurden auch für jede Wohneinheit des Referenzgebäudes MFH\_H angenommen. Die energetischen Parameter der Referenzgebäude RH\_H und MFH\_H sind in der Tabelle 17 für die jeweiligen Energiestandards zusammengefasst. Neben dem Haushaltsstrom werden bei den Berechnungen auch der Hilfsenergiebedarf für die Wärmeversorgungssysteme und der Strom für die Lüftungsanlage berücksichtigt.

Tabelle 17: Energetische Parameter der Referenzgebäude RH\_H und MFH\_H (vgl. UBA 2011a: 15)

Energetische Parameter	Einheiten	unsaniert	EnEV 2009	Passivhaus
RH_H Heizwärmebedarf	kWh/(m <sup>2</sup> a)	221	54	15
RH_H Warmwasserbedarf	kWh/(m <sup>2</sup> a)	14,5	14,5	14,5
RH_H Heizlast	kW	14,7	5,1	1,6
RH_H Haushaltsstrom (m. / o. S.)	kWh/a	3.733	3.733	1.624/1.591
MFH_H Heizwärmebedarf	kWh/(m <sup>2</sup> a)	233	49	9
MFH_H Warmwasserbedarf	kWh/(m <sup>2</sup> a)	13,7	13,7	13,7
MFH_H Heizlast	kW	82,3	29,3	9,5
MFH_H Haushaltsstrom (m. / o. S.)	kWh/a	37.330	37.330	16.240/15.910

#### 4.2.2 Geometrische und Energetische Parameter der Nicht-Wohngebäude

Der Anteil des Heizwärmebedarfs der beiden Bürogebäude und der Mittelschule am gesamten Heizwärmebedarf der Siedlung beträgt in der unsanierten Siedlung 13 % und in der EnEV 2009-Siedlung 19 %. In der Passivhaus-Siedlung steigt der Anteil auf 37 % an, was auf die Sanierung der Bürogebäudes mit Passivhaus-Komponenten und nicht auf Passivhaus-Niveau zurückzuführen ist.

Als Referenzgebäude für die beiden Bürogebäude im Modellgebiet wurde das Rathaus der Stadt Löhne gewählt. Hierzu liegen sowohl geometrische als auch energetische Gebäudedaten aus einer in 2010 erstellten Vorhabenbeschreibung zum BMU-Antrag zur Förderung der Umsetzung von Modellprojekten in der nationalen Klimaschutzinitiative vor. Mit den beantragten Fördermitteln plant die Stadt Löhne, das Rathaus mit Passivhauskomponenten zu sanieren und den spezifischen Heizwärmebedarf von 140,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf 34,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) zu senken<sup>28</sup> (vgl. Löhne 2010: 4).

Die Josef-Zerhoch-Mittelschule dient als Referenzgebäude für eine Schule im Modellgebiet. Auch hierzu liegen geometrische und energetische Daten aus einem Fördermittelantrag vor, der 2011 bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gestellt wurde. Im Rahmen des Umbaus soll die sanierungsbedürftige Mittelschule auf Passivhausniveau saniert werden<sup>29</sup> (vgl. Josef-Zerhoch-Mittelschule 2011).

Sowohl das Rathaus Löhne als auch die Josef-Zerhoch-Mittelschule werden als Referenzgebäude ausgewählt. Die Mittelschule ist für ca. 580 Schüler ausgelegt, weshalb sie hinsichtlich der Größe im Verhältnis zur Einwohnerzahl als geeignet angesehen wird<sup>30</sup>. Auch die Größe des Bürogebäudes erscheint für die Einwohnerzahl und Siedlungsgröße verhältnismäßig. In der Abbildung 9 sind die Bilder und in der Tabelle 18 die relevanten geometrischen Daten der Nicht-Wohngebäude dargestellt.

<sup>28</sup> Weitere Informationen zum Sanierungsprojekt „Rathaus Löhne“ siehe <http://www.loehne.de/Rathaus/passivbewegt/Das-Projekt> (21.03.2012).

<sup>29</sup> Weitere Informationen zu dem Sanierungsprojekt „Josef-Zerhoch-Mittelschule“ siehe [http://www.dbu.de/123artikel32167\\_335.html](http://www.dbu.de/123artikel32167_335.html), (25.08.2012).

<sup>30</sup> Das Einzugsgebiet beschränkt sich nicht auf die in dieser Arbeit gegenständliche Siedlung.



Abbildung 9: Bilder der unsanierten Referenzgebäude Rathaus Löhne (links) und Josef-Zerhoch-Mittelschule (rechts)

Tabelle 18: Geometrische Parameter der Referenzgebäude Rathaus Löhne und Josef-Zerhoch-Mittelschule (vgl. Löhne 2010, Josef-Zerhoch-Mittelschule 2011)

Geometrische Parameter	Rathaus Löhne	Josef-Zerhoch-Mittelschule
Energiebezugsfläche nach PHPP (m <sup>2</sup> )	k. A. <sup>31</sup>	3.993
Gebäudenutzfläche nach EnEV (m <sup>2</sup> )	5.070	6.827
Anzahl Mitarbeiter/Schüler	k. A.	440

Die energetischen Parameter der Sondergebäude beschränken sich auf die Heizwärmebedarfe und Heizlasten. Es wird davon ausgegangen, dass in den Sondergebäuden keine Warmwasseranschlüsse vorhanden sind. Warmwasser wird in der Regel über elektrische Durchlauferhitzer oder mittels kleiner Untertisch-Speicher erzeugt. Tabelle 19 stellt die energetischen Parameter für die Referenzgebäude dar, die – sofern vorhanden – aus den Fördermittelanträgen übernommen wurden. Hinsichtlich des Stromverbrauches des Bürogebäudes wurden in dem Fördermittelantrag Angaben zum unsanierten Zustand und zum Passivhaus-Standard gemacht. Der Stromverbrauch für den Energiestandard EnEV 2009 wurde anhand der Verbrauchskennwerte der ages GmbH ermittelt. Für die Berechnung wurde das untere Quartilsmittel des Stromverbrauchs in Bürogebäuden mit 10 kWh/(m<sup>2</sup><sub>Nutzfläche</sub>a) angenommen (ages GmbH 2005: 27). Der Fördermittelantrag der Mittelschule enthält Angaben zum Stromverbrauch von allen drei Energiestandards. Die in der Tabelle 19 angegebenen Strombedarfe der Sondergebäude verstehen sich inklusive des Hilfsenergiebedarfs der Wärmeversorgungssysteme und des Strombedarfs der Lüftungsanlage.

Tabelle 19: Energetische Parameter der Nicht-Wohngebäude

Energetische Parameter	Einheiten	unsaniert	EnEV 2009	Passivhaus bzw. Sanierung mit Passivhaus-Komponenten
Heizwärmebedarf Bürogebäude	kWh/(m <sup>2</sup> a)	178,3	45,5	34,6
Heizlast Bürogebäude	kW	450	157,7	87,3
Stromverbrauch Bürogebäude	kWh/a	75.000	50.700	28.000
Heizwärmebedarf Mittelschule	kWh/(m <sup>2</sup> a)	183,6	76,8	13,8
Heizlast Mittelschule	kW	364,9	209,6	27,4
Stromverbrauch Mittelschule	kWh/a	148.280	122.988	70.395

<sup>31</sup> Aufgrund der fehlenden Angaben im Fördermittelantrag zur Energiebezugsfläche PHPP wird in der vorliegenden Arbeit für die weitere Berechnung angenommen, dass die Energiebezugsfläche PHPP der Gebäudenutzfläche der EnEV (5.070 m<sup>2</sup>) entspricht.



## 4.3 Wärmeversorgungssysteme

### 4.3.1 Übersicht

Der Untersuchungsgegenstand sind verschiedene Systeme für die Versorgung einer Siedlung mit Wärme (und Strom). Diese unterscheiden sich nach leitungsgebundenen, „zentralen“ Systemen mit zentralem Wärmeerzeuger für die Siedlung und nicht-leitungsgebundenen, „dezentralen“ Systemen, bei denen jedes Haus über einen eigenen Wärmeerzeuger verfügt. Nicht jedes Wärmeversorgungssystem ist für jeden Energiestandard gleichermaßen geeignet. Für den unsanierten Gebäudebestand und den Energiestandard EnEV 2009 wurden jeweils 11 (8 dezentrale und 3 zentrale) und für die Passivhaus-Siedlung 16 (10 dezentrale und 6 zentrale) Wärmeversorgungssysteme untersucht. In der Tabelle 20 sind die hier untersuchten dezentralen Wärmeversorgungssysteme dargestellt.

Tabelle 20: Übersicht der ausgewählten dezentralen Wärmeversorgungssysteme für Einzelgebäude

Wärmeversorgungssystem	Brennstoff / Wärmequelle
<b>Energiestandard: unsaniert</b>	
Brennwertkessel (mit / ohne Solarthermie)	Erdgas
Holzkessel (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus, Nicht-Wohngebäude - Mehrfamilienhaus	Pellets Hackschnitzel
Luft-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme
dezentrale BHKW (Verbrennungsmotor)	Erdgas
<b>Energiestandard: EnEV 2009</b>	
Brennwertkessel (mit / ohne Solarthermie)	Erdgas
Holzkessel (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus, Nicht-Wohngebäude - Mehrfamilienhaus	Pellets Hackschnitzel
Luft-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme
dezentrale BHKW (Verbrennungsmotor)	Erdgas
<b>Energiestandard: Passivhaus</b>	
Brennwertkessel (mit / ohne Solarthermie)	Erdgas
Pelletkessel/Kaminöfen (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus (Kaminofen) - Mehrfamilienhaus / Nicht-Wohngebäude (Holzkessel)	Scheitholz Pellets
Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie) - Einfamilienhaus (Luft-Luft-Wärmepumpe) - Mehrfamilienhaus / Nicht-Wohngebäude (Sole-Wasser-Wärmepumpe)	Strom / Umweltwärme
Sole-Wasser-Wärmepumpen (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme
Stromdirektheizungen (mit / ohne Solarthermie)	Strom

Die Gas-Brennwertkessel sind das Referenzsystem bei den dezentralen Wärmeversorgungssystemen, weswegen diese Variante für alle Energiestandards berechnet wurde. Durch die Kombinationen zweier verschiedener Arten von Holzfeuerungsanlagen bei den Energiestandards: unsaniert, EnEV 2009 und Passivhaus

und zweier verschiedener Wärmepumpentypen in der Passivhaus-Siedlung konnten verschiedene dezentrale Wärmeversorgungssysteme berücksichtigt und gleichzeitig die Anzahl der zu untersuchenden Varianten verringert werden. Bei der Auswahl der zu kombinierenden Wärmeversorgungssysteme wurde darauf geachtet, dass sie für den jeweiligen Gebäudetyp technisch geeignet sind.

Die Tabelle 21 enthält eine Übersicht der zentralen Wärmeversorgungsvarianten.

Tabelle 21: Übersicht der ausgewählten zentralen Wärmeversorgungssysteme

Wärmeversorgungssystem	Brennstoff / Wärmequelle
<b>Energiestandard: unsaniert</b>	
Fernwärme	70 % KWK, 30 % Heizwerk
Nahwärme-BHKW (Verbrennungsmotor) und Spitzenlastkessel	Erdgas
Nahwärme-Holzheizwerk und Spitzenlastkessel (mit/ohne Solarthermie)	Hackschnitzel, Erdgas
<b>Energiestandard: EnEV 2009</b>	
Fernwärme	70 % KWK, 30 % Heizwerk
Nahwärme-BHKW (Verbrennungsmotor) und Spitzenlastkessel	Gas
Nahwärme-Holzheizwerk und Spitzenlastkessel (mit/ohne Solarthermie)	Hackschnitzel, Erdgas
<b>Energiestandard: Passivhaus</b>	
Fernwärme	70 % KWK, 30 % Heizwerk
Nahwärme-BHKW (Verbrennungsmotor) und Spitzenlastkessel	Erdgas
Nahwärme-Holzheizwerk und Spitzenlastkessel (mit/ohne Solarthermie)	Hackschnitzel, Erdgas
Kalte Nahwärme (mit / ohne Solarthermie)	Strom, Umweltwärme

Bei den zentralen Wärmeversorgungssystemen soll die Fernwärme als Referenzsystem dienen. Annahmen zum Brennstoffmix wurden nicht getroffen.

#### 4.3.2 Dezentrale Wärmeversorgungssysteme

Bei den dezentralen Wärmeversorgungssystemen wurden für die Ein- und Mehrfamilienhäuser die Daten aus UBA 2011a auf das Modellgebiet übertragen. Das betrifft zum einen die Aufwandszahlen, Aufschläge für Speicherung, Übertragung und Verteilung, spezifische Endenergiebedarfe für Heizung und Warmwasser, Hilfsenergiebedarfe und Energiebedarfe für Lüftungsanlagen. Zum anderen wurden auch die Annahmen zu Heizungspufferspeichern, solarthermischen Anlagen und die Randbedingungen für die verschiedenen Heizungssysteme aus der Publikation übernommen (UBA 2011a: 5ff.). Die solarthermischen Anlagen dienen ausschließlich der Warmwasserbereitung. Die Leistungen der Wärmeerzeuger ergeben sich aus den Heizlasten der Wohngebäude (siehe Tabelle 17). Für die BHKW der Mehrfamilienhäuser wurden die thermischen Leistungen nach VDI 4655 berechnet (siehe Tabelle 23). In den Einfamilienhäusern sind die BHKW – wie auch die anderen Wärmeversorgungssysteme – auf die gesamte Heizlast ausgelegt.

Der Dimensionierung der dezentralen Wärmeversorgungssysteme für die Nicht-Wohngebäude liegen eigene Berechnungen zugrunde. Aufgrund fehlender Daten zu den Aufschlägen für Speicherung, Übertragung und Verteilung, die für die Berechnung der Leistungsgröße erforderlich sind, wurden die Daten des Referenzgebäudes MFH aus der UBA-Publikation 2011a verwendet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 22

zusammengefasst. Es wurde die nächstgrößere Leistungsklasse gewählt, sofern die Wärmeversorgungssysteme nicht in der berechneten Leistung verfügbar war. Die Wärmepumpen wurden kaskadiert, um die erforderliche Leistungsgröße zu erhalten.

Tabelle 22: Thermische Leistungen dezentraler Wärmeversorgungssysteme von Nicht-Wohngebäuden

dezentrales Wärmeversorgungssystem	thermische Leistung (kW) Bürogebäude			thermische Leistung (kW) Mittelschule		
	unsaniert	EnEV 2009	Passiv- haus	unsaniert	EnEV 2009	Passiv- haus
Gas-Brennwertkessel	491	172	92	398	228	29
Niedertemperatur-Pelletkessel	490,5	173,5	91,7	397,7	230,6	28,8
Sole-Wasser-Wärmepumpe	-	-	88,6	-	-	27,8
Luft-Wasser-Wärmepumpe	481,5	173,5	-	390,4	230,6	-
BHKW	194	50	-	156	65	-
Stromdirektheizungen	-	-	91,7	-	-	28,8

Bei den dezentralen BHKW wird der KWK-Strom vorrangig in den Gebäuden genutzt. Der überschüssige Strom wird in das Stromnetz eingespeist. Die Berechnung des eingespeisten Stroms erfolgt als Jahresbilanz. Bei minuten- bzw. stundenscharfer Betrachtung des Strombedarfs kann sich eine andere Stromeinspeisequote ergeben. Die Ermittlung der thermischen Leistungen der dezentralen BHKW für die Sondergebäude erfolgte analog der Auslegung der Nahwärme-BHKW. Details hierzu siehe Seite 64. Die gemäß der VDI 4655 ermittelten Referenzlastprofile sind im Anhang A dargestellt. Die Spitzenlastkessel für die BHKW wurden aus Gründen der Versorgungssicherheit nach den gesamten Heizlasten der jeweiligen Sondergebäude ausgelegt. Tabelle 23 fasst die Leistungen, Wirkungsgrade und Stromkennzahlen der dezentralen BHKW für die Ein- und Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude und die Mittelschule zusammen. Die Leistungen sowie Wirkungsgrade der BHKW der Sondergebäude wurden anhand ASUE 2011 ermittelt. Die Heizleistungen der BHKW der Ein- und Mehrfamilienhäuser stammen aus UBA 2011a. Für jedes Gebäude wurde anhand ASUE 2011 eine BHKW-Anlage ermittelt (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23: Übersicht der elektrischen und thermischen Leistungen (kW) und Wirkungsgrade (%) sowie der Stromkennzahlen der dezentralen BHKW (vgl. UBA 2011a: 12, Anhang C, ASUE 2011: Anhang B, eigene Berechnungen)

Referenzgebäude/ Energiestandard	$P_{el}$ (kW)	$P_{th}$ (kW)	$\eta_{el}$	$\eta_{th}$	$\eta_{gesamt}$	Strom- kennzahl
EFH unsaniert	8	15	29,3 %	58,6 %	87,9 %	0,500
EFH EnEV 2009	1,3 - 4,7	4,0 - 12,5	25,0 %	65,0 %	90,0 %	0,385
MFH unsaniert	12	26	27,9 %	60,5 %	88,4 %	0,461
MFH EnEV 2009	4	6,5	25,0 %	65,0 %	90,0 %	0,385
Bürogebäude unsaniert	119	194	34,9 %	56,9 %	91,8 %	0,613
Bürogebäude EnEV 2009	25	50	29,0 %	56,0 %	85,0 %	0,518
Mittelschule unsaniert	105	156	35,8 %	53,0 %	88,8 %	0,675
Mittelschule EnEV 2009	30	65	28,3 %	61,3 %	89,6 %	0,462

Die elektrischen Wirkungsgrade von BHKW nehmen mit sinkender elektrischer Nennleistung ab, während die thermischen Wirkungsgrade steigen; d.h die

Stromkennzahl sinkt (vgl. Abbildung 10, Tabelle 23, Tabelle 27). Je kleiner das BHKW ist, desto weniger Strom wird erzeugt, um die gleiche Wärmemenge zu erhalten.

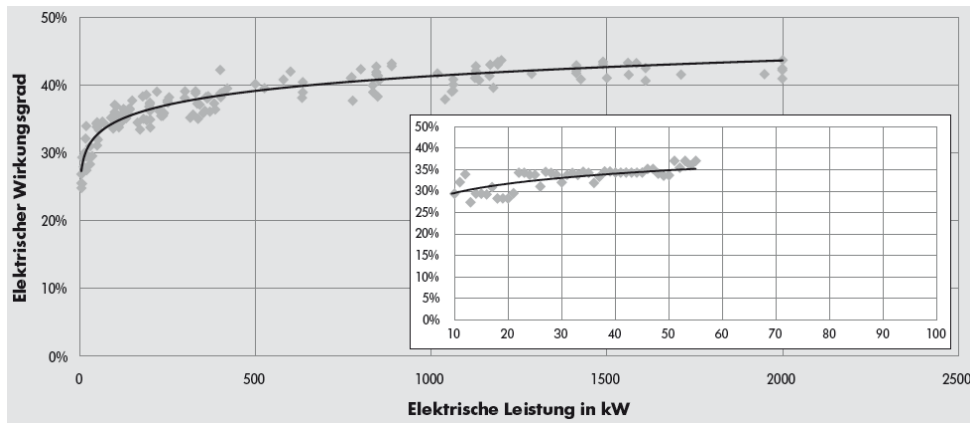


Abbildung 10: Elektrische Wirkungsgrade in Abhängigkeit der elektrischen Leistung von Erdgas-BHKW (ASUE 2011: 9)

### 4.3.3 Zentrale Wärmeversorgungssysteme

#### Vor- und Nachteile von Wärmenetzen

Aufgrund des zu erwartenden Bevölkerungsrückgangs und der zunehmenden energetischen Sanierung von Gebäuden wird zukünftig der Wärmebedarf von Siedlungen stetig sinken. Die Adaption der Wärmenachfrage an sich verändernde Rahmenbedingung ist neben der Wirtschaftlichkeit ein wichtiges Kriterium, das bei der Modernisierung von Wärmeversorgungssystemen zu berücksichtigen ist. Zwar sind die Investitionskosten für die Verlegung und das Material von Wärmenetzen kapitalintensiv. Jedoch kann eine spätere Adaption der nunmehr zentralen Wärmeerzeugung an sinkende Wärmebedarfe wirtschaftlicher und mit weniger Arbeitsaufwand erfolgen. Statt die Kessel aller Wohngebäude in einer Siedlung auszutauschen, muss lediglich das Wärmeversorgungssystem der Nahwärmestation an den aktuellen Wärmebedarf angepasst werden. Aufgrund der sukzessiven Veränderung des Siedlungs-Wärmebedarfs empfiehlt sich der Austausch einer Anlage, wenn sie wirtschaftlich abgeschrieben ist. Zudem sind die Effizienz und Wirtschaftlichkeit größerer Anlagen (bspw. bei BHKW) in der Regel besser als bei Anlagen für Einfamilienhäuser (vgl. Pehnt 2009: 171). Auch kann der Wechsel zur umweltfreundlicheren Kraft-Wärme-Kopplung bzw. von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern leichter vollzogen werden. Vorteilhaft ist zudem, dass die Größe der BHKW und der Spitzenlastkessel so gewählt werden kann, dass diese auch bei sinkendem Wärmebedarf gut ausgelastet und wirtschaftlich sind. So können bspw. zwei Spitzenlastkessel in der Nahwärmestation betrieben werden, wobei ein Spitzenlastkessel bei sinkendem Wärmebedarf nur noch der Versorgungssicherheit dient. Nahwärmenetze bieten auch den Vorteil hoher Versorgungssicherheit und hohe Flexibilität des Brennstoffeinsatzes (vgl. Pehnt 2009: 171). Vorteile ergeben sich auch hinsichtlich des Platzbedarfs und der Wartungskosten. Gesamtwirtschaftlich gesehen ist es günstiger, eine große statt mehrere kleine Anlagen zu warten. Hingegen wird von Hausbesitzern die Abhängigkeit von einem Versorger als negativ beurteilt (Pehnt 2009: 172). Für die Betreiber von Fern- und Nahwärmenetzen hängt die Wirtschaftlichkeit wesentlich von der Anschlussquote ab – je höher die Anschlussquote, desto besser die Wirtschaftlichkeit.

## TOPOGRAPHIE DER NAHWÄRMENETZE

Für das untersuchte Modellgebiet wurden drei verschiedene Nahwärmenetz-Varianten modelliert, wobei die in der Abbildung 11 dargestellte Netztopographie für alle Varianten angenommen wurde. Die Trassenlänge des Nahwärmenetzes beläuft sich inklusive der Hausanschlussleitungen auf 5.055 Trassenmeter (trm). Für die Dimensionierung wurde das Nahwärmenetz in fünf Teilnetze unterteilt, die in der Abbildung 11 unterschiedlich farblich markiert sind. Die Teilnetze wiederum setzen sich aus mehreren Rohrabschnitten (RA) zusammen.



Abbildung 11: Topographie der Nahwärmenetze, bestehend aus fünf Teilnetzen (RA = Rohrabschnitt)

## NETZVARIANTEN UND DIMENSIONIERUNG DER NAHWÄRMENETZE

Den unterschiedlichen Netzvarianten liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Netzvariante 1* wird für den unsanierten Gebäudebestand und für den Energiestandard EnEV 2009 verwendet. D.h. bei beiden Energiestandards werden dasselbe Rohrmaterial und dieselben Rohrdurchmesser angenommen. Die Temperaturspreizung beträgt 20 K (Vorlauftemperatur: 90 °C, Rücklauftemperatur: 70 °C).
- Netzvariante 2*: Eine zweite Netzvariante wurde für die Passivhaus-Siedlung berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Sanierung einer gesamten, bereits von einem Wärmenetz versorgten Siedlung auf Passivhaus-Niveau über einen langen Zeitraum erfolgt. Da der Wärmebedarf einer Passivhaus-Siedlung weit unter dem einer unsanierten Siedlung liegt und der Sanierungszeitraum sich über

viele Jahre erstreckt, ist eine Sanierung des Nahwärmenetzes wahrscheinlich. Auch der Umstand, dass die Netzverluste eines unsanierten Wärmenetzes auf bis zu 32 % des Wärmebedarfs der untersuchten Siedlung im Passivhausstandard ansteigen können, spricht für eine Netzsanierung. Dieses Szenario deckt gleichzeitig den Fall ab, dass eine energetisch hervorragend sanierte Siedlung nachträglich mit einem Wärmenetz ausgestattet wird. In diesem Fall würden Fördermittel für den Netzneubau die Wirtschaftlichkeit verbessern. Die Netzvariante 2 wird mit dem gleichen Rohrmaterial wie die Netzvariante 1 modelliert, unterscheidet sich jedoch in den Rohrdurchmessern, welche gegenüber der unsanierten Siedlung um rund die Hälfte reduziert werden konnten. Auch hier beträgt die Temperaturspreizung 20 K, jedoch auf niedrigerem Temperaturniveau (Vorlauftemperatur: 70 °C, Rücklauftemperatur: 50 °C).

- c) *Netzvariante 3:* Für die kalte Nahwärme wurde eine dritte Netzvariante modelliert. Die kalte Nahwärme wird nur für die Passivhaus-Siedlung untersucht, sodass das kalte Nahwärmenetz eine Alternative der Netzvariante 2 ist. Diese Netzvariante unterscheidet sich sowohl hinsichtlich des Rohrmaterials (Details hierzu siehe Seite 61) als auch hinsichtlich der Rohrdurchmesser. Im Vergleich zur Netzvariante 2 fallen die Rohrdurchmesser – aufgrund der geringeren Temperaturspreizung und daraus resultierenden Anstiegs des Masse- und Volumenstroms – größer aus. Die Temperaturspreizung beträgt lediglich 4 K (Vorlauftemperatur: 12 °C, Rücklauftemperatur: 8 °C).

Tabelle 24: Rohrdurchmesser der Rohrabschnitte (RA) für die Netzvarianten 1 bis 3

Teilnetze/ Rohrabschnitte	Länge Rohr- abschnitt (trm)	Rohrdurchmesser Netzvariante 1 (DN in mm)	Rohrdurchmesser Netzvariante 2 (DN in mm)	Rohrdurchmesser Netzvariante 3 (DN in mm)
RA 0	100	250	125	150
<b>Teilnetz 1</b>				
RA 1	350	150	80	125
RA 2	120	80	50	65
RA 3	160	100	40	65
<b>Teilnetz 2</b>				
RA 4	220	100	50	65
RA 5	44	20	20	20
RA 6	55	50	20	32
<b>Teilnetz 3</b>				
RA 7	350	100	40	65
RA 8	120	65	25	40
RA 9	67	25	20	20
<b>Teilnetz 4</b>				
RA 10	240	150	80	100
RA 11	120	40	20	25
RA 12	120	32	20	20
RA 13	115	65	25	40
RA 14	140	100	40	65
RA 15	190	65	25	40
RA 16	290	65	32	50

Teilnetze/ Rohrabschnitte	Länge Rohr- abschnitt (trm)	Rohrdurchmesser Netzvariante 1 (DN in mm)	Rohrdurchmesser Netzvariante 2 (DN in mm)	Rohrdurchmesser Netzvariante 3 (DN in mm)
RA 17	180	80	50	65
<b>Teilnetz 5</b>				
RA 18	160	200	100	125
RA 19	160	200	100	125
RA 20	200	200	100	125

### NETZWÄRMEVERLUSTE der NAH- UND FERNWÄRMENETZE

Die Netzwärmeverluste wurden für alle drei Nahwärmenetz-Varianten berechnet (Vorgehensweise siehe 4.7.2.). Für die Netzvarianten 1 (unsaniert / EnEV 2009) und 2 (Passivhaus) wurden die Wärmeverluste zwei verschiedener Rohrarten (Einzelrohr und Doppelrohr) mit unterschiedlichen Dämmstärken (Standard-Dämmung, 1-fach und 2-fach verstärkte Dämmung) verglichen (siehe Abbildung 12)<sup>32</sup>.

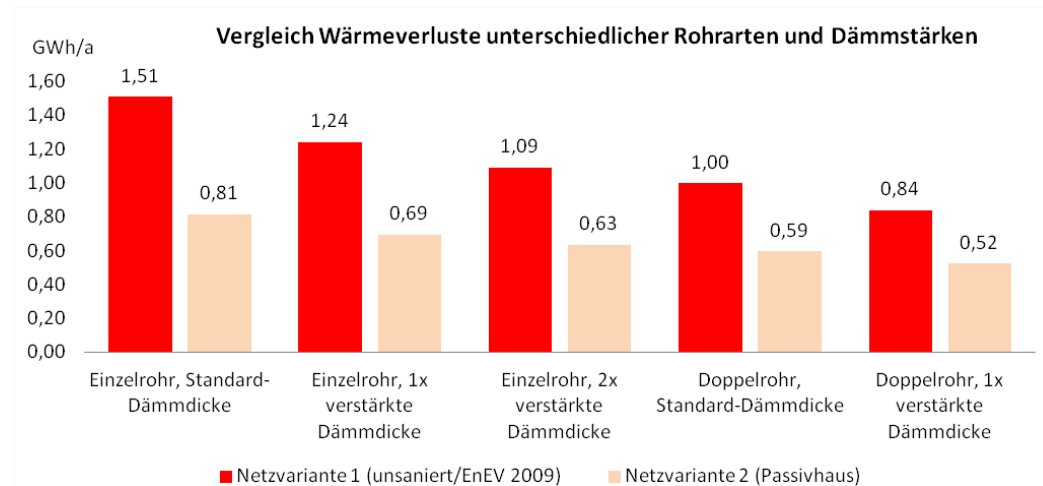


Abbildung 12: Netzvariante 1 und 2: Wärmeverluste unterschiedlicher Rohrarten und Dämmstärken

Die Abbildung 12 zeigt erwartungsgemäß, dass die Wärmeverluste mit zunehmender Dämmung abnehmen. Das Doppelrohr mit 1-fach verstärkter Dämmung weist die geringsten Wärmeverluste auf (Netzvariante 1 44 % und Netzvariante 2 36 % geringer als beim Einzelrohr mit Standard-Dämmdicke). Aus diesem Grund und aufgrund des geringen Preisunterschiedes (isoplus 2012) wurden die Nahwärmenetze der Varianten 1 und 2 mit einem Doppelrohr mit 1-fach verstärkter Dämmung (siehe Abbildung 13) berechnet. Besonders bei der Passivhaus-Siedlung, die sich durch einen geringen Wärmebedarf auszeichnet, besteht die Notwendigkeit, die Netzwärmeverluste so gering wie möglich zu halten.

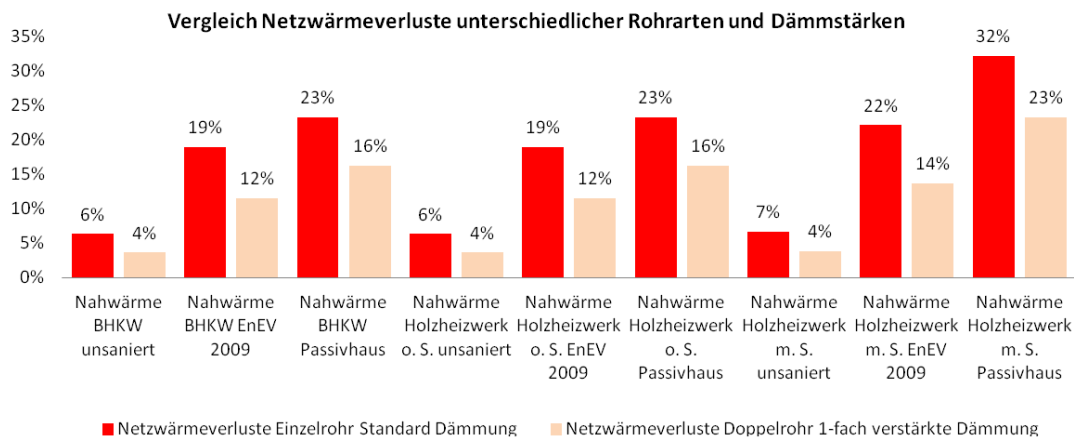
<sup>32</sup> Wärmedurchgangskoeffizienten siehe isoplus 2011.





Abbildung 13: Doppelrohr (isoplus 2011: 2/2)

Abbildung 14 zeigt die Anteile der Netzwärmeverluste an der insgesamt für die Siedlung erzeugten Wärme<sup>33</sup>. Es wird deutlich, dass die Anteile der Netzwärmeverluste des Doppelrohres mit 1-fach verstärkter Dämmung geringer als die Anteile des Einzelrohres mit Standard-Dämmung sind. Sinkt die Wärmeabnahmedichte, steigt die Differenz der anteiligen Netzwärmeverluste zwischen Einzelrohr und Doppelrohr. Im unsanierten Gebäudebestand ohne Solarthermie liegen die anteiligen Netzwärmeverluste beim Doppelrohr mit 1-fach verstärkter Dämmung 2 %-Punkte und mit Solarthermie 3 %-Punkte unter dem Einzelrohr mit Standard-Dämmung. In der EnEV 2009- und Passivhaus-Siedlung liegen die anteiligen Netzwärmeverluste des Doppelrohres 7 %-Punkte und mit Solarthermie sogar 9 %-Punkte unter dem Einzelrohr. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Bedeutung der Wärmeisolierung der Wärmeleitungen höher ist, je niedriger die Wärmeabnahmedichte ist. In der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung können die Netzwärmeverluste bei Verwendung von Doppelrohren mit 1-fach verstärkter Dämmung um 44 % und in der Passivhaus-Siedlung um 36 % im Vergleich zu Einzelrohren mit Standard-Dämmung reduziert werden.



<sup>33</sup> Die Fernwärme- und kalte Nahwärme wurden von der Auswertung ausgenommen. Bei der Fernwärme wurde ein Wärmeverlust von 20 kWh/m<sup>2</sup>wa angenommen. Bei der kalten Nahwärme werden ungedämmte Trinkwasserrohre verwendet. Die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen (12 °C/ 8 °C) und der Erdreichtemperatur (ca. 10 °C) beträgt 2 K, im Mittel 0 K. Daher treten kaum Wärmeverluste auf.



Abbildung 14: Vergleich der anteiligen Netzwärmeverluste für Einzelrohre mit Standard-Dämmung und Doppelrohre mit 1-fach verstärkte Dämmung

Bei den Fernwärmenetzen wurde für die unsanierte und die EnEV 2009-Siedlung pauschal ein Wärmeverlust von  $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WFa}})$  angenommen (vgl. Pehnt 2009: 194). Bei der Passivhaus-Siedlung wurden die Wärmeverluste von Einzelrohren mit Standard-Dämmdicke berechnet, um die Wärmeverluste vor der Siedlungsgrenze zu berücksichtigen.

Die Netzwärmeverluste der Netzvariante 3 (kalte Nahwärme) sind nahezu Null, weil sich die mittlere Netztemperatur und die Erdreichtemperatur nicht unterscheiden. Daher werden in der Praxis Trinkwasserversorgungsrohre aus Polyethylen verwendet. Ein Vergleich der Wärmeverluste unterschiedlicher Rohrmaterialien kann deshalb entfallen.

Abbildung 15 stellt die absoluten und relativen Netzwärmeverluste der leitungsgebundenen Wärmeversorgungssysteme dar. Bezugsgröße ist der Endenergiebedarf der Siedlung inklusive Netzwärmeverluste. Im unsanierten Gebäudebestand liegen die relativen Netzwärmeverluste für das Fernwärmenetz mit 6 % geringfügig über denen der Nahwärme-Varianten BHKW/Holzheizwerk (4 %). Beim Energiestandard EnEV 2009 und der Passivhaus-Siedlung übersteigen die relativen Netzwärmeverluste des Fernwärmenetzes die der Nahwärme-Varianten BHKW/Holzheizwerk deutlich. Die Netzwärmeverluste der kalten Nahwärme betragen nahezu Null.

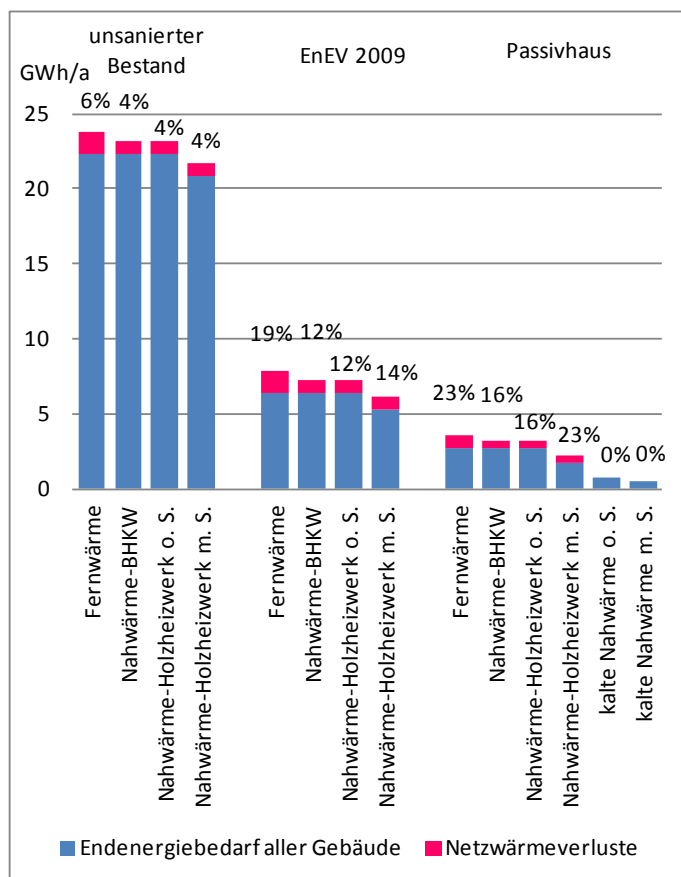


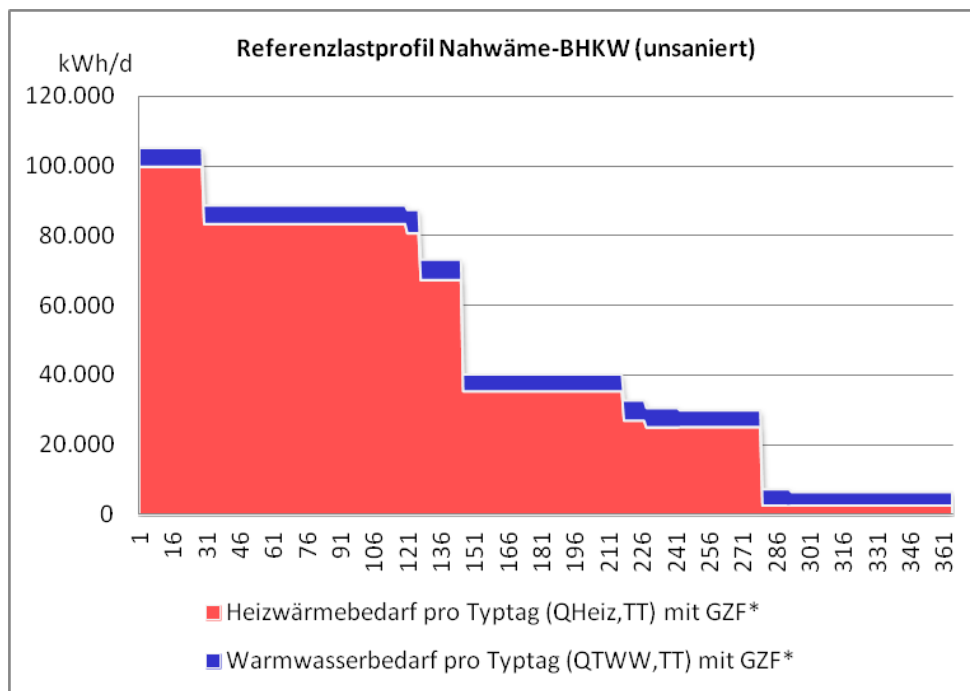
Abbildung 15: Energiebilanz der Netzwärmeverluste absolut und relativ zum Gesamtenergiebedarf des Modellgebietes

### Nahwärme-BHKW und Holzheizwerke mit Spitzenlastkessel

Für die Auslegung der Nahwärme-BHKW und Holzheizkessel wurde für jeden Energiestandard ein Referenzlastprofil nach VDI 4655 für die Klimazone 13 erstellt (siehe 4.4., Abbildungen 16 bis 18). Die Referenzlastprofile zeigen deutlich, dass die Bedeutung der Warmwasserbereitung für das Modellgebiet mit höherwertigen Energiestandards steigt, während der Energiebedarf für Heizwärme stark sinkt. Im unsanierten Gebäudebestand beträgt der Anteil des Wärmebedarfs für Warmwasser am gesamten Wärmebedarf der Siedlung lediglich 10 %, beim Energiestandard EnEV 2009 bereits 25 % und in der Passivhaus-Siedlung sogar 50 % (siehe Tabelle 25).

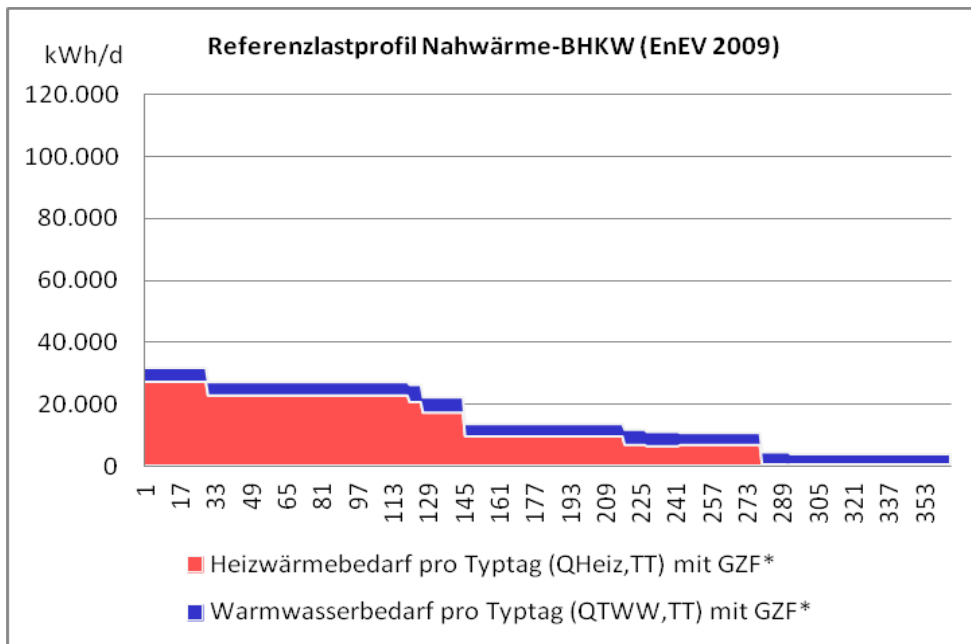
Tabelle 25: Endenergiebedarfe der Siedlung unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,8

Energiestandard	Endenergiebedarf Heizung (GWh/a)	Endenergiebedarf Warmwasser (GWh/a)	Endenergiebedarf Gesamt (GWh/a)	Anteil Warmwasser am gesamten Endenergiebedarf
unsaniert	16,6	1,8	18,4	10 %
EnEV 2009	4,5	1,5	6,0	25 %
Passivhaus	1,3	1,3	2,6	50 %



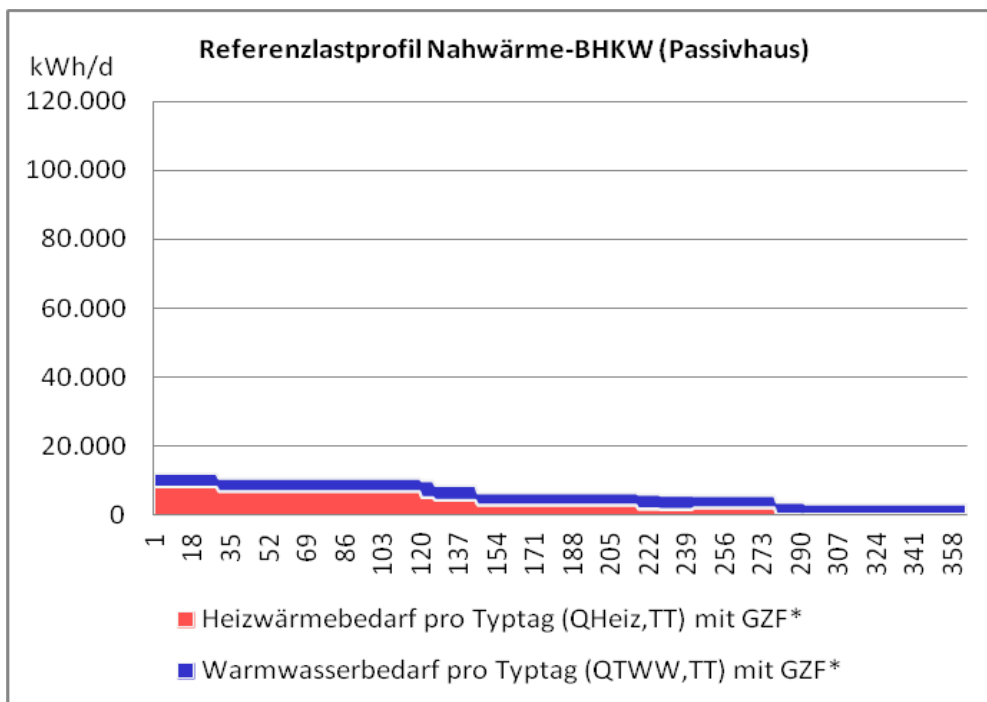
\* GZF = Gleichzeitigkeitsfaktor (hier: 0,8)

Abbildung 16: Referenzlastprofil des Nahwärme-BHKW nach VDI 4655 für den unsanierten Gebäudebestand



\* GZF = Gleichzeitigkeitsfaktor (hier: 0,8)

Abbildung 17: Referenzlastprofil des Nahwärme-BHKW nach VDI 4655 für die EnEV 2009-Siedlung



\* GZF = Gleichzeitigkeitsfaktor (hier: 0,8)

Abbildung 18: Referenzlastprofil des Nahwärme-BHKW nach VDI 4655 für die Passivhaus-Siedlung

Anhand der Referenzlastprofile können die Leistungen der BHKW und Holzheizkessel sowie der Wärmedeckungsgrad ermittelt werden. Die Laufzeit der Anlagen wird mit durchschnittlich 16 Stunden pro Tag (5840 h/a) angenommen. Die Spitzenlastkessel sind auf die jeweilige Wärmehöchstlast des Modellgebietes unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors (GZF = 0,8) ausgelegt. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei einem Ausfall der Grundlastversorgungssysteme der Wärmebedarf des Modellgebietes

gedeckt werden kann. Die Referenzlastprofile zeigen, dass mit abnehmendem Wärmebedarf auch die Spitzenlast deutlich abnimmt.

Die Tabelle 26 enthält eine Übersicht der thermischen Leistungen der Nahwärme-BHKW, Holzheiz- und Spitzenlastkessel sowie der Wärmedeckungsgrade<sup>34</sup>. Weitere technische Angaben der Nahwärme-BHKW sind in der Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 26: Übersicht der thermischen Leistungen der BHKW, Holzheiz- und Spitzenlastkessel für die unterschiedlichen Energiestandards

Energiestandard	$P_{th}$ BHKW (MW)	$P_{th}$ Holzheizkessel (MW)	$P_{th}$ Spitzenlastkessel (MW)	Wärmedeckungsgrad BHKW (%)	Wärmedeckungsgrad Holzessel (%)
unsaniert	3,61	5,4	8,0	60	77
EnEV2009	1,06	1,6	2,3	61	77
Passivhaus	0,40	0,6	0,9	61	76

Tabelle 27: Übersicht über die elektrischen und thermischen Leistungen (kW), Wirkungsgrade (%) und Stromkennzahlen der Nahwärme-BHKW(vgl. ASUE 2011, Anhang B)

Energiestandard	$P_{el}$ (kW)	$P_{th}^{35}$ (kW)	$\eta_{el}$	$\eta_{th}$	$\eta_{gesamt}$	Stromkennzahl
unsaniert	1.560	3.606	43,2 %	43,2 %	86,4 %	1,000
EnEV 2009	420	1.064	39,5 %	49,4 %	88,9 %	0,800
Passivhaus	150	400	36,0 %	52,0 %	88,0 %	0,692

Während bei den BHKW die Laufzeit der Anlage die Wirtschaftlichkeit wesentlich beeinflusst (je länger die Laufzeit, desto wirtschaftlicher die Anlage), ist es bei einem Holzessel die produzierte Wärmemenge (je größer die produzierte Wärmemenge, desto wirtschaftlicher). Daraus ergeben sich unterschiedliche thermische Leistungen und Wärmedeckungsgrade der Anlagen.

Weil Nahwärme-BHKW und Holzheizwerke die Wärmeerzeugung nicht gleitend an die Wärmenachfrage anpassen können, gibt es einen zentralen Pufferspeicher. Zudem sind Warmwasserspeicher in allen Wohngebäuden vorgesehen. Außerdem wurde für das Nahwärme-Holzheizwerk für jeden Energiestandard auch eine Variante mit solarthermischen Anlagen in den Wohngebäuden untersucht. Wie auch bei den dezentralen Wärmeversorgungssystemen dient die solarthermische Anlage ausschließlich der Warmwasserbereitung. Bei den BHKW wurde auf die solarthermische Variante verzichtet, weil sie die Auslastung des BHKW verringern und sich somit negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken würde (vgl. UBA 2011a: 5).

BHKW produzieren in einem Verbrennungsprozess sowohl Wärme als auch Strom. Aufgrund dieser Besonderheit wurde der Brennstoffeinsatz (Erdgas) auf die Produkte Wärme und Strom gemäß der Finnischen Methode (siehe 4.6.) aufgeteilt. Daraus ergibt

<sup>34</sup> Wärmedeckungsgrad meint den Anteil des Jahresheizwärmebedarfs, der durch den Grundlastwärmeerzeuger (BHKW-Anlage oder Holzheizkessel) abgedeckt wird.

<sup>35</sup> Die zentralen BHKW sind mit der Brennwertnutzungs-Option ausgestattet.

sich bei den BHKW-Varianten ein anderer Energiebilanzkreis für die Stromnutzung<sup>36</sup> als bei den anderen untersuchten Systemen. Während bei den anderen Systemen der Strombilanzkreis die Steckdose ist, beinhaltet der Strombilanzkreis bei den BHKW-Varianten auch den nach der Finnischen Methode ermittelten Brennstoffeinsatz für die Stromerzeugung. Bei der Berechnung der End- und Primärenergiebedarfe der BHKW soll jedoch nur der Strom- und Wärmebedarf der Siedlung bewertet werden. Deswegen wurde der in das Stromnetz eingespeiste KWK-Strom von der Gesamtbilanz abgezogen und der zugekaufte Strom hinzugerechnet. Eingespeist wird der erzeugte KWK-Strom (abzüglich der Hilfsenergie für die Anlagen und des Pumpstroms für das Wärmenetz), weil kein eigenes Elektrizitätsnetz in der Modellsiedlung vorhanden ist.

## Kalte Nahwärme

Die Variante „kalte Nahwärme“ wurde in Anlehnung an die Variante 6 der Energiebalance-Studie modelliert (vgl. Pehnt u. a. 2009: 190). Bei der kalten Nahwärme erfolgt der Wärmetransport auf einem geringen Temperaturniveau<sup>37</sup>. Das kalte Nahwärmenetz wird mit Wärme aus einem Geothermie-Sondenfeld gespeist. Das Sondenfeld besteht aus 150 Sonden mit je 135 Metern Tiefe. Die Konfiguration ist mit 3 mal 50 Sonden ausgelegt, wobei der Abstand zwischen den Sonden 15 m beträgt. Das Sondenfeld ist 735 m lang und 30 m breit<sup>38</sup>. Die Jahreszahlen von 3,5/4 (m. / o. S.) für die Anlagentechnik wurden aus der Energiebalance-Studie übernommen (Pehnt u. a. 2009: 194). Die solarthermischen Anlagen dienen ausschließlich der Warmwasserbereitung. Während Variante 6 der Energiebalance-Studie über eine zentrale Wärmepumpe und einen zentralen Speicher in Kopfstationen verfügt, werden hier Sole-Wasser-Wärmepumpen und Warmwasserspeicher in den einzelnen Gebäuden angenommen. Im Gegensatz zur Energiebalance-Studie wird nicht von einer neu zu planenden, sondern von einer bestehenden Siedlung ausgegangen: Würden in einer bestehenden Siedlung nachträglich Kopfstationen gebaut, wäre mit erheblichen nicht-technischen Hemmnissen zu rechnen. Sofern die Kopfstationen im Eigentum einer Eigentümergemeinschaft stehen, ist neben dem Aufwand für die Gründung der Eigentümergemeinschaft mit einem hohen Abstimmungs- und Koordinationsbedarf zu rechnen. Stehen die Kopfstationen im Eigentum eines Energieversorgers, bedarf es Regelungen zu Grunddienstbarkeiten, Zugänglichkeit und Rückbau. Den hohen Aufwand wird der Energieversorger auf den Energiepreis umlegen, was sich negativ auf diesen auswirkt<sup>39</sup>. Ein wesentlicher Kritikpunkt an dem Konzept der kalten Nahwärme ist, dass die niedrigen Temperaturen der Wärmequelle mittels Wärmepumpe auf das erforderliche Temperaturniveau angehoben werden müssen. Fraglich ist, ob sich bei dem derzeitigen Strommix tatsächlich Einsparungen des Primärenergiebedarfs realisieren lassen (vgl. Pehnt u. a. 2009: 177). Dem stehen Vorteile der kalten Nahwärme gegenüber. Im Vergleich zu konventionellen Wärmenetzen sind die Netzwärmeverluste bei der kalten Nahwärme sehr gering (siehe Seite 67). Außerdem kann aufgrund der geringen Vor- und

---

<sup>36</sup> Die Strombilanz beinhaltet neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

<sup>37</sup> Die Vorlauf-/Rücklauftemperaturen wurden mit 12 °C/ 8 °C angenommen, können jedoch auch 20 °C/ 15 °C betragen (vgl. Pehnt u. a. 2009: 173).

<sup>38</sup> Vgl. Geothermiekontor GmbH 2012.

<sup>39</sup> Vgl. Planungsbüro Graw 2012.

Rücklauftemperaturen der Wärmequelle weitgehend auf Rohrdämmung verzichtet werden, was geringere Material- und Verlegekosten bedeutet. Auch die Möglichkeit, Niedertemperatur-Wärmequellen wie Abwärme oder Abwasser einzubinden, ist ein großer Vorteil der kalten Nahwärme (vgl. Pehnt u. a. 2009: 176).

### **Fernwärme**

Untersucht wurde eine Fernwärme-Variante mit einem KWK-Anteil von 70 %. Annahmen zum Brennstoffeinsatz wurden nicht getroffen. Den Berechnungen für die Ein- und Mehrfamilienhäuser liegen die Daten aus UBA 2011a zugrunde. Die Berechnungen zu den Sondergebäuden erfolgten analog zu den dezentralen Wärmeversorgungssystemen. Auf eine solarthermische Anlage wurde aus Gründen der Wirtschaftlichkeit verzichtet (vgl. UBA 2011a: 5).

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Vorbemerkungen

Endenergiebedarfe sind die Grundlage für die Auswertungen des Primärenergiebedarfs (siehe 6.2.2.), der Emissionen (siehe 6.3.), der Luftschadstoffe (siehe 6.3.3.), der verbrauchsgebundenen (siehe 6.4.3.) und externen Kosten (siehe 6.4.5.). Alle Angaben beziehen sich auf ein durchschnittliches Kalenderjahr. Die vollständigen Daten sind in den Anhängen zusammengestellt.

Die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) für die Versorgung einer Siedlung mit Wärme und Strom stehen im Mittelpunkt dieser Untersuchung. In den folgenden Diagrammen sind die Versorgungssysteme daher nach den Energiestandards der Gebäude und innerhalb der Energiestandards nach sinkenden THG-Emissionen sortiert (von links nach rechts abnehmend). Dadurch lässt sich leichter ein Bezug zwischen Kosten, End- bzw. Primärenergiebedarf und der Klimabelastung herstellen. Die Ergebnisse beruhen auf eigenen Berechnungen, die anhand der in den Kapiteln 4 und 5 dargestellten Annahmen und Randbedingungen durchgeführt wurden.

BHKW produzieren in einem Verbrennungsprozess sowohl Wärme als auch Strom. Daher wurde der Brennstoffeinsatz (Erdgas) auf die beiden Produkte Wärme und Strom gemäß der Finnischen Methode aufgeteilt (siehe 4.6.). Für diese beiden Anteile wurden die Endenergiebedarfe, die Primärenergiebedarfe, die Emissionen und die Brennstoffkosten ermittelt. Der in das Stromnetz eingespeiste KWK-Strom wurde von der Gesamtbilanz abgezogen und der zugekaufte Strom hinzugerechnet. Sowohl der eingespeiste KWK-Strom als auch der zugekaufte Strom wurden mit den jeweiligen Referenzwerten des Strommixes bewertet.

### 5.2 Energie

Die absoluten Zahlen zum Endenergie- und Primärenergiebedarf sind im Anhang E zusammengefasst.

#### 5.2.1 Endenergiebedarf

##### Endenergiebedarf für Strom

Abbildung 19 stellt den Endenergiebedarf der Siedlung für Strom aller untersuchten Wärmeversorgungssysteme dar. Bei der Berechnung des Stromverbrauches wurden neben dem Haushaltsstrom der Wohngebäude bzw. Nutzungsstrom der Sondergebäude auch die Hilfsenergiebedarfe der Wärmeerzeuger, Strom für Lüftungen und Solarpumpen, der Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze sowie der Strom für die Straßenbeleuchtung berücksichtigt. Der Strombedarf für Heizung und Warmwasser (Wärmepumpen, Stromdirektheizungen) wurde im folgenden Kapitel nicht ausgewertet.

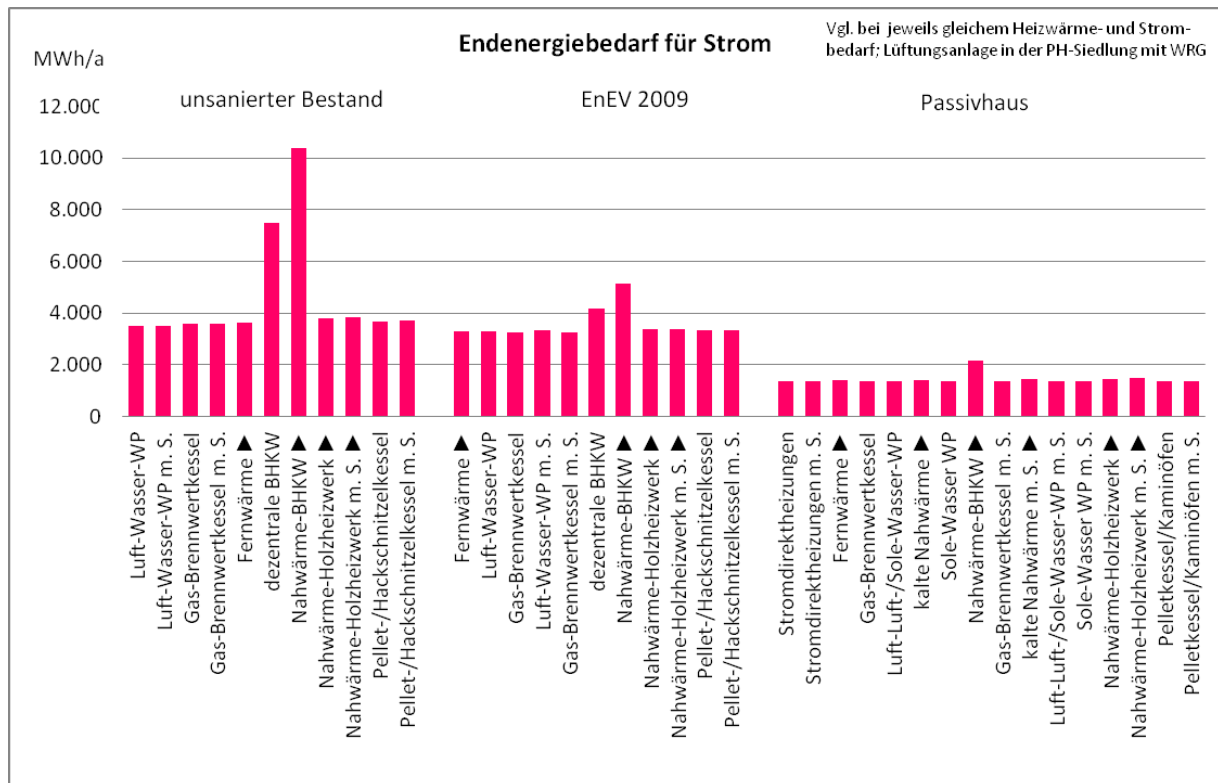


Abbildung 19: Endenergiebedarf für Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) (MWh/a) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Der Effizienzsprung von der EnEV 2009- zur Passivhaus-Siedlung beträgt ca. 60 % (von etwa 3.400 bis 5.100 MWh/a auf etwa 1.400 bis 2.200 MWh/a) und ist aufgrund des geringeren Stromverbrauchs der Haushalte und der effizienteren Straßenbeleuchtung wesentlich höher als zwischen der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung. Der im Vergleich dazu leichtere Rückgang des Endenergiebedarfes bei verbessertem Energiestandard ist auf den abnehmenden Hilfsenergiebedarf der Wärmeversorgungssysteme zurückzuführen. Mit abnehmendem Wärmebedarf verringert sich auch die benötigte Leistung der Wärmeerzeuger. Diese können entsprechend kleiner dimensioniert werden, wodurch sich der Hilfsenergiebedarf der Systeme verringert. Wegen unterschiedlich hohen Hilfsenergiebedarfen weichen die Endenergieverbräuche innerhalb der Energiestandards geringfügig voneinander ab: Um knapp 9 % in der unsanierten und in der Passivhaus-Siedlung, um etwa 4 % in der EnEV 2009-Siedlung. Bei allen Wärmeversorgungssystemen mit solarthermischen Anlagen liegt der Endenergiebedarf für Strom leicht über dem Endenergiebedarf für Strom der Varianten ohne solarthermische Anlage ( $\sim 0,2\%$ )<sup>40</sup>. Zwar muss für die Solarpumpe mehr Strom aufgewendet werden. Die teilweise solarthermische Erwärmung des Trinkwarmwassers spart jedoch in viel größerem Umfang Energie ein.

Der Endenergiebedarf für Strom der BHKW-Varianten setzt sich aus dem Endenergiebedarf des Brennstoffanteils zur Stromerzeugung, dem eingespeisten KWK-Strom und dem zugekauften Strom zusammen (siehe Abbildung 20).

<sup>40</sup> Der Strombedarf für die Solarpumpe beträgt bei den Wohngebäuden 33 kWh/a.



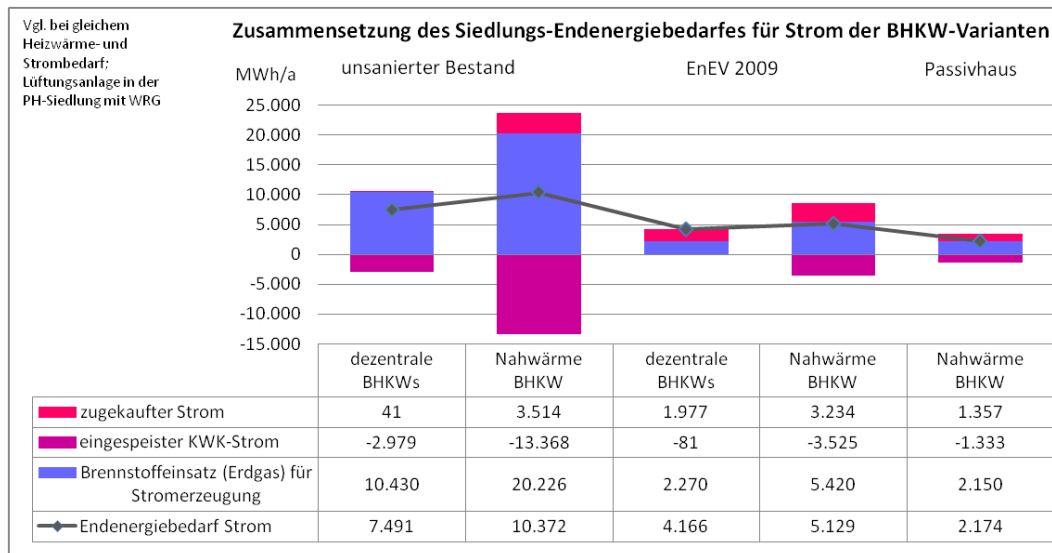


Abbildung 20: Zusammensetzung des Siedlungs-Endenergiebedarfes für Strom der BHKW-Varianten

Da die Modellsiedlung kein eigenes Elektrizitätsnetz hat, wird der erzeugte KWK-Strom der Nahwärme-BHKW – abzüglich der Hilfsenergiebedarfe der BHKW-Anlagen und des Pumpstrombedarfes des Wärmenetzes (ca. 3 % des gesamten Endenergiebedarfs der Siedlung) – in das Stromnetz eingespeist. Entsprechend muss Strom zugekauft werden, um den Strombedarf der Siedlung zu decken. Bei den dezentralen BHKW kann der erzeugte Nettostrom bilanziell in den Gebäuden verwendet werden, weil für die Verteilung das gebäudeinterne Verteilungsnetz genutzt werden kann und nur der überschüssige Strom in das Stromnetz eingespeist wird. Die Gesteungskosten des KWK-Stroms liegen unter den Strompreisen, weswegen es wirtschaftlicher ist, den KWK-Strom in den Gebäuden zu verwenden. In der unsanierten Siedlung werden bei den dezentralen BHKW insgesamt 2.979 MWh/a und in der EnEV 2009-Siedlung 81 MWh/a eingespeist. Im Anhang B ist aufgeschlüsselt, welche Menge KWK-Strom jede BHKW-Anlage produziert und welche Menge Strom verbraucht und eingespeist wird.

### Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser

Abbildung 21 stellt die ermittelten Endenergiebedarfe für Wärme (Heizung und Warmwasser) der untersuchten Wärmeversorgungssysteme dar. Verglichen werden die Endenergiebedarfe unterschiedlicher Energieträger (Erdgas, Fernwärme, Holz, Strom<sup>41</sup>), die in unterschiedlichen Systemen für die Wärmeerzeugung eingesetzt werden.

<sup>41</sup> Bei Wärmepumpen ist Strom sowohl der Energieträger für die Wärme- als auch für die Stromerzeugung. In diesem Abschnitt wird bei den Wärmepumpen-Varianten nur der Strom für die Wärmeerzeugung betrachtet.

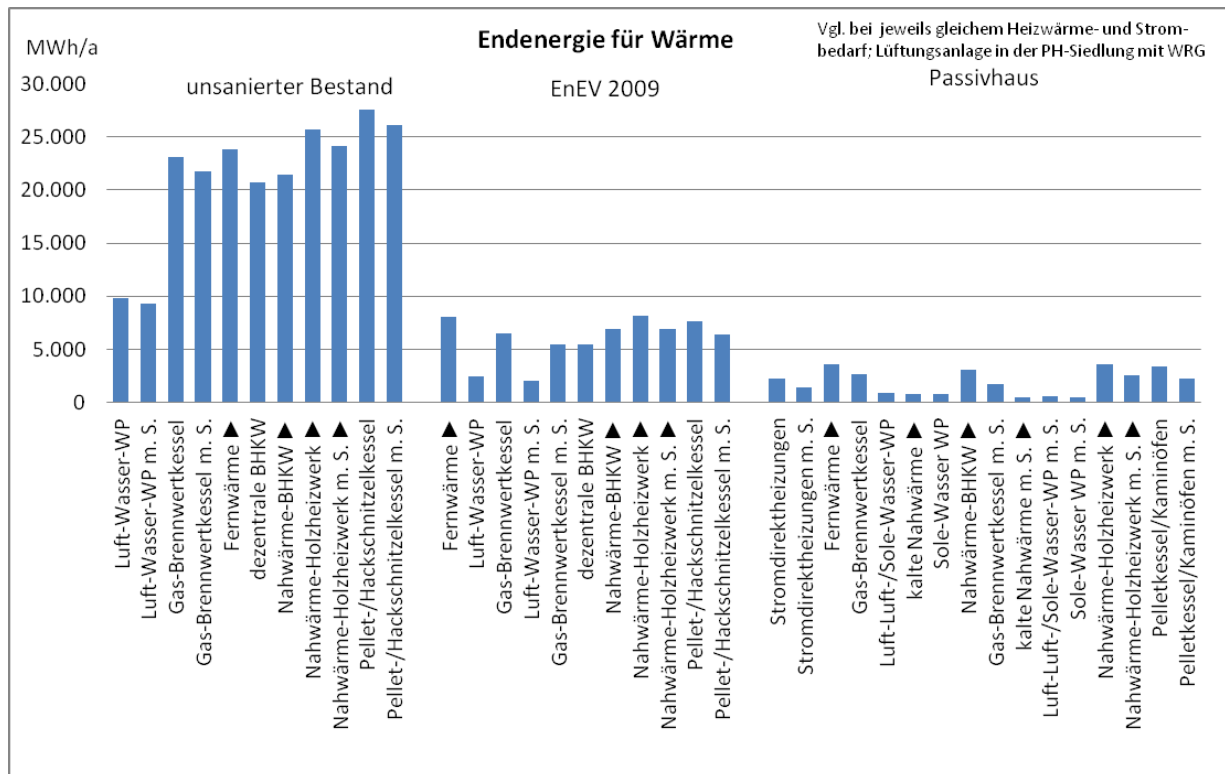


Abbildung 21: Endenergiebedarf für Wärme (MWh/a) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

In der *unsanierten Siedlung* liegen die Endenergiebedarfe für Wärme zwischen 9.281 MWh/a und 27.514 MWh/a. Die Pellet-/ Hackschnitzelkessel<sup>42</sup> weisen den höchsten Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung auf. Daran schließt sich der Endenergiebedarf des Nahwärme-Holzheizwerkes an (23 % des Endenergiebedarfs entfallen auf den Gas-Spitzenlastkessel). Die Fernwärme schneidet zwar besser ab als die Pellet-/ Hackschnitzelkessel, jedoch schlechter als die Gas-Brennwertkessel. Die Endenergiebedarfe der BHKW fallen im Vergleich zur Betrachtung der Gesamtendenergiebedarfe für Wärme und Strom (siehe Seite 73) deutlich besser aus, weil hier nur der anteilige Brennstoffeinsatz für die Wärmeerzeugung betrachtet wird. Die Luft-Wasser-Wärmepumpen weisen den geringsten Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung auf.

In der *EnEV 2009-Siedlung* verringert sich die Spanne zwischen dem niedrigsten (2.093 MWh/a) und höchsten (8.173 MWh/a) Endenergiebedarf für Wärme. Das Nahwärme Holzheizwerk ohne Solarthermie weist den höchsten Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung auf (23 % entfallen auf den Gas-Spitzenlastkessel). Die höheren Netzwärmeverluste bei der Fernwärme (pauschal 20 kWh/(m<sup>2</sup><sub>WP</sub>a)) werden mit sinkendem Wärmebedarf sichtbar. Die Fernwärme hat in der EnEV 2009-Siedlung den zweit höchsten Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung. Daran schließen sich die Pellet-/Hackschnitzelkessel ohne Solarthermie und das Nahwärmeholzheizwerk mit Solarthermie an. Das Nahwärme-BHKW hat aufgrund des niedrigeren thermischen Wirkungsgrades einen höheren Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung als die dezentralen BHKW (vgl. Tabelle 23 und Tabelle 27). In etwa der gleichen Größenordnung

<sup>42</sup> RH und Sondergebäude: Pellet-Heizkessel, MH Hackschnitzel-Heizkessel.

liegen die Endenergiebedarfe der Gas-Brennwertkessel und der Pellet-/ Hackschnitzelkessel mit Solarthermie. Die Luft-Wasser-Wärmepumpen weisen mit Abstand die geringsten Endenergiebedarfe für die Wärmeerzeugung auf.

Die Endenergiebedarfe für die Wärmeerzeugung in der *Passivhaus-Siedlung* liegen zwischen 516 MWh/a und 3.629 MWh/a. Hervorzuheben sind die Stromdirektheizungen, die nur in der Passivhaus-Siedlung untersucht wurden. Deren Endenergiebedarfe liegen im Vergleich zu den anderen Systemen im Mittelfeld. Wie auch bei der EnEV 2009-Siedlung weisen das Nahwärme-Holzheizwerk ohne Solarthermie (der Gas-Spitzenlastkessel trägt zu 24 % zur Wärmeversorgung bei), die Fernwärme, die Pelletkessel/Kaminöfen ohne Solarthermie und das Nahwärme-BHKW die höchsten Endenergiebedarfe für die Wärmeerzeugung auf. Das Nahwärme-Holzheizwerk mit Solarthermie, Pelletkessel/Kaminöfen mit Solarthermie, die Gas-Brennwertkessel und die Stromdirektheizungen schließen sich im Mittelfeld an. Die Wärmepumpen-Varianten weisen mit 516 MWh/a bis 915 MWh/a wieder die geringsten Endenergiebedarfe für die Wärmeerzeugung auf. Der Endenergiebedarf der kalten Nahwärme fällt genauso gering aus wie der der Sole-Wasser-Wärmepumpen, weil für die Wärmepumpen im kalten Nahwärmenetz konservative Jahresarbeitszahlen (mit Solarthermie 3,5, ohne Solarthermie 4,0) angenommen wurden. Die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen im kalten Nahwärmenetz werden aufgrund der Netzvorlauftemperatur von 12 °C über denen der Sole-Wasser-Wärmepumpen liegen und der Endenergiebedarf Wärme entsprechend niedriger ausfallen.

### **Gesamter Endenergiebedarf**

Abbildung 22 zeigt die Endenergiebedarfe für Wärme (Heizung, Warmwasser) und Strom<sup>43</sup> der untersuchten Wärmeversorgungssysteme für die drei Energiestandards der Siedlung.

---

<sup>43</sup> Beinhaltet neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

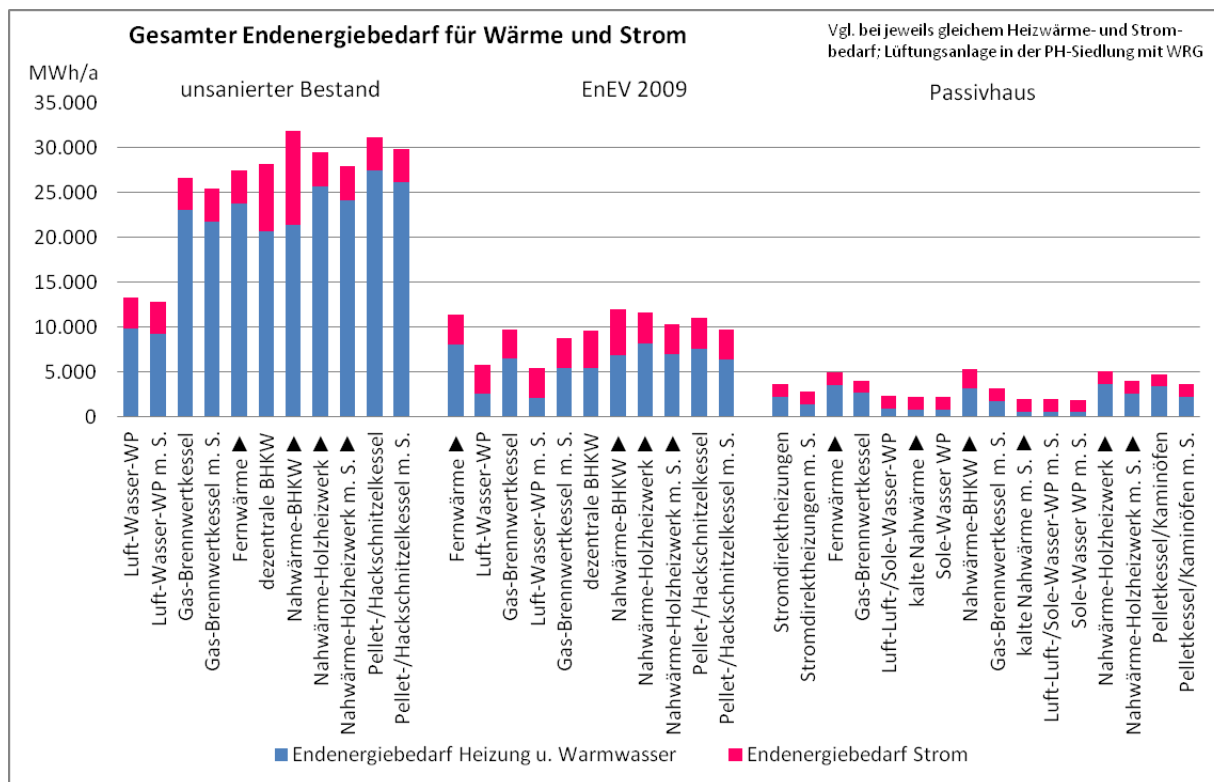


Abbildung 22: Gesamter Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) in MWh/a der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Während im unsanierten Gebäudebestand der Endenergiebedarf für die Wärmebereitstellung deutlich über dem Strombedarf der Siedlung liegt, verändert sich das Verhältnis mit abnehmendem Wärmebedarf deutlich. Bereits in der EnEV 2009-Siedlung macht bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe der Endenergiebedarf für Strom mit etwa 60 % den größeren Anteil am Endenergiebedarf aus. Grundsätzlich würde sich dieser Trend auch bei den Wärmeversorgungssystemen der Passivhaus-Siedlung fortsetzen. Da der Strombedarf in der Passivhaus-Siedlung pro Einfamilienhaus und pro Wohneinheit im Mehrfamilienhaus nur noch etwa 1.600 kWh beträgt, ist der Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser in einigen Fällen größer, außer bei den Wärmepumpen-Varianten.

Außerdem nähern sich die Endenergiebedarfe der verschiedenen Versorgungssysteme innerhalb eines Energiestandards mit abnehmendem Wärmebedarf an. Während die Differenz der Endenergienachfrage der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme in der unsanierten Siedlung noch 19.041 MWh/a beträgt, verringern sich die Differenz in der EnEV 2009-Siedlung auf 6.583 MWh/a und in der Passivhaus-Siedlung auf 3.394 MWh/a.

In der *unsanierten Siedlung* liegen die Endenergiebedarfe für Wärme und Strom zwischen 12.777 MWh/a und 31.817 MWh/a. Es ist festzustellen, dass das Nahwärme-BHKW und die Pellet-/Hackschnitzelkessel ohne Solarthermie den höchsten Endenergiebedarf aufweisen. Darauf folgen die Pellet-/Hackschnitzelkessel mit Solarthermie, das Nahwärme-Holzheizwerk ohne Solarthermie, die dezentralen BHKW und das Nahwärme-Holzheizwerk mit Solarthermie. Der Endenergiebedarf der Fernwärme liegt über dem der Gas-Brennwertkessel. Die Endenergiebedarfe für Wärme und Strom der Wärmepumpen-Varianten fallen – wie auch bei der Auswertung der Endenergiebedarfe für Heizung und Warmwasser – deutlich niedriger aus als bei den anderen Wärmeversorgungssystemen.

In der *EnEV 2009-Siedlung* liegen die Endenergiebedarfe zwischen 5.449 MWh/a und 12.032 MWh/a. Die Endenergiebedarfe des Nahwärme-BHKW und des Nahwärme-Holzheizwerkes ohne Solarthermie fallen am höchsten aus. Nur wenig darunter liegt die Fernwärme, die in der unsanierten Siedlung noch im unteren Mittelfeld lag, in der EnEV-2009-Siedlung jedoch den dritthöchsten Endenergiebedarf aufweist. Im mittleren Bereich der Endenergiebedarfe (etwa 11.000 MWh/a bis 8.700 MWh/a) schließen sich die Pellet-/Hackschnitzelkessel, das Nahwärme-Holzheizwerk mit Solarthermie, die Gas-Brennwertkessel und die dezentralen BHKW an. Wie auch im unsanierten Gebäudebestand fallen die Endenergiebedarfe der elektrischen Luft-Wasser-Wärmepumpen am niedrigsten aus.

In der *Passivhaus-Siedlung* liegen die Endenergiebedarfe für Wärme und Strom zwischen 1.898 MWh/a und 5.291 MWh/a. Die Reihenfolge der Endenergiebedarfe der untersuchten Wärmeversorgungssysteme in der Passivhaus-Siedlung ähnelt der Reihenfolge in der EnEV 2009-Siedlung. Auch hier weisen das Nahwärme-BHKW, das Nahwärme-Holzheizwerk ohne Solarthermie, die Fernwärme und die Pelletkessel/Kaminöfen ohne Solarthermie die höchsten Endenergiebedarfe auf. Daran schließen sich mit etwa 2.800 MWh/a bis 4.000 MWh/a die Gas-Brennwertkessel, die Holzfeuerungen mit Solarthermie (Nahwärme-Holzheizwerk und die Pelletkessel/Kaminöfen) und die Stromdirektheizungen an. Die untersuchten Wärmepumpen-Varianten weisen im Vergleich zu den anderen Versorgungssystemen einen geringeren Endenergiebedarf auf. Bei den Wärmepumpen-Varianten ohne Solarthermie liegt der gesamte Endenergiebedarf der kalten Nahwärme mit 2.234 MWh/a zwischen den Endenergiebedarfen der anderen beiden Wärmepumpen-Varianten. Nimmt der Wärmebedarf der Siedlung durch die solarthermische Anlage weiter ab, liegt der Endenergiebedarf der kalten Nahwärme mit 1.974 MWh/a geringfügig über denen der anderen beiden Wärmepumpen-Varianten. Ursache hierfür sind die zusätzlichen Endenergiebedarfe für das Nahwärmenetz: Aufgrund der geringen Vor- und Rücklauftemperatur des kalten Nahwärmenetzes sind die Netzwärmeverluste zwar zu vernachlässigen. Jedoch muss für den Pumpstrom des Netzes zusätzliche Energie aufgewendet werden.

Ein Vergleich der Endenergiebedarfe für Wärme und Strom zwischen den dezentralen, gebäudeweisen Holzfeuerungen (Pellet-/Hackschnitzelkessel bzw. Pelletkessel/Kaminöfen) und dem zentralen Nahwärme-Holzheizwerk für die ganze Siedlung zeigt, dass bei der unsanierten Siedlung das zentrale Holzheizwerk – trotz Netzwärmeverluste und zusätzlichem Pumpstrombedarf des Netzes – 6 % weniger Energie verbraucht als die dezentralen Pellet-/Hackschnitzelkessel (vgl. Tabelle 28). Mit abnehmendem Wärmebedarf verringert sich jedoch der Vorteil des Nahwärmenetzes. Beim Energiestandard EnEV 2009 übersteigen die Endenergiebedarfe der zentralen Variante die der dezentralen Variante um 5 % und in der Passivhaus-Siedlung um 7 %. Mit abnehmendem Wärmebedarf der Siedlung fällt der zusätzliche Endenergiebedarf für das Nahwärmenetz (Netzwärmeverluste, Pumpstrombedarf, zentraler Speicher) also schwerer ins Gewicht.

**Tabelle 28: Vergleich der gesamten Endenergiebedarfe (MWh pro Jahr) der dezentralen Holzfeuerungen (Pellet-/Hackschnitzelkessel bzw. Pelletkessel/Kaminöfen) mit zentralem Holzheizwerk**

Energiestandard	Summe Endenergiebedarf dezentrale Holzfeuerungen (MWh/a)	Summe Endenergiebedarf zentrales Holzheizwerk (MWh/a)	Vergleich zentral versus dezentral
unsaniert	31.210	29.474	-6 %
EnEV2009	10.970	11.567	+5 %
Passivhaus	4.753	5.089	+7 %

Im Vergleich liegen die dezentralen BHKW im Vorteil gegenüber den Nahwärme-BHKW (vgl. Tabelle 29). Im unsanierten Gebäudebestand liegt der Endenergiebedarf für Wärme und Strom des Nahwärme-BHKW um 13 % über dem Endenergiebedarf der dezentralen BHKW. Auch beim Energiestandard EnEV 2009 liegt das Nahwärme-BHKW um 25 % deutlich über dem Endenergiebedarf der dezentralen BHKW. Während bei der dezentralen Variante der KWK-Strom größtenteils in den Gebäuden genutzt wird, wird der KWK-Strom des Nahwärme-BHKW überwiegend in das Stromnetz eingespeist. Der Strom für die Haushalte muss dann aus dem Stromnetz bezogen werden. Daraus resultieren für das Nahwärme-BHKW trotz Abzug des eingespeisten KWK-Stroms hohe Endenergiebedarfe. Zudem verschlechtern die Netzwärmeverluste und die höheren elektrischen Wirkungsgrade die Endenergiebilanz des Nahwärme-BHKW, weil für die gleiche Wärmemenge mehr Brennstoff eingesetzt werden muss. Relevant ist letztlich jedoch nicht der Endenergiebedarf, sondern die ökologische und ökonomische Bewertung. Die dezentralen BHKW wurden aufgrund des geringen Wärmebedarfs der einzelnen Gebäude für die Passivhaus-Siedlung nicht untersucht, weswegen für diesen Energiestandard kein Vergleich gezogen werden kann.

**Tabelle 29: Vergleich der gesamten Endenergiebedarfe (MWh pro Jahr) der dezentralen BHKW-Varianten mit den Nahwärme-BHKW-Anlagen**

Energiestandard	Summe Endenergiebedarf dezentrale BHKW (MWh/a)	Summe Endenergiebedarf Nahwärme-BHKW (MWh/a)	Vergleich zentral versus dezentral
unsaniert	28.226	31.817	+13 %
EnEV 2009	9.644	12.032	+25 %
Passivhaus	-	5.291	-

Das kalte Nahwärmenetz wurde ausschließlich in der Passivhaus-Siedlung untersucht. Für den Passivhaus-Standard lohnt sich daher ein Vergleich der Wärmepumpen-Systeme untereinander. Die Endenergiebedarfe für Wärme und Strom der dezentralen Wärmepumpen-Varianten und die des kalten Nahwärmenetzes unterscheiden sich nur unwesentlich (vgl. Tabelle 30). Die Sole-Wasser-Wärmepumpen schneiden etwas besser ab, weil bei der kalten Nahwärme der Pumpstrombedarf des Netzes berücksichtigt wurde. Tendenziell werden die Arbeitszahlen der Wärmepumpen bei der kalten Nahwärme höher sein, was jedoch nicht eingerechnet wurde.

**Tabelle 30: Vergleich der gesamten Energiebedarfe (MWh pro Jahr) der dezentralen Wärmepumpen-Varianten mit dem kalten Nahwärmenetz**

Energiestandard	Summe	Summe	Vergleich
-----------------	-------	-------	-----------

Passivhaus	Endenergiebedarf dezentrale Systeme (MWh/a)	Endenergiebedarf Kalte Nahwärme (MWh/a)	zentral versus dezentral
Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpen	2.272	2.234	-2 %
Sole-Wasser WP	2.158	2.234	+4 %

### 5.2.2 Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf

In diesem Kapitel werden die Bedarfe an nicht-erneuerbarer Primärenergie der untersuchten Systeme für Wärme (Heizung und Warmwasser) und Strom ausgewertet; im Folgenden stets als „Primärenergiebedarf“ bezeichnet. Der Bedarf an erneuerbarer Primärenergie wird nicht betrachtet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 23 grafisch und im Anhang E tabellarisch dargestellt.

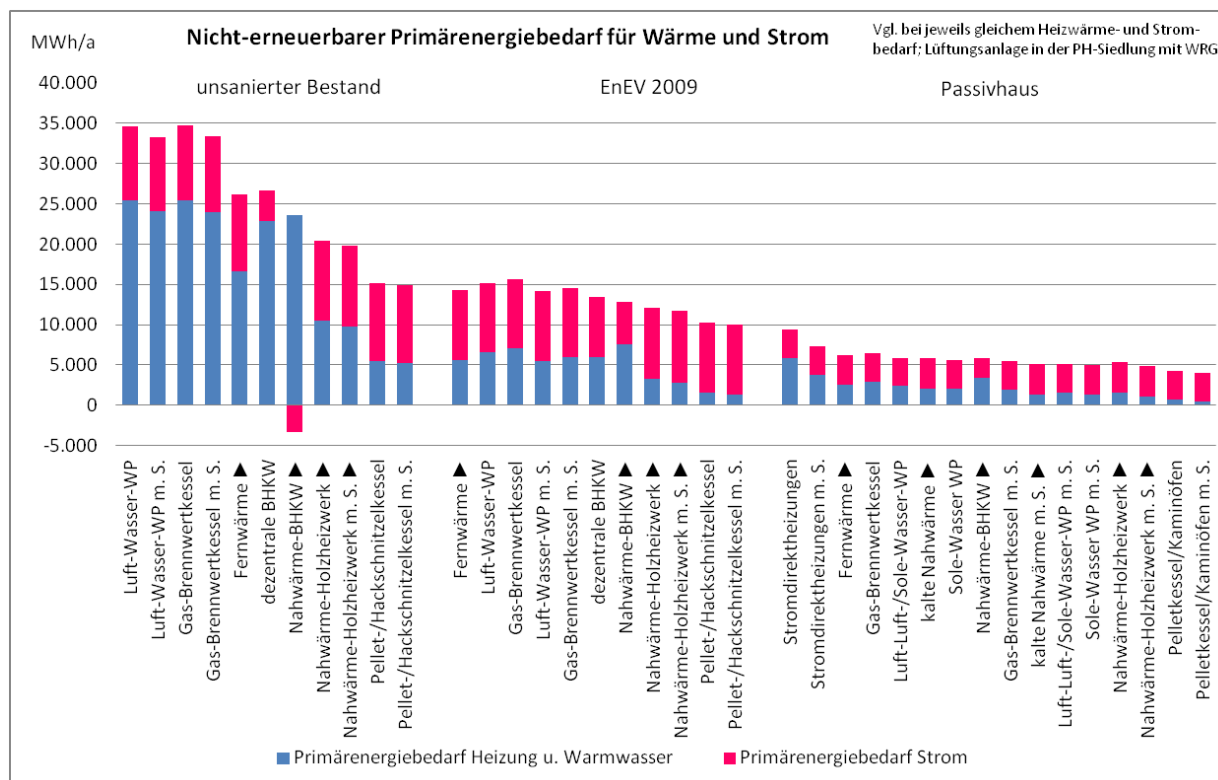


Abbildung 23: Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) in MWh pro Jahr der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Zwei Faktoren bestimmen die Höhe des Primärenergiebedarfs einer Versorgungsvariante:

- die Höhe des Endenergiebedarfs und
- der Primärenergiefaktor.

Beispielsweise zeigen die Auswertungen, dass die Primärenergiebedarfe der Holzfeuerungen trotz der hohen Endenergiebedarfe gering ausfallen. Zudem dominieren bei diesen Varianten die Primärenergiebedarfe für Strom. Denn der Primärenergiefaktor für Pellets, Hackschnitzel und Scheitholz (0,2) ist viel niedriger als für Erdgas (1,1), Fernwärme (0,7) und elektrischen Strom (2,6).



Insgesamt ist der Zusammenhang zwischen Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen stärker als beim Endenergiebedarf.

In der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung zeigt sich, dass die Gas-Brennwertkessel und die Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne Solarthermie die höchsten Primärenergiebedarfe aufweisen. Nur in der Passivhaus-Siedlung liegt der Primärenergiebedarf der Stromdirektheizungen noch über den Gas-Brennwertkesseln. Den geringsten Primärenergiebedarf weisen bei allen drei Energiestandards die dezentralen Holzfeuerungen (Pellet-/Hackschnitzelkessel bzw. Pelletkessel/Kaminöfen) auf.

In der *unsanierten Siedlung* liegen die Primärenergiebedarfe der unterschiedlichen Versorgungssysteme zwischen 14.853 MWh/a und 34.747 MWh/a. Außerdem ist festzustellen, dass die Primärenergiebedarfe der Gas-Brennwertkessel und der Luft-Wasser-Wärmepumpen nah beieinander liegen. Darauf folgen die dezentralen BHKW, die Fernwärme und das Nahwärme-BHKW. Fiel der Endenergiebedarf des zentralen Holzheizwerkes noch um 6 % geringer aus als bei den dezentralen Holzfeuerungen, liegt der Primärenergiebedarf deutlich über den dezentralen Holzfeuerungen. Bei dem Nahwärme-Holzheizwerk deckt nämlich ein gasbetriebener Spitzenlastkessel den Wärmebedarf der Siedlung zu 23 % (siehe Tabelle 26). Außerdem fallen bei dem Nahwärme-Holzheizwerk zusätzliche Energiebedarfe für das Wärmenetz an (Netzwärmeverluste und Pumpstrombedarf). In der Tabelle 31 sind die anteiligen Primärenergiebedarfe der Nahwärme-Holzheizwerke, die auf die Brennstoffe Holz und Gas bzw. auf Strom entfallen, dargestellt.

Tabelle 31: Primärenergiebedarfe der Nahwärme-Holzheizwerkenach eingesetzten Energieträgern

Energieträger	Nahwärme-Holzheizwerk <i>ohne</i> Solarthermie (MWh/a)			Nahwärme-Holzheizwerk <i>mit</i> Solarthermie (MWh/a)		
	unsaniert	EnEV 2009	Passivhaus	unsaniert	EnEV 2009	Passivhaus
Hackschnitzel	3.951	1.259	552	3.718	1.067	385
Gas	6.492	2.068	958	6.108	1.753	668
Strom	9.919	8.826	3.797	9.941	8.848	3.863
<b>Gesamt</b>	<b>20.362</b>	<b>12.152</b>	<b>5.307</b>	<b>19.766</b>	<b>11.668</b>	<b>4.917</b>

In der *EnEV 2009-Siedlung* liegen die Primärenergiebedarfe zwischen 10.011 MWh/a und 15.605 MWh/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 4.042 MWh/a und 9.357 MWh/a. Die Auswertungen ergeben ein ähnliches Bild wie in der unsanierten Siedlung. Die Unterschiede zwischen den Versorgungssystemen sind geringer als bei der unsanierten Siedlung; lediglich die Stromheizung beim Passivhaus-Standard sticht negativ hervor. Der Stromverbrauch, der einen hohen Primärenergie-Aufwand verursacht, und der geringe Wärmebedarf nivellieren die auftretenden Unterschiede. Deswegen werden im Folgenden nur die Besonderheiten hervorgehoben.

In der unsanierten Siedlung liegt der Primärenergiebedarf der Fernwärme im Vergleich zu den anderen Systemen noch im Mittelfeld. Mit abnehmendem Wärmebedarf verschlechtert sich jedoch deren Primärenergiebilanz im Vergleich zu den anderen Systemen. Bei dem Nahwärme-BHKW sticht der negative Primärenergiebedarf für Strom (-3.322 MWh/a) ins Auge. Dieser entsteht dadurch, dass das 3,6-fache des Strombedarfs der Siedlung in das Stromnetz eingespeist wird. Ein Vergleich der BHKW-Varianten in der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung zeigt, dass – im Gegensatz zum Endenergiebedarf – der Primärenergiebedarf des Nahwärme-BHKW trotz zusätzlicher



Energiebedarfe für das Wärmenetz (Pumpstrom und Netzwärmeverluste) geringer ist als bei den dezentralen BHKW. Dieser Effekt ist auf die hohe Menge des eingespeisten KWK-Stroms des Nahwärme-BHKW, der mit dem Primärenergiefaktor 2,6 bewertet wurde, zurückzuführen. Die elektrischen Wirkungsgrade der BHKW nehmen mit sinkender elektrischer Nennleistung ab, während die thermischen Wirkungsgrade steigen; d. h. die Stromkennzahl sinkt (vgl. Abbildung 10, Tabelle 23, Tabelle 27). Je kleiner das BHKW ist, desto weniger Strom wird erzeugt, um die die gleiche Wärmemenge zu erhalten. Das reduziert bei abnehmendem Wärmebedarf den primärenergetischen Vorteil des Nahwärme-BHKW gegenüber den dezentralen BHKW (unsanierte Siedlung: 24 %, EnEV 2009-Siedlung: 5 %).

Wie bereits festgestellt, sinken die nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfe mit besserem Energiestandard. Tabelle 32 zeigt die Veränderung des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfes für Wärme und Strom der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme. Der Vergleich bezieht sich auf das jeweils gleiche System in den unterschiedlichen Energiestandards (EnEV 2009 zu unsaniert, Passivhaus zu EnEV 2009, Passivhaus zu unsaniert).

**Tabelle 32: Veränderung des Bedarfs nicht-erneuerbarer Primärenergie in der betrachteten Siedlung der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme für Raumwärme, Warmwasser, Haushalts- und sonstigen Strom**

	EnEV 2009 im Vergleich zu unsaniert		Passivhaus im Vergleich zu EnEV 2009		Passivhaus im Vergleich zu unsaniert	
<b>Bandbreite der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme:</b>	-4,8 ... -19,5 GWh/a		-6,0 ... -9,2 GWh/a		-10,8 ... -28,7 GWh	
<b>Auswahl einzelner Systeme:</b>						
Gas-Brennwertkessel	-19.142	-55 %	-9.114	-58 %	-28.256	-81 %
Holzheizungen <sup>1</sup>	-4.884	-32 %	-6.023	-59 %	-10.906	-72 %
Wärmepumpen-Heizungen <sup>2</sup>	-19.500	-56 %	-9.238	-61 %	-28.737	-83 %
dezentrale BHKW	-13.189	-50 %	-	-	-	-
Fernwärme	-11.879	-45 %	-8.068	-57 %	-19.947	-76 %
Nahwärme-BHKW	-7.419	-37 %	-6.943	-54 %	-14.362	-71 %
Nahwärme-Holzheizwerk	-8.210	-40 %	-6.845	-56 %	-15.055	-74 %

<sup>1</sup> unsaniert und EnEV 2009: Pellet- und Hackschnitzelkessel, Passivhaus: Pelletkessel und Kaminöfen mit Wasser-Tasche

<sup>2</sup> unsaniert und EnEV 2009: Luft-Wasser-Wärmepumpen, Passivhaus: Luft-Luft- und Sole-Wasser-Wärmepumpen

### 5.3 Emissionen

Neben dem Energiebedarf spielen auch die Emissionen von Versorgungssystemen für Wärme und Strom eine wichtige Rolle im Umwelt- und Klimaschutz. Im Folgenden werden die Emissionen der untersuchten Systeme an Klimagasen und Luftschadstoffen ausgewertet. Die absoluten Zahlen befinden sich im Anhang F und Anhang G.

### 5.3.1 Treibhausgas-Emissionen

In der Abbildung 24 sind die Treibhausgas-Emissionen für Wärme (Heizung und Warmwasser) und Strom<sup>44</sup> der untersuchten Systeme abgebildet. Bei den Treibhausgasen (THG) handelt es sich um Kohlendioxid und andere Klimagase wie Methan, die bei der Nutzung von Energieträgern entstehen, einschließlich der Emissionen vorgelagerter Prozesse („Vorkette“).

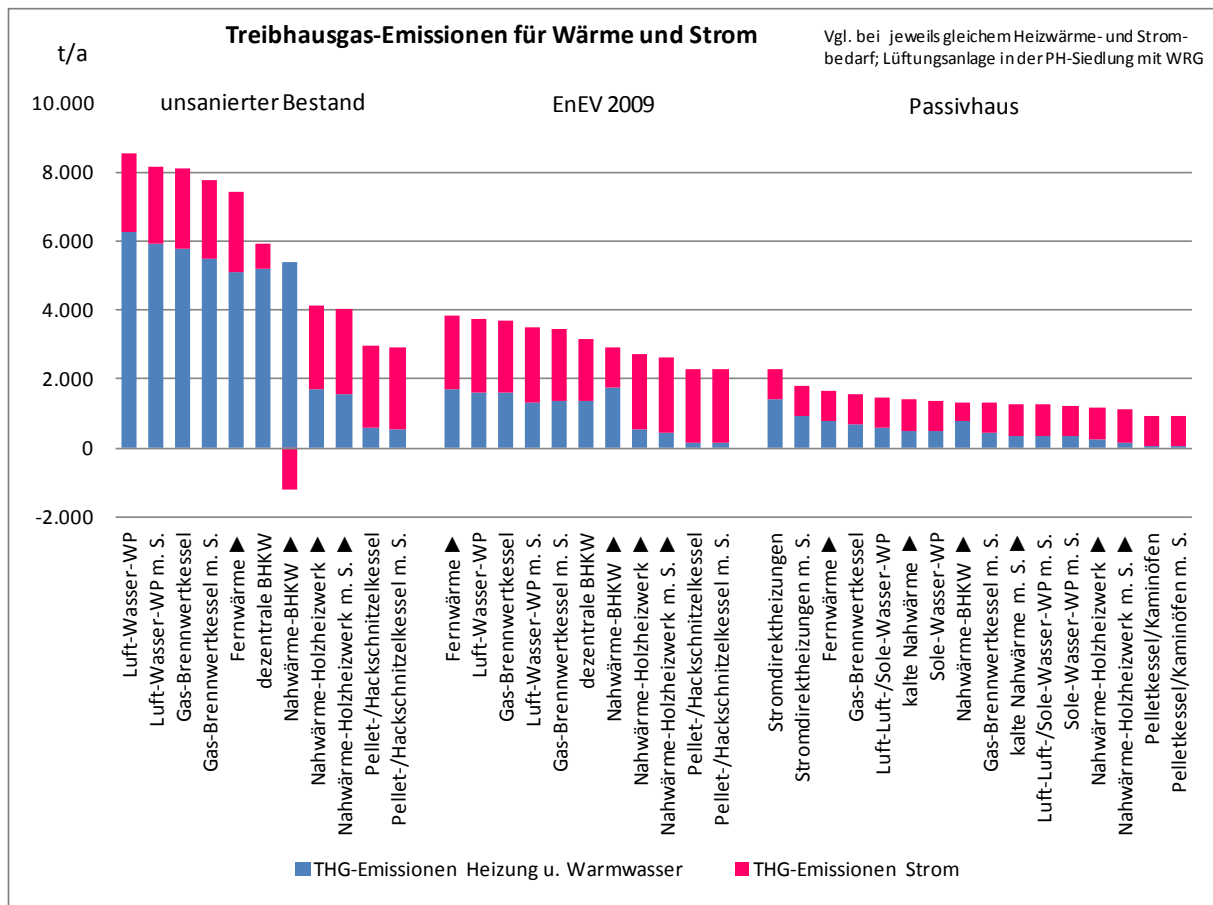


Abbildung 24: Treibhausgas-Emissionen mit Vorkette (t pro Jahr) der Siedlung für Heizung, Warmwasser und Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung)

Im *unsanierten Gebäudebestand* liegen die THG-Emissionen zwischen 2.928 t/a und 8.513 t/a. Die Luft-Wasser-Wärmepumpen weisen die höchsten Emissionen auf, weil Strom ineffizient und mit klimaschädlichen Brennstoffen erzeugt wird. Auch die THG-Emissionen der Gas-Brennwertkessel und der Fernwärme sind hoch. Grund sind die hohen Endenergiebedarfe an fossilen Energieträgern. Die THG-Emissionen der dezentralen BHKW fallen 20 % niedriger als bei der Fernwärme aus. Nochmals 30 % geringer liegt das Nahwärme-BHKW, weil viel Strom in das Stromnetz eingespeist wird. Etwa gleich hoch sind die THG-Emissionen des Nahwärme-Holzheizwerkes. Die dezentralen Holzfeuerungen (Pellet-/Hackschnitzelkessel) liegen 27 % ohne solarthermische Anlage und 28 % mit solarthermischer Anlage darunter. Wie bereits beim Primärenergiebedarf ausgeführt,

<sup>44</sup> Beinhaltet neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

liegt der Grund darin, dass bei dem Nahwärme-Holzheizwerk ein gasbetriebener Spitzenlastkessel den Wärmebedarf der Siedlung zu 23% abdeckt (siehe Tabelle 26) und zusätzliche Energiebedarfe für das Wärmenetz anfallen. Die Tabelle 33 stellt die anteiligen THG-Emissionen der Brennstoffe Hackschnitzel und Gas bzw. Strom für die Nahwärme-Holzheizwerke dar. Bemerkenswert ist, dass bei den Holzfeuerungen die THG-Emissionen zu ca. 80 % und beim Nahwärme-Holzheizwerk zu ca. 60 % durch den Strombedarf verursacht werden. Grund hierfür sind die geringen THG-Emissionsfaktoren für Holz (10 g/kWh bis 32 g/kWh) im Vergleich zu Strom (638,9 g/kWh).

Tabelle 33: Treibhausgas-Emissionen der Nahwärme-Holzheizwerke nach eingesetzten Energieträgern

Energieträger	Nahwärme-Holzheizwerk <i>ohne</i> Solarthermie (t/a)			Nahwärme-Holzheizwerk <i>mit</i> Solarthermie (t/a)		
	unsaniert	EnEV 2009	Passivhaus	unsaniert	EnEV 2009	Passivhaus
Hackschnitzel	204	65	28	192	55	20
Gas	1.480	471	218	1.393	400	152
Strom	2.437	2.169	933	2.443	2.174	949
<b>Gesamt</b>	<b>4.121</b>	<b>2.705</b>	<b>1.180</b>	<b>4.027</b>	<b>2.629</b>	<b>1.122</b>

In der *EnEV 2009*-Siedlung nehmen die THG-Emissionen deutlich ab und liegen zwischen 2.289 t/a und 3.838 t/a. Die Fernwärme weist die höchsten THG-Emissionen auf. Das ist zum einen auf den hohen Endenergiebedarf der Fernwärme zurückzuführen, der im Vergleich zur Luft-Wasser-Wärmepumpe fast doppelt so hoch ist. Zum anderen liegt der THG-Emissionsfaktor für Fernwärme (214 g/kWh) deutlich über den THG-Emissionsfaktoren für Holz. Aus der Abbildung 24 wird zudem deutlich, dass bei allen Versorgungssystemen der Anteil an THG-Emissionen, der durch den Wärmebedarf verursacht wird, im Verhältnis zu den gesamten THG-Emissionen deutlich sinkt. Die dezentralen Holzfeuerungen (Pellet-/Hackschnitzelkessel) und das Nahwärme-Holzheizwerk weisen erneut die geringsten THG-Emissionen auf.

In der *Passivhaus-Siedlung* liegen die THG-Emissionen zwischen 937 t/a und 2.299 t/a. Die Stromdirektheizungen weisen die höchsten THG-Emissionen auf, gefolgt von der Fernwärme und den Gas-Brennwertkesseln ohne Solarthermie. Die geringsten Emissionen verursachen die Varianten mit Holz als Brennstoff und das Nahwärme-BHKW mit dem Gas-Spitzenlastkessel. Die THG-Emissionen der anderen dazwischen liegenden Varianten unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander.

Tabelle 34 zeigt die Veränderung der THG-Emissionen für Wärme und Strom der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme. Der Vergleich bezieht sich auf das jeweils gleiche System in den unterschiedlichen Energiestandards (EnEV 2009 zu unsaniert, Passivhaus zu EnEV 2009, Passivhaus zu unsaniert).

Tabelle 34: Veränderung der Treibhausgasemissionen in der betrachteten Siedlung der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme für Raumwärme, Warmwasser, Haushalts- und sonstigem Strom

	EnEV 2009 im Vergleich zu unsaniert		Passivhaus im Vergleich zu EnEV 2009		Passivhaus im Vergleich zu unsaniert	
Bandbreite der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme:	-639 ... -4.791 t/a		-1.352 ... -2.270 t/a		-1.991 ... -7.061 t/a	
Auswahl einzelner Systeme:						
Gas-Brennwertkessel	-4.381 t	-54 %	-2.166 t	-58 %	-6.546 t	-81 %
Holzheizungen <sup>1</sup>	-642 t	-22 %	-1.359 t	-59 %	-2.001 t	-68 %
Wärmepumpen-Heizungen <sup>2</sup>	-4.791 t	-56 %	-2.270 t	-61 %	-7.061 t	-83 %
dezentrale BHKW	-2.785 t	-47 %	-	-	-	-
Fernwärme	-3.581 t	-48 %	-2.171 t	-57 %	-5.752 t	-78 %
Nahwärme-BHKW	-1.252 t	-30 %	-1.569 t	-54 %	-2.821 t	-68 %
Nahwärme-Holzheizwerk	-1.416 t	-34 %	-1.525 t	-56 %	-2.941 t	-71 %

<sup>1</sup> unsaniert und EnEV 2009: Pellet- und Hackschnitzelkessel, Passivhaus: Pelletkessel und Kaminöfen mit Wasser-Tasche

<sup>2</sup> unsaniert und EnEV 2009: Luft-Wasser-Wärmepumpen, Passivhaus: Luft-Luft- und Sole-Wasser-Wärmepumpe

### 5.3.2 Treibhausgas-Emissionen bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromversorgung

Ein höherer Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung verändert die Klimabilanz der untersuchten Systeme. Zu diesem Zweck wurde eine Sensitivitätsanalyse mit den zusätzlichen THG-Emissionsfaktoren mit 400 g/kWh und 200 g/kWh für Strom durchgeführt. Der THG-Emissionsfaktor für den aktuellen Strommix, wie in den vorstehenden Auswertungen verwendet, beträgt 638,9 g/kWh. Die Ergebnisse sind im Anhang F dargestellt. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse. Ausgewertet wurden die THG-Emissionen mit Vorkette für Wärme (Heizung und Warmwasser) und Strom<sup>45</sup>.

Außer bei den BHKW-Varianten sinken in allen Fällen die THG-Emissionen. Obwohl bei Gas-Brennwertkesseln, Fernwärme und Holzfeuerungen die eingesetzten Brennstoffe die gleichen sind, sinken die Emissionen für den Stromverbrauch, der zusammen mit dem Wärmebedarf bilanziert wird deutlich.

Bei den strombetriebenen Wärmeversorgungssystemen (Wärmepumpen, kalte Nahwärme und Stromdirektheizungen) sinken die THG-Emissionen am meisten. Schon bei einem THG-Emissionsfaktor von 400 g/kWh für Strom liegen die THG-Emissionen der strombetriebenen Systeme bei allen drei Energiestandards unter denen der Gas-Brennwertkessel, der Fernwärme und der BHKW-Varianten. Sie nähern sich den klimafreundlichsten Varianten mit Holzheizwerken bzw. Holzkessele an.

Bei den THG-Emissionsfaktoren von 400 g/kWh und 200 g/kWh für Strom sinkt die Stromgutschrift der BHKW-Varianten; der Vorteil der gekoppelten Erzeugung von Strom

<sup>45</sup> Enthält neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

und Wärme schwindet bei einem klimafreundlichen Referenzsystem. Bei einem THG-Emissionsfaktor für Strom von 200 g/kWh steigen im unsanierten Gebäudebestand die THG-Emissionen des Nahwärme-BHKW sogar stark an. In der EnEV 2009- und Passivhaus-Siedlung sind die THG-Emissionen des Nahwärme-BHKW in den drei untersuchten Szenarien nahezu gleich hoch: Stromeinspeisung und Strombedarf der Siedlung sind nahezu gleich hoch, und keine Gutschriften für resultierende Überschüsse oder Defizite beeinflussen die Klimabilanz. In geringerem Maße kann man diesen Effekt auch bei den dezentralen BHKW beobachten.

Es wird deutlich, dass mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix, die gasbetriebenen Wärmeversorgungssysteme im Vergleich zu den anderen Systemen schlechter abschneiden. Auch der Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung wird obsolet. Langfristig ist die KWK nur noch „klimafreundlich“, wenn der eingesetzte Brennstoff aus nicht-fossilen Quellen stammt, zum Beispiel aus überschüssigem Strom aus Photovoltaik und Windkraft erzeugtes Methan („Power to Gas“).

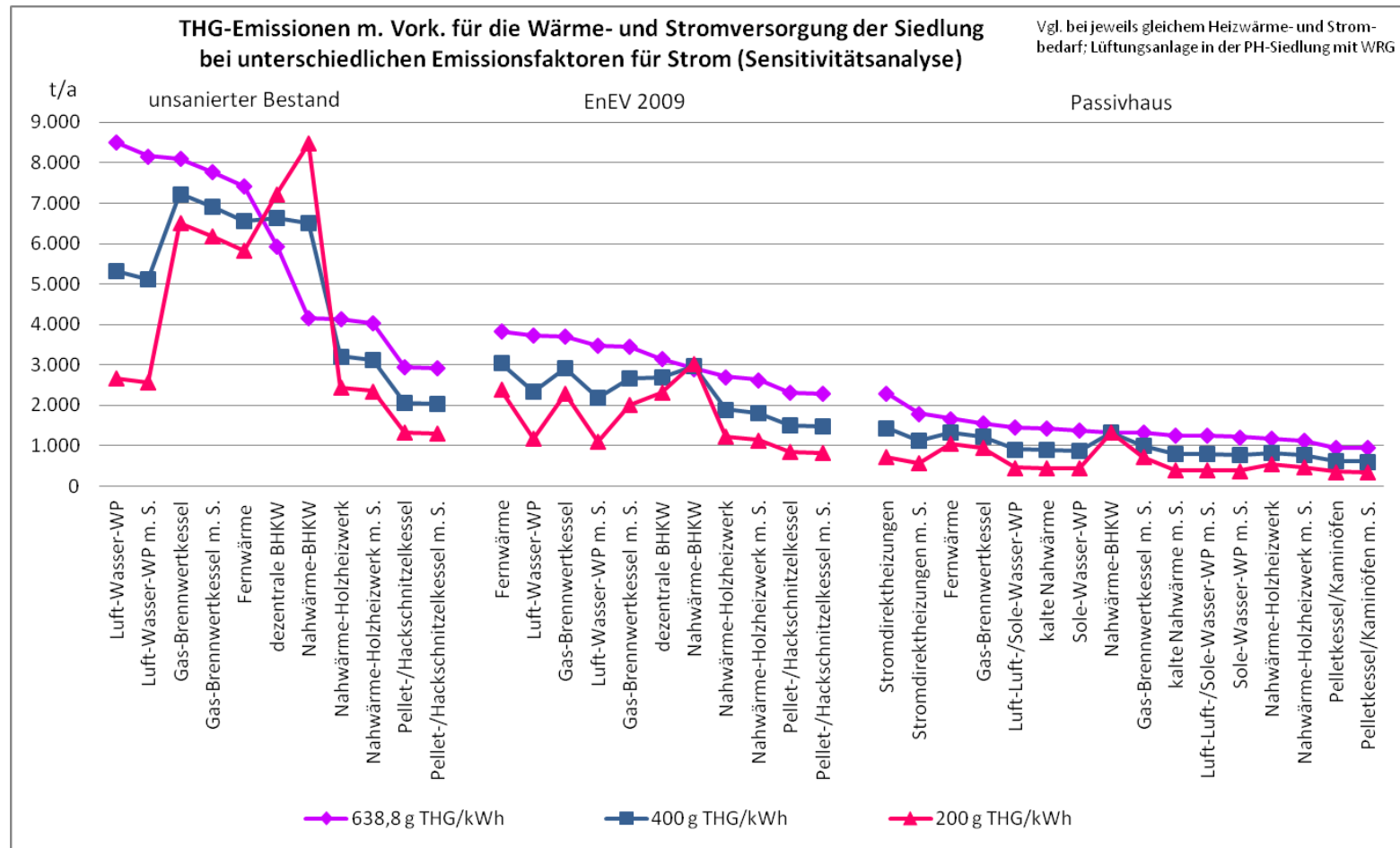


Abbildung 25: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom (Sensitivitätsanalyse; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette (aktueller Strommix: 638,8 g/kWh)

### 5.3.3 Luftschadstoff-Emissionen

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der Luftschadstoff-Emissionen (CO, NO<sub>x</sub>, Staub) ohne Vorkette dargestellt. Die Abbildung 26 stellt die verursachten Luftschadstoff-Emissionen grafisch dar. Anhang G fasst die Ergebnisse tabellarisch zusammen. Während die Emissionen für die Wärmeerzeugung lokal entstehen, entstehen die Emissionen für den Strom am Ort der Stromerzeugung, d. h. bei den Kraftwerken. Einzige Ausnahme sind die BHKW, die neben Wärme auch Strom produzieren. Daher können lokale Emissionsminderungen andernorts zu stärkeren Belastungen führen (Wärmepumpen), und umgekehrt (BHKW-Gutschrift). Für die Gesundheitsbelastungen sind letztlich weniger die Emissionen als die Immissionen ausschlaggebend.

Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

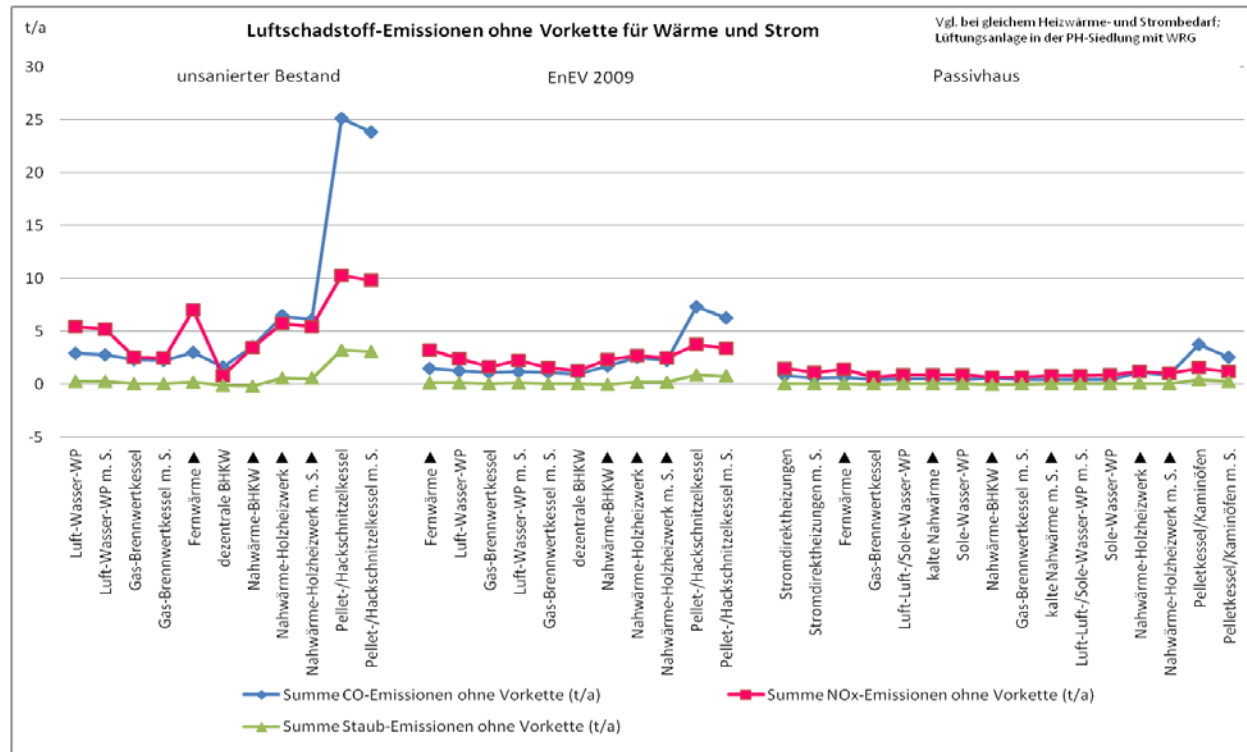


Abbildung 26: Luftschadstoff-Emissionen ohne Vorkette und Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Strom<sup>46</sup> der Siedlung für ausgewählte Systeme; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen

<sup>46</sup> Enthält neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.



In der unsanierten Siedlung liegen die CO-Emissionen zwischen 1,7 t/a und 25 t, in der EnEV 2009-Siedlung zwischen 1 t/a und 7,4 t/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 0,4 t/a und 3,7 t/a. Pellet-/ Hackschnitzelkessel bzw. Pelletkessel/Kaminöfen haben einen vergleichsweise hohen Endenergiebedarf und hohe CO-Emissionsfaktoren (Pellets: 0,659 g/kWh, Scheitholz: 1,537 g/kWh, Hackschnitzelkessel mit einer Leistung < 1 MW: 1,062 g/kWh), weswegen die CO-Emissionen in allen drei Energiestandards deutlich höher als bei den anderen Versorgungssystemen ausfallen. Daran schließen sich die CO-Emissionen des Nahwärme-Holzheizwerkes an, weil die Emissionsfaktoren für Hackschnitzelkessel mit einer Leistung von > 1 MW (0,264 g/kWh) und für Erdgas (0,068 g/kWh) sichtlich kleiner sind. In der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung fallen die CO-Emissionen der Gas-Brennwertkessel und der dezentralen BHKW am geringsten aus (unsaniert: 1,7 t/a bis 2,4 t/a, EnEV 2009: 1 t/a bis 1,2 t/a). Die CO-Emissionen des Nahwärme-BHKW, der Fernwärme und der Luft-Wasser-Wärmepumpen liegen im Mittelfeld (unsaniert: 2,8 t/a bis 3,6 t/a, EnEV 2009: 1,2 t/a bis 1,8 t/a). In der Passivhaus-Siedlung hingegen weisen die kalte Nahwärme mit Solarthermie, die dezentralen Wärmepumpen-Systeme mit Solarthermie und der Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie die geringsten CO-Emissionen aus (0,42 t/a bis 0,43 t/a).

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen in der unsanierten Siedlung zwischen 0,8 t/a und 10,3 t/a, in der EnEV 2009-Siedlung zwischen 1,3 t/a und 3,8 t/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 0,7 t/a und 1,5 t/a. Wie auch bei den CO-Emissionen weisen die Pellet-/Hackschnitzelkessel in der unsanierten und EnEV 2009-Siedlung auch die höchsten und die dezentralen BHKW sowie die Gas-Brennwertkessel die niedrigsten NO<sub>x</sub>-Emissionen auf. Hingegen machen sich in der Passivhaus-Siedlung bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen die solarthermischen Anlagen bei den Pelletkesseln/Kaminöfen bemerkbar. Ohne Solarthermie weist dieses Versorgungssystem auch in der Passivhaus-Siedlung die höchsten NO<sub>x</sub>-Emissionen im Vergleich zu den anderen Systemen auf. Daran grenzen die NO<sub>x</sub>-Emissionen der Stromdirektheizungen ohne Solarthermie und die Fernwärme (1,4 t/a bis 1,5 t/a). Erst daran schließen sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen der Pelletkessel/Kaminöfen mit Solarthermie (1,2 t/a) an. Die geringsten NO<sub>x</sub>-Emissionen weisen in der Passivhaus-Siedlung die Gas-Brennwertkessel und das Nahwärme-BHKW (0,7 t) aus.

Die Staub-Emissionen liegen in der unsanierten Siedlung zwischen -0,2 t/a und 3,2 t/a, in der EnEV 2009-Siedlung zwischen 0 t/a und 0,9 t/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 0 t/a und 0,4 t/a. (Der negative Wert von -0,2 t/a erklärt sich durch die Stromgutschrift, die beim Nahwärme-BHKW, berücksichtigt, dass andernorts Emissionen der Stromversorgung vermieden werden. Die lokalen Emissionen sind höher.) Die höchsten Staub-Emissionen weisen bei allen drei Energiestandards die zentralen und dezentralen Holzfeuerungsanlagen auf. Die geringsten Staub-Emissionen emittieren hingegen die Gas-Brennwertkessel und die zentralen und dezentralen BHKW-Anlagen. Der Staub-Emissionsfaktor von Gas beträgt 0 g/kWh, so dass bei den gasbetriebenen Anlagen nur die Staub-Emissionen für die Stromversorgung zu Buche schlagen.

## 5.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Investitions-, betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten sowie die Jahresgesamtkosten der untersuchten Systeme dargestellt. Die Diagramme sind nach sinkenden THG-Emissionen sortiert. Die zugehörigen Daten zeigt Anhang H. Wie unter 4.8.5. ausgeführt, wurden für die Fernwärme und das Nahwärme-BHKW in der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung die Förderung nach dem KWKG für den Neu- und Ausbau der Wärmenetze in Höhe von 520.507 € berücksichtigt.

Außerdem sind die KWK-Zuschläge für den erzeugten Nettostrom der dezentralen und der Nahwärme-BHKW in die Berechnungen eingeflossen.

### 5.4.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten der untersuchten Systeme und Energiestandards stellt Abbildung 27 dar.

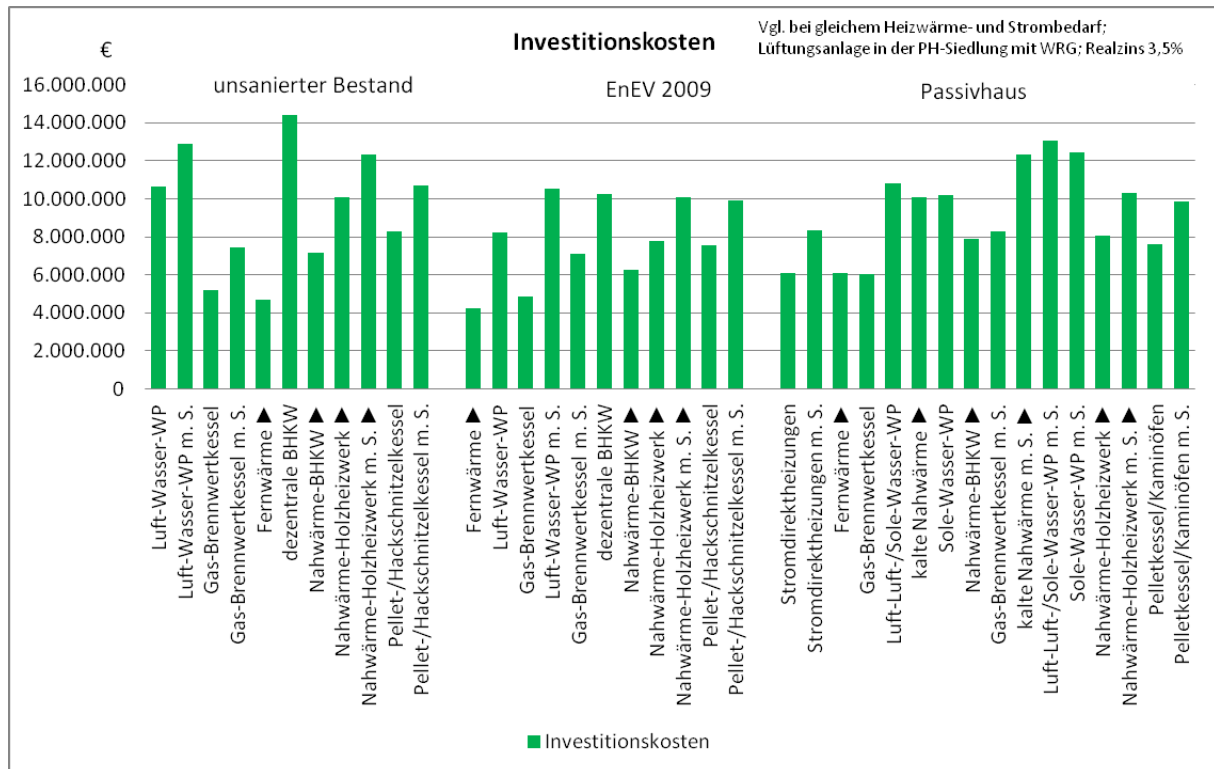


Abbildung 27: Investitionskosten (€) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Bei allen Varianten schlägt das Paket für die solarthermische Brauchwassererwärmung in Ein- und Mehrfamilienhäusern mit 2,3 Mio. € zu Buche.

In der *unsanierten Siedlung* liegen die Investitionskosten zwischen 4,7 Mio. € und 14,9 Mio. €. Die dezentralen BHKW weisen mit 14,9 Mio. € die höchsten Investitionskosten auf. Sie ergeben sich aus den hohen Kosten für die BHKW-Anlage selbst, die fast dreimal so hoch wie für die Gas-Brennwertkessel sind. Am zweithöchsten sind die Investitionskosten für die Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Solarthermie mit 12,9 Mio. €. Die Fernwärme weist mit 4,7 Mio. € die geringsten Investitionskosten auf, weil der Energiepreis der Fernwärme die erforderlichen Investitionskosten für das Wärmenetz implizit enthält. Wie unter 6.4.3. ausgeführt, fallen dafür die verbrauchsgebundenen Kosten der Fernwärme sehr hoch aus.

In der *EnEV 2009-Siedlung* liegen die Investitionskosten zwischen 4,2 Mio. € und 10,5 Mio. €, wobei die Luft-Wasser-Wärmepumpen mit Solarthermie die höchsten Investitionskosten ausweisen und somit die Investitionskosten der dezentralen BHKW (10,2 Mio. €) übersteigen. Die Pellet-/Hackschnitzkessel weisen – wie auch im unsanierten Gebäudebestand – geringere Investitionskosten als das Nahwärme-Holzheizwerk auf.

In der *Passivhaus-Siedlung* liegen die Investitionskosten zwischen 6 Mio. € und 13,1 Mio. €. Obwohl die Heizleistung in der Passivhaus-Siedlung sinkt, steigen die Investitionskosten gegenüber der EnEV 2009-Siedlung, weil alle Passivhaus-Varianten eine Lüftungsanlage

mit Wärmerückgewinnung enthalten. Die Investitionskosten dieser Varianten unterscheiden sich daher weniger stark als bei den vorhergehenden Energiestandards. Die Wärmepumpen-Varianten weisen die höchsten Investitionskosten auf: 10,1 Mio. € bis 10,8 Mio. € ohne Solarthermie, 12,3 Mio. € bis 13,1 Mio. € mit Solarthermie. Die teuren Wärmeerzeuger und die aufwändige Erschließung der Wärmequellen erhöhen die Investitionskosten der Wärmepumpen-Varianten sichtlich. Bei der kalten Nahwärme betragen die Kosten für die Erschließung des Sondenfeldes 1,2 Mio. €<sup>47</sup>. Außerdem kommen noch die Investitionskosten für Material und Verlegung des Rohrnetzes hinzu (0,5 Mio. €). Die Investitionskosten des Nahwärme-BHKW, des Nahwärme-Holzheizwerkes ohne Solarthermie und der Pelletkessel/Kaminöfen ohne Solarthermie liegen dicht beieinander. Die Investitionskosten der Stromdirektheizungen ohne Solarthermie, der Fernwärme und der Gas-Brennwertkessel ohne Solarthermie fallen am geringsten aus. Mit Solarthermie erhöhen sich die Investitionskosten jeweils um 2,3 Mio. €. Die Investitionskosten der Stromdirektheizungen sind vergleichsweise hoch, weil jede der zehn Wohneinheiten der Mehrfamilienhäuser mit einem eigenen elektrischen Heizregister ausgestattet ist, während bei der Fernwärme nur eine Wärmeübergabestation und bei der Gas-Brennwertkessel-Variante nur ein Gaskessel im Gebäude installiert werden müssen. Auch die Mittelschule und die Bürogebäude werden mit mehreren Elektroheizern versorgt.

Die BHKW-Anlage zeigen deutliche Skalen-Effekte: Je größer ein Gerät, desto geringer sind die spezifischen Anschaffungskosten (vgl. Abbildung 6). Daher sind die gesamten Investitionskosten des Nahwärme-BHKW im Vergleich zu den dezentralen BHKW um 52 % im unsanierten Gebäudebestand und um 39 % in der EnEV 2009-Siedlung – trotz zusätzlich zu errichtendem Wärmenetz, dessen Baukosten sich auf 1,4 Mio. € belaufen – niedriger.

#### **5.4.2 Betriebsgebundene Kosten**

Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören die Wartungskosten und die Kosten für den Schornsteinfeger (siehe 4.8.3.). Die betriebsgebundenen Kosten stellen im Vergleich zu den Investitions- und verbrauchsgebundenen Kosten den kleinsten Kostenblock dar.

---

<sup>47</sup> Vgl. Geothermiekontor GmbH 2012.

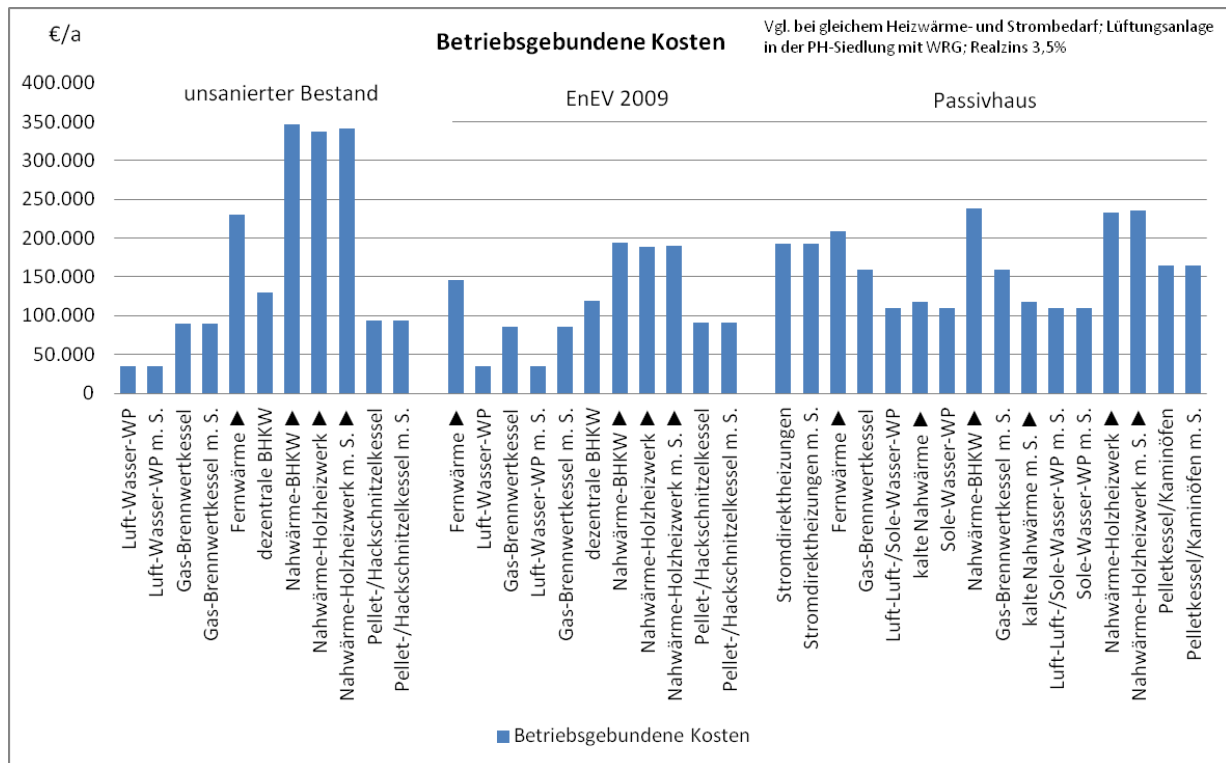


Abbildung 28: Betriebsgebundene Kosten (€/a) der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Die betriebsgebundenen Kosten liegen in der unsanierten Siedlung zwischen 34.230 €/a und 346.987 €/a, in der EnEV 2009-Siedlung zwischen 34.230 €/a und 193.409 €/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 109.240 €/a und 238.306 €/a. Der Anstieg der betriebsgebundenen Kosten in der Passivhaus-Siedlung ist auf die zusätzlichen Wartungskosten für die Lüftungsanlagen zurückzuführen.

Bei der Auswertung der drei Energiestandards zeigt sich jeweils das gleiche Bild. Die Nahwärme-Varianten weisen die höchsten betriebsgebundenen Kosten auf. Der Grund hierfür liegt in den zusätzlichen Wartungskosten für das Nahwärmenetz sowie dem Tank und dem Lager bei den Nahwärme-Holzheizwerken. Daran schließen sich mit leichtem Abstand die betriebsgebundenen Kosten der Fernwärme und mit einem deutlichen Abstand die betriebsgebundenen Kosten der dezentralen BHKW an. Die betriebsgebundenen Kosten der Pellet-/Hackschnitzelkessel und der Gas-Brennwertkessel liegen etwas unter denen der dezentralen BHKW. Die mit Abstand geringsten betriebsgebundenen Kosten weisen die Wärmepumpen-Varianten und die kalte Nahwärme auf.

### 5.4.3 Verbrauchsgebundene Kosten (ohne Preissteigerung)

Die verbrauchsgebundenen Kosten der untersuchten Versorgungssysteme und Energiestandards stellt nachfolgende Abbildung 29 dar. Die zugehörigen Daten befinden sich im Anhang H. Die verbrauchsgebundenen Kosten der BHKW wurden entsprechend der Brennstoffanteile für Strom- und Wärmeerzeugung nach der Finnischen Methode berechnet. Außerdem wurden die Erlöse für den in das Stromnetz eingespeisten KWK-Strom und die Kosten für den verbleibenden, zugekauften Strom angerechnet.

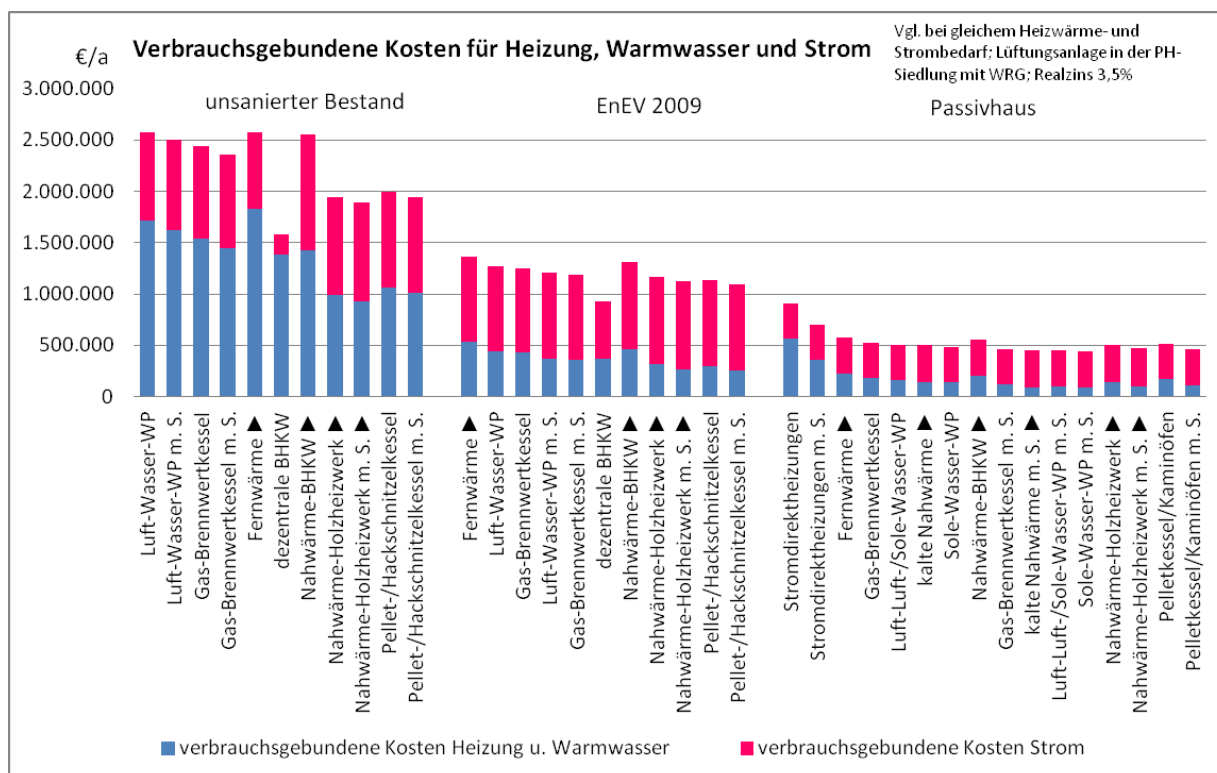


Abbildung 29: Verbrauchsgebundene Kosten der Siedlung für Heizung, Warmwasser und Strom (Haushalts- bzw. Nutzungsstrom, Strom für Hilfsenergie, Lüftung, Solarpumpe, Pumpstrom und Straßenbeleuchtung) (€/a); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Die verbrauchsgebundenen Kosten liegen in der unsanierten Siedlung zwischen 1,6 Mio. €/a und 2,7 Mio. €/a, in der EnEV 2009-Siedlung zwischen 0,9 Mio. €/a und 1,4 Mio. €/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 0,4 Mio. €/a und 0,9 Mio. €/a. Die Auswertung zeigt, dass der Anteil der verbrauchsgebundenen Kosten für Strom<sup>48</sup> an den gesamten verbrauchsgebundenen Kosten mit effizienterem Energiestandard deutlich zunimmt; (13 % bis 51 % im unsanierten Gebäudebestand, 38 % bis 80 % in der Passivhaus-Siedlung). In der EnEV 2009- und der Passivhaus-Siedlung überwiegen – mit Ausnahme der Stromdirektheizungen – die Stromkosten, weil der verbleibende Wärmebedarf der Siedlung vergleichsweise gering ist.

Die Fernwärme weist sowohl in der unsanierten als auch in der EnEV 2009-Siedlung die höchsten verbrauchsgebundenen Kosten auf, weil der Energiepreis der Fernwärme die erforderlichen Investitionskosten für das Wärmenetz implizit enthält. Nur in der Passivhaus-Siedlung liegen die verbrauchsgebundenen Kosten der Stromdirektheizungen aufgrund der hohen spezifischen Energiekosten für Strom weit über denen der Fernwärme. Die hohen spezifischen Energiekosten für Strom sind auch der Grund, warum die verbrauchsgebundenen Kosten der Luft-Wasser-Wärmepumpe in der unsanierten und der EnEV 2009-Siedlung trotz des sehr geringen Endenergiebedarfs hoch ausfallen. In der Passivhaus-Siedlung fallen die verbrauchsgebundenen Kosten der kalten Nahwärme ohne Solarthermie mit 0,50 Mio. €/a aufgrund des zusätzlichen Pumpstrombedarfes für das Wärmenetz etwas höher aus als die der Sole-Wasser-Wärmepumpen ohne Solarthermie

<sup>48</sup> Beinhaltet neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

(0,48 Mio. €/a). Die verbrauchsgebundenen Kosten der Wärmepumpen-Systeme mit Solarthermie fallen in der Passivhaus-Siedlung am geringsten aus (0,437 Mio. €/a bis 0,456 Mio. €/a).

Die verbrauchsgebundenen Kosten der Pellet-/Hackschnitzelkessel fallen in der unsanierten und der EnEV-2009-Siedlung wegen den günstigen Energiepreisen vergleichsweise gut aus. Auch das Nahwärme-Holzheizwerk, bei dem ein Gas-Spitzenlastkessel 23 % des Wärmebedarfs abdeckt, weist vergleichsweise geringe verbrauchsgebundene Kosten aus. Unter den verbrauchsgebundenen Kosten der Pellet-/Hackschnitzelkessel und des Nahwärme-Holzheizwerkes liegen nur noch die dezentralen BHKW. Mit abnehmendem Wärmebedarf schrumpft der Kostenvorteil, der durch die günstigen Energiepreise für Holz entsteht, weil der Anteil des Strombedarfs am gesamten Endenergiebedarf steigt.

Sehr günstig verhalten sich die verbrauchsgebundenen Kosten der dezentralen BHKW, weil der KWK-Strom in den Gebäuden selbst genutzt und damit weniger teurer Strom gekauft werden muss. Außerdem trägt die Vergütung nach dem KWKG zur Wirtschaftlichkeit der Anlage bei. Bei dem Nahwärme-BHKW wird deutlich, dass sich die überwiegende Einspeisung des KWK-Stroms negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, weil der zugekaufte Strom deutlich teurer als die KWK-Vergütung für die eingespeisten Strom ist. Trotz der hohen Einspeisevergütung von 1,1 Mio. €/a in der unsanierten Siedlung, 0,32 Mio. €/a in der EnEV 2009-Siedlung und immerhin noch 0,14 Mio. €/a in der Passivhaus-Siedlung fallen die verbrauchsgebundenen Kosten des Nahwärme-BHKW vergleichsweise hoch aus. Die hohen verbrauchsgebundenen Kosten können auch nicht durch die – im Vergleich zu den dezentralen BHKW – geringeren Investitionskosten kompensiert werden (vgl. 6.4.4).

#### 5.4.4 Jahresgesamtkosten

##### Jahresgesamtkosten ohne Energiepreissteigerung

Abbildung 30 zeigt die Jahresgesamtkosten der untersuchten Systeme der Siedlung für Wärme (Heizung und Warmwasser) und Strom<sup>49</sup>. In den Jahresgesamtkosten sind sowohl die jährlichen Annuitäten der Investitionskosten (siehe 6.4.1.) sowie die betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten (siehe 6.4.2. und 6.4.3.) enthalten.

---

<sup>49</sup> Beinhaltet neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

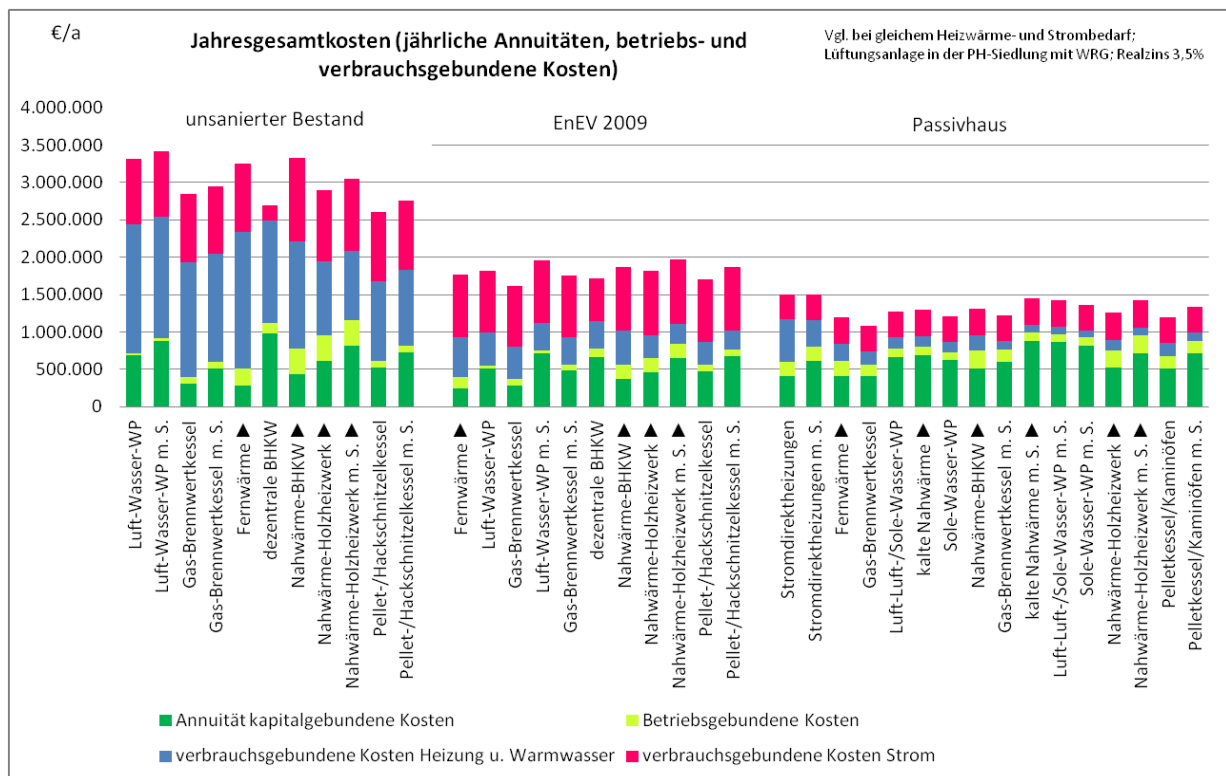


Abbildung 30: Jahresgesamtkosten (€/a) ohne Preissteigerung der Siedlung; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Es ist festzustellen, dass mit sinkendem Wärmebedarf auch der Anteil der verbrauchsgebundenen Kosten an den Jahresgesamtkosten sinkt und damit der Anteil der Investitionskosten stärker ins Gewicht fällt. Im unsanierten Gebäudebestand stellen die verbrauchsgebundenen Kosten den größten Kostenblock der Jahresgesamtkosten dar und liegen um ein Mehrfaches über den jährlichen Annuitäten. Die betriebsgebundenen Kosten spielen insgesamt nur eine untergeordnete Rolle. Jedoch steigt deren Bedeutung bei den Nahwärmenetzen. In der EnEV 2009-Siedlung verursachen die verbrauchsgebundenen Kosten zwar immer noch den größten Kostenblock der jährlichen Gesamtkosten, jedoch nehmen diese aufgrund des geringeren Wärmebedarfs deutlich ab.

In der *unsanierten Siedlung* liegen die Jahresgesamtkosten zwischen 2,6 Mio. €/a und 3,4 Mio. €/a. Wie aus der Abbildung 30 hervorgeht, fallen bei den Luft-Wasser-Wärmepumpen, dem Nahwärme-BHKW und der Fernwärme mit 3,3 Mio. €/a bis 3,4 Mio. €/a die höchsten Jahresgesamtkosten an. Darauf folgen das Nahwärme Holzheizwerk und die Gas-Brennwertkessel mit 2,8 Mio. €/a bis 3,0 Mio. €/a. Während die Jahresgesamtkosten des Nahwärme-BHKW sehr hoch sind, schneiden die dezentralen BHKW trotz der hohen Investitionskosten mit 2,7 Mio. €/a sehr gut ab. Grund hierfür sind die niedrigen verbrauchsgebundenen Kosten, die dadurch entstehen, dass der erzeugte KWK-Strom den Strombedarf der Gebäude deckt und der überschüssige KWK-Strom in das Stromnetz eingespeist wird (siehe Anhang B). Nur die Jahresgesamtkosten der Pellet-/Hackschnitzelkessel ohne Solarthermie (2,6 Mio. €/a) liegen noch darunter.

In der *EnEV 2009-Siedlung* liegen die Jahresgesamtkosten mit 1,6 Mio. €/a bis 2,0 Mio. €/a näher zusammen. Das Nahwärme-Holzheizwerk, die Luft-Wasser-Wärmepumpen und die Pellet-/Hackschnitzelkessel, alle mit Solarthermie, sowie das Nahwärme-BHKW weisen die höchsten Jahresgesamtkosten auf. Die Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne Solarthermie verbessern sich im Vergleich zur unsanierten Siedlung. Die hohen Jahresgesamtkosten sind bei den Pellet-/Hackschnitzelkesseln auf die hohen Investitionskosten und bei dem



Nahwärme-BHKW auf die hohen verbrauchsgebundenen Kosten, die durch den Stromzukauf entstehen, zurückzuführen. Die Fernwärme weist mit 1,8 Mio. €/a die geringsten Jahresgesamtkosten der leitungsgebundenen Wärmeversorgungssystemen auf. Die Bilanz der Gas-Brennwertkessel verbessert sich im Vergleich zu den anderen Systemen deutlich. Mit 1,6 Mio. €/a liegen die Jahresgesamtkosten unter denen der anderen Systeme.

In der *Passivhaus-Siedlung* liegen die Jahresgesamtkosten zwischen 1,1 Mio. €/a und 1,5 Mio. €/a. Die Jahresgesamtkosten der Stromdirektheizungen fallen am höchsten aus, was an den hohen verbrauchsgebundenen Kosten liegt. Ebenfalls hohe Jahresgesamtkosten verursachen die kalte Nahwärme, das Nahwärme-Holzheizwerk und die Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpen, alle drei mit Solarthermie. Grund sind die hohen Investitionskosten. Die Fernwärme weist trotz der berücksichtigten Netzwärmeverluste und hohen verbrauchsgebundenen Kosten mit 1,2 Mio. €/a geringe Jahresgesamtkosten auf. Darunter liegen nur noch die Jahresgesamtkosten der Pelletkessel/Kaminöfen und der Gas-Brennwertkessel, beide ohne Solarthermie. Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Bilanz der Gas-Brennwertkessel und der Nahwärme-BHKW mit abnehmendem Wärmebedarf im Vergleich zu den anderen Systemen verbessert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Jahresgesamtkosten für ein Wärmeversorgungssystem mit verbessertem Gebäude-Energiestandard sinken. Tabelle 35 zeigt die Veränderung der Jahresgesamtkosten (ohne Energiepreissteigerung) für Wärme und Strom der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme. Der Vergleich bezieht sich auf das jeweils gleiche System in den unterschiedlichen Energiestandards (EnEV 2009 zu unsaniert, Passivhaus zu EnEV 2009, Passivhaus zu unsaniert).

Tabelle 35: Veränderung der Jahresgesamtkosten (ohne Energiepreissteigerung) in der betrachteten Siedlung der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme für Raumwärme, Warmwasser und Hilfsenergie (ohne Haushaltsstrom und Straßenbeleuchtung)

	EnEV 2009 im Vergleich zu unsaniert		Passivhaus im Vergleich zu EnEV 2009		Passivhaus im Vergleich zu unsaniert	
Bandbreite der jeweiligen Wärmeversorgungssysteme:	-0,9 ... -1,5 Mio. €		-0,5 ... -0,6 Mio. €		-1,4 ... -2,0 Mio. €	
<b>Auswahl einzelner Systeme:</b>						
Gas-Brennwertkessel	-1,2	-43%	-0,5	-33%	-1,8	-62%
Holzheizungen <sup>1</sup>	-0,9	-35%	-0,5	-30%	-1,4	-54%
Wärmepumpen-Heizungen <sup>2</sup>	-1,5	-45%	-0,6	-30%	-2,0	-62%
dezentrale BHKW	-1,0	-37%	-	-	-	-
Fernwärme	-1,5	-46%	-0,6	-32%	-2,1	-63%
Nahwärme-BHKW	-1,5	-44%	-0,6	-30%	-2,0	-61%
Nahwärme-Holzheizwerk	-1,1	-38%	-0,6	-30%	-1,6	-56%

<sup>1</sup> unsaniert und EnEV 2009: Pellets-/Hackschnitzelkessel, Passivhaus: Pelletkessel/Kaminöfen mit Wassertasche

<sup>2</sup> unsaniert und EnEV 2009: Luft-Wasser-Wärmepumpe, Passivhaus: Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpe

### Einfluss steigender Energiepreise

Energiepreise unterlagen in der Vergangenheit großen Schwankungen, in der Regel stiegen die Preise. Da steigende Energiepreise die Wirtschaftlichkeit von Versorgungssystemen in großem Maße beeinflussen, wird im Folgenden die Sensitivität



von Energiepreissteigerungen untersucht. Künftige Energiepreissteigerungen sind schwer vorherzusehen. Daher werden mehrere Preissteigerungsraten untersucht, die jedoch für alle Energieträger gleich hoch angenommen werden (3 %, 5 % und 7 % p. a., inflationsbereinigt, siehe Abbildung 31 bis Abbildung 34 sowie Anhang H und Anhang I).

Bei der Sensitivitätsanalyse von Energiepreissteigerungen spielen zwei gegenläufige Effekte eine wichtige Rolle: mit geringerem Wärmebedarf sinkt und mit höheren Energiepreissteigerungen steigt der Anteil der verbrauchsgebundenen Kosten an den Jahresgesamtkosten. Neben den verbrauchsgebundenen Kosten haben die Investitionskosten (jährliche Annuitäten) einen hohen Anteil an den Jahresgesamtkosten. Hier verhalten sich die beiden oben genannten Effekte entgegengesetzt zu den verbrauchsgebundenen Kosten. Demnach kommt es bei der Gesamtbetrachtung der Sensitivitätsanalyse auf das Verhältnis zwischen den Investitionskosten und den verbrauchsgebundenen Kosten an.

Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

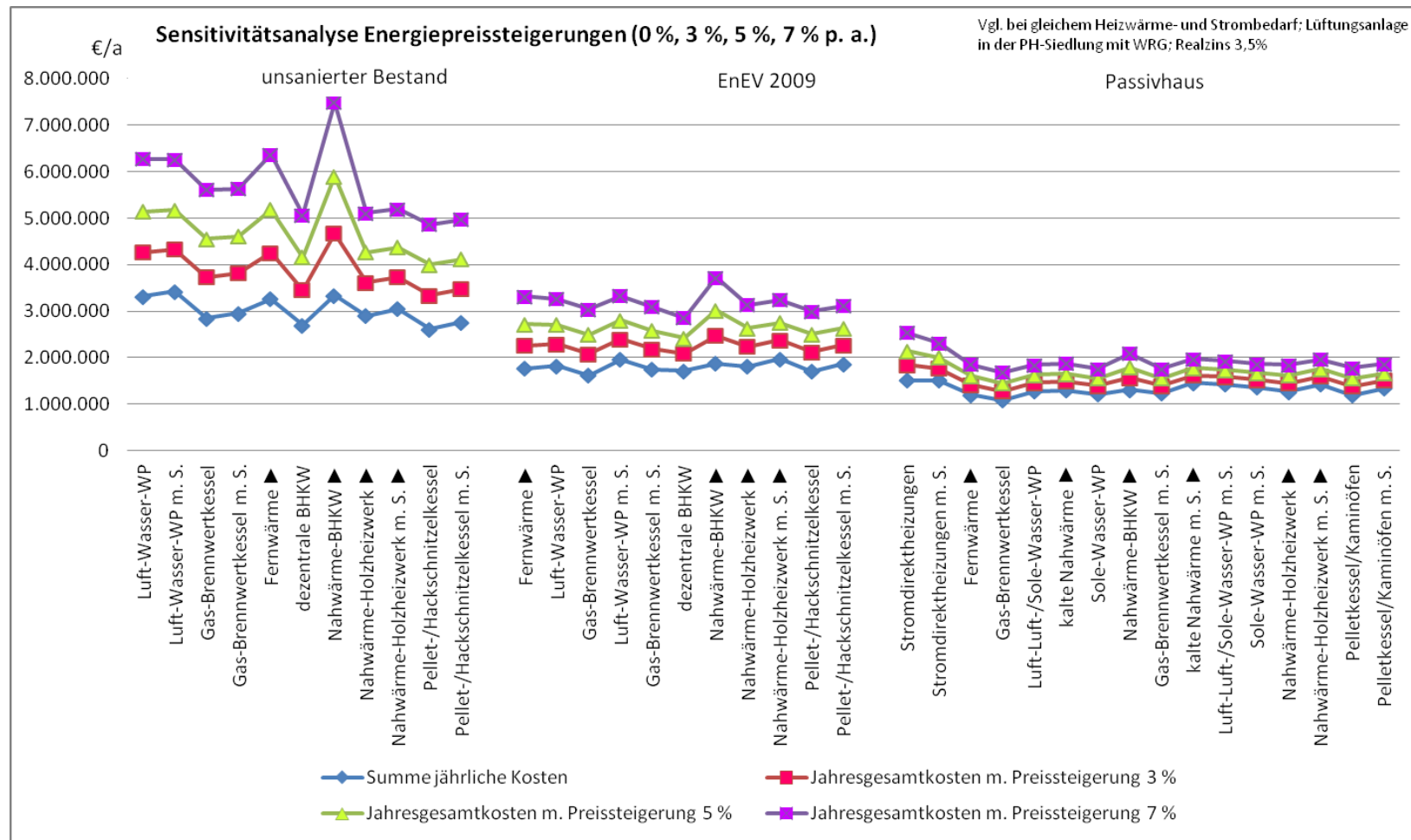


Abbildung 31: Sensitivitätsanalyse - Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerung (0 %, 3 %, 5 %, 7 % p. a.); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

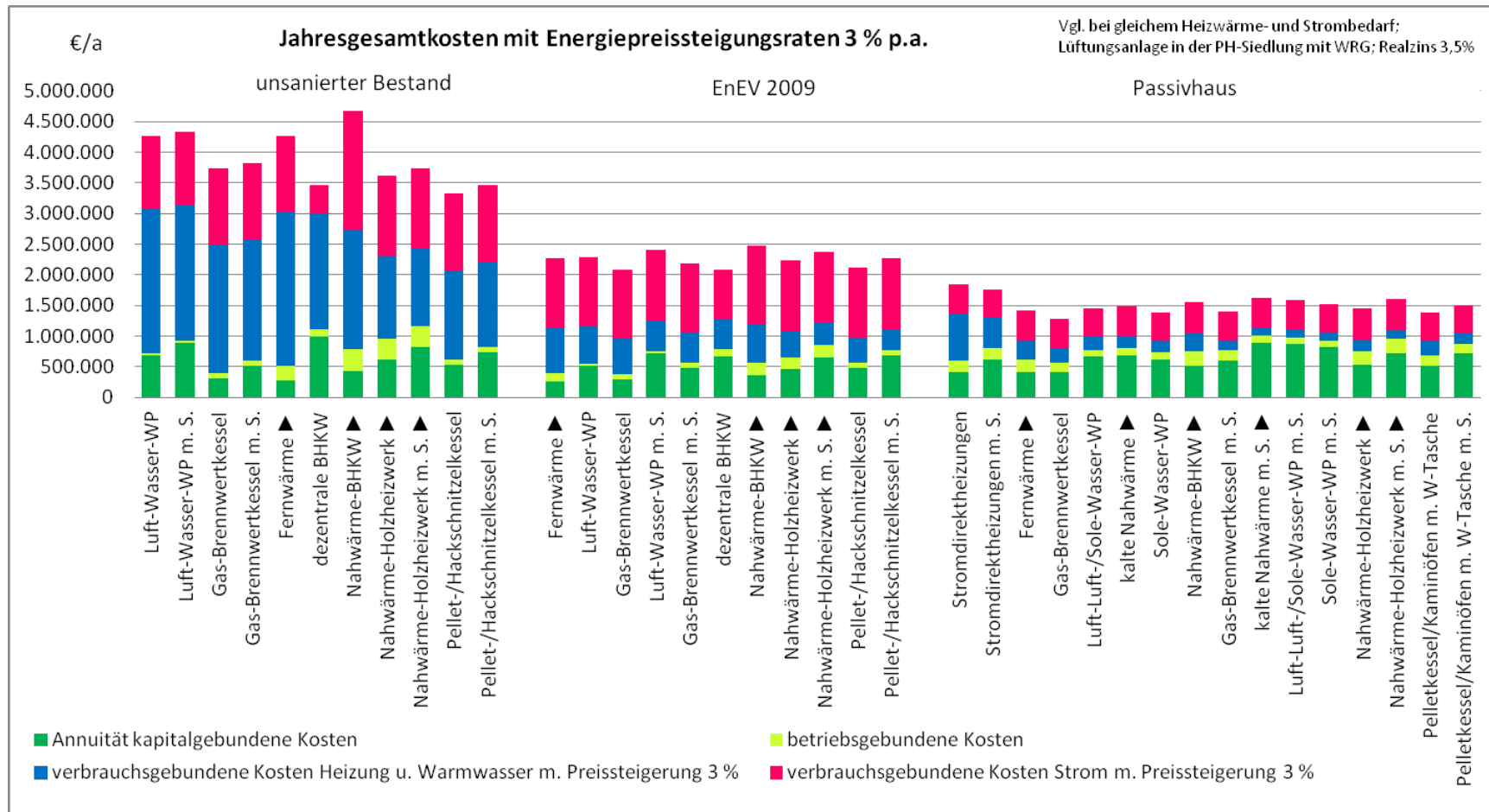


Abbildung 32: Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerungsrate von 3 % p.a. (Annuität, betriebsgebundene u. verbrauchsgebundene Kosten); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

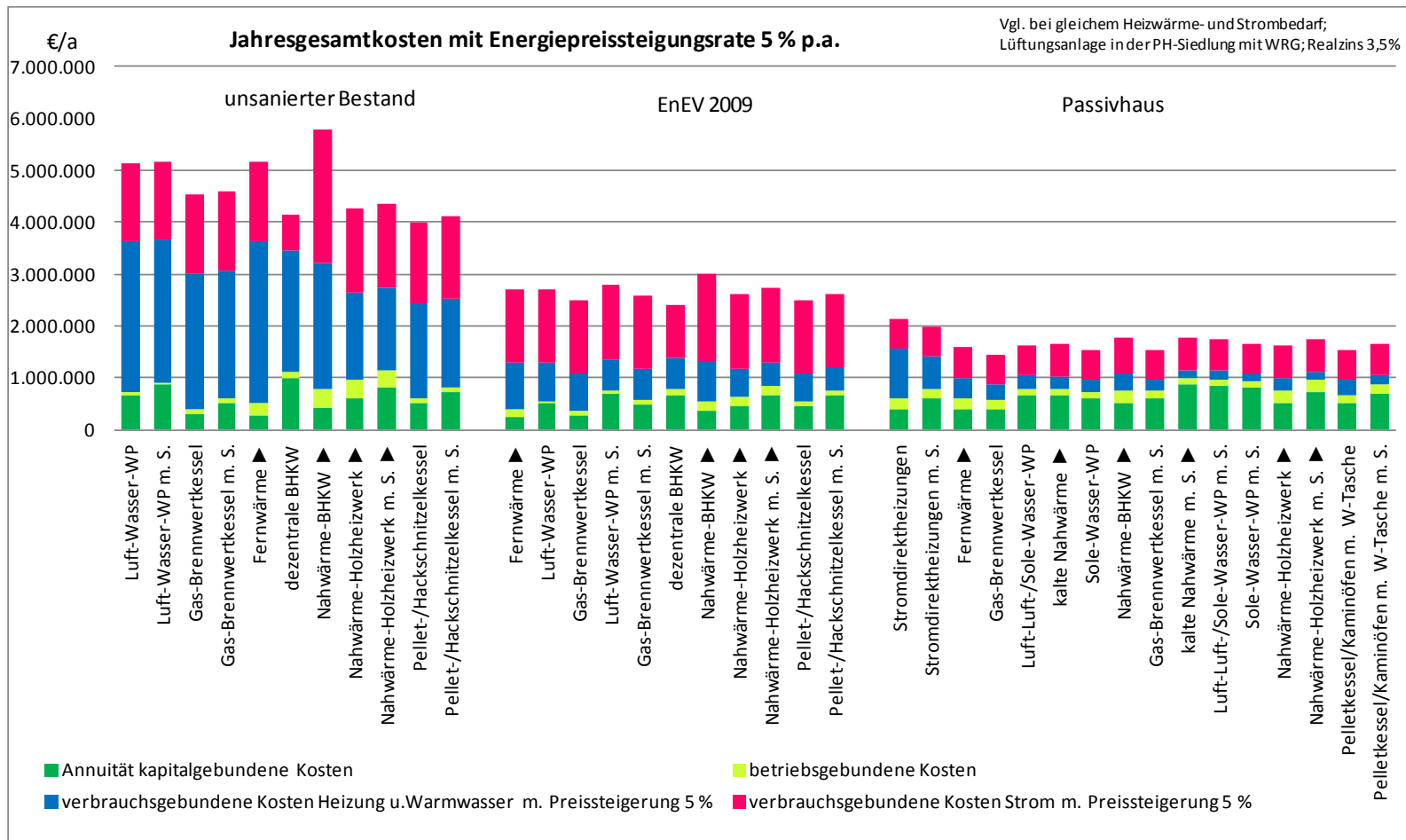


Abbildung 33: Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerungsrate von 5 % p.a. (Annuität, betriebsgebundene u. verbrauchsgebundene Kosten); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

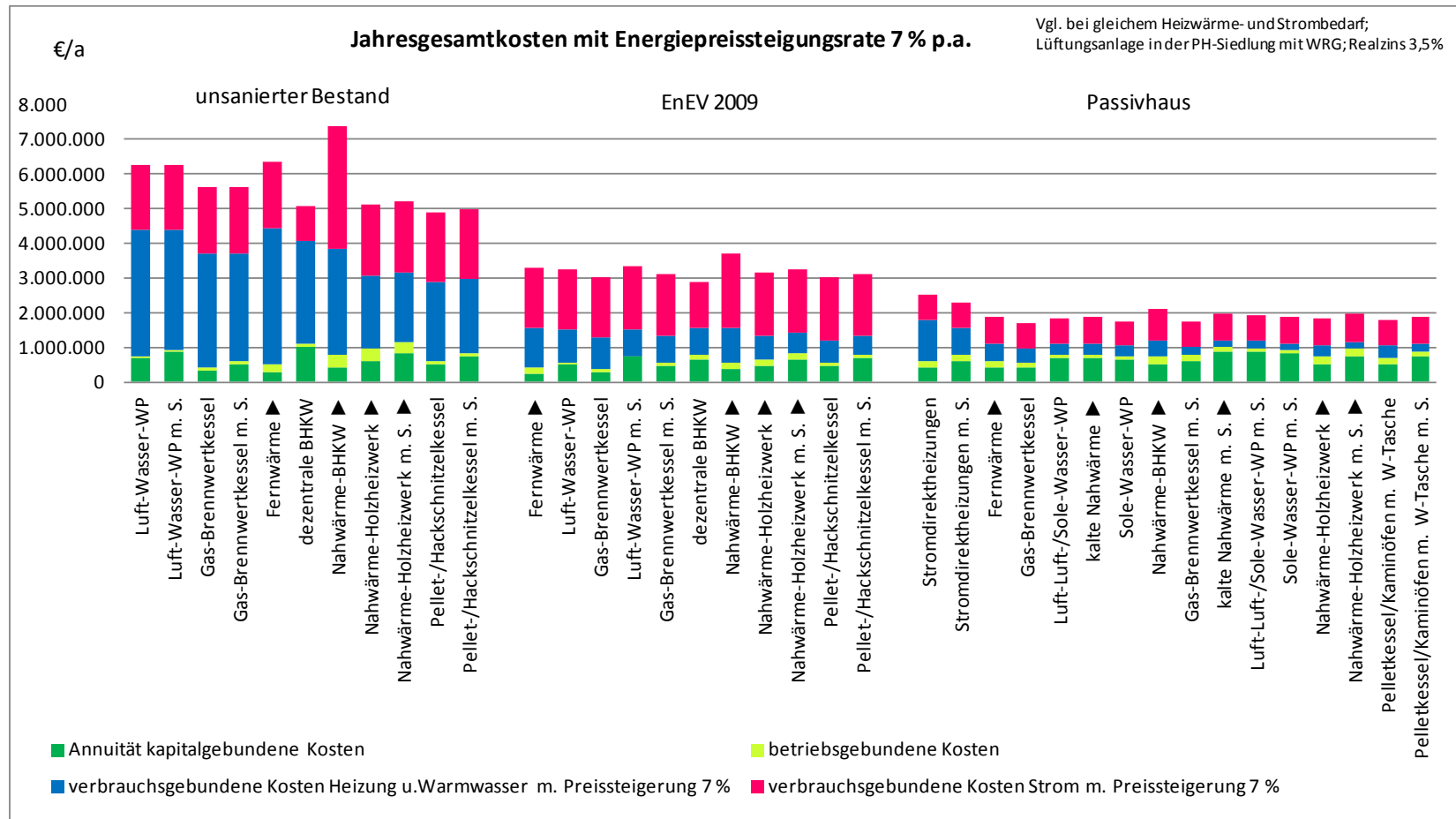


Abbildung 34: Jahresgesamtkosten mit Energiepreissteigerungsrate von 7 % p.a. (Annuität, betriebsgebundene u. verbrauchsgebundene Kosten); sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Im *unsanierten Gebäudebestand* liegen die Jahresgesamtkosten bei einer Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a. zwischen 3,3 Mio. €/a und 4,7 Mio. €/a, bei einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. zwischen 4,0 Mio. €/a und 5,9 Mio. €/a und bei einer Energiepreissteigerungsrate von 7 % p. a. zwischen 4,9 Mio. €/a und 7,5 Mio. €/a. Die Jahresgesamtkosten des Nahwärme-BHKW übersteigen ab einer Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a. die der Luft-Wasser-Wärmepumpen. Je höher die Energiepreissteigerungsrate, desto größer wird der Abstand der Jahresgesamtkosten des Nahwärme-BHKW zu den anderen Versorgungssystemen. Der Grund hierfür liegt in den hohen verbrauchsgebundenen Kosten des Nahwärme-BHKW (siehe 6.4.3.). Erschwerend kommt der Effekt hinzu, dass zwar die Energiepreise für den zugekauften Strom der Verteuerung der Energiepreise unterliegen. Die gesetzlich festgeschriebenen Vergütungssätze für den in das Stromnetz eingespeisten KWK-Strom werden jedoch als gleichbleibend angenommen. Ab einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. übersteigen auch die Jahresgesamtkosten der Fernwärme die der Luft-Wasser-Wärmepumpe, was ebenfalls auf die hohen verbrauchsgebundenen Kosten der Fernwärme zurückzuführen ist. Die Gas-Brennwertkessel, die vergleichsweise geringe Investitions- und verbrauchsgebundene Kosten mittlerer Höhe aufweisen, verändern sich im Vergleich zu den anderen Systemen moderat. Ab einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. verschlechtert sich die Jahresgesamtkostenbilanz der Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie und ab 7 % p. a. liegt auch die Variante ohne Solarthermie über dem Nahwärme-Holzheizwerk. Sowohl das Nahwärme-Holzheizwerk als auch die Gas-Brennwertkessel liegen bei allen Energiepreissteigerungsszenarien im Mittelfeld. Die dezentralen BHKW und die Pellet-/Hackschnitzelkessel<sup>50</sup> verändern ihre Position mit steigenden Energiepreisen kaum. Die Jahresgesamtkosten liegen bei allen Energiepreissteigerungsraten im Vergleich zu den anderen Systemen im unteren Bereich, wobei die Pellet-/Hackschnitzelkessel ohne Solarthermie jeweils die geringsten Jahresgesamtkosten aufweisen. Die bessere Kostenbilanz der dezentralen BHKW im Vergleich zum Nahwärme-BHKW ist darauf zurückzuführen, dass der KWK-Strom in den Gebäuden genutzt und nur der überschüssige KWK-Strom eingespeist wird. Daraus ergeben sich deutlich geringere verbrauchsgebundene Kosten, die den Energiepreissteigerungsraten unterliegen.

In der *EnEV 2009-Siedlung* liegen die Jahresgesamtkosten bei einer Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a. zwischen 2,1 Mio. €/a und 2,5 Mio. €/a, bei einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. zwischen 2,4 Mio. €/a und 3,0 Mio. €/a und bei einer Energiepreissteigerungsrate von 7 % p. a. zwischen 2,9 Mio. €/a und 3,7 Mio. €/a. Auch hier liegen die Jahresgesamtkosten des Nahwärme-BHKW ab einer Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a. über denen der anderen Versorgungsvarianten. Mit zunehmenden Energiepreissteigerungsraten vergrößert sich auch hier der Abstand zu den anderen Versorgungssystemen. Im Gegensatz dazu verbessern sich die Jahresgesamtkosten der dezentralen

---

<sup>50</sup> RHund Sondergebäude: Pellet-Heizkessel, MH Hackschnitzel-Heizkessel.

BHKW bei steigenden Energiepreisen. Zwar fallen die Jahresgesamtkosten ohne Energiepreissteigerungsraten schon vergleichsweise gut aus. Ab einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. fallen die Jahresgesamtkosten jedoch unter die der anderen Versorgungssysteme. Die Jahresgesamtkosten der Fernwärme fallen mit steigenden Energiepreisen im Verhältnis zu den anderen Versorgungssystemen zunehmend schlechter aus, was auf die hohen verbrauchsgebundenen Kosten zurückzuführen ist. Während die Jahresgesamtkosten des Nahwärme-Holzheizwerkes o. S. bei allen Preissteigerungsszenarien im Vergleich zu den anderen Systemen im Mittelfeld liegen, verbessert sich die Position des Nahwärme-Holzheizwerkes mit Solarthermie mit zunehmenden Energiepreissteigerungsraten von der teuersten Variante bei der Betrachtung der Jahresgesamtkosten ohne Energiepreissteigerungsraten bis ins Mittelfeld bei Energiepreissteigerungsraten von 7 % p. a..

In der *Passivhaus-Siedlung* liegen die Jahresgesamtkosten bei einer Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a. zwischen 1,3 Mio. €/a und 1,8 Mio. €/a, bei einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. zwischen 1,5 Mio. €/a und 2,1 Mio. €/a und bei einer Energiepreissteigerungsrate von 7 % p. a. zwischen 1,7 Mio. €/a und 2,5 Mio. €/a. Es zeigt sich, dass die Stromdirektheizungen bei allen Energiepreissteigerungsszenarien die höchsten Jahresgesamtkosten aufweisen. Aufgrund der sehr hohen verbrauchsgebundenen Kosten erhöht sich der Abstand zu den anderen Systemen deutlich. Das Nahwärme-BHKW, das ohne Energiepreissteigerungsraten im Mittelfeld liegt, verschlechtert seine Position mit steigenden Energiepreisen. Ab einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a. weist es die dritthöchsten Jahresgesamtkosten auf. Die holzbefeuerten Wärmeversorgungs- und die Wärmepumpen-Systeme (Sole-Wasser-, Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpen und kalte Nahwärme) verbessern ihre Positionen im Vergleich zu den anderen Systemen geringfügig. Nur die kalte Nahwärme ohne Solarthermie und die Pelletkessel/Kaminöfen ohne Solarthermie verschlechtern ihre Ausgangsposition, wobei die Jahresgesamtkosten der Pelletkessel/Kaminöfen auch bei Energiepreissteigerungsraten von 7 % p. a. vergleichsweise gering ausfallen. Die Gas-Brennwertkessel ohne Solarthermie weisen bei allen Preissteigerungsszenarien die geringsten Jahresgesamtkosten auf. Die Jahresgesamtkosten der Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie schneiden mit zunehmenden Energiepreisen im Vergleich zu den anderen Systemen besser ab und liegen bei einer 7%igen Energiepreissteigerungsrate p. a. im untersten Drittel.

Bei der Sensitivitätsanalyse ist insgesamt festzustellen, dass sich die Jahresgesamtkosten der Fernwärme bei den Energiestandards EnEV 2009 und Passivhaus mit steigenden Energiepreisen im Vergleich zu den anderen Systemen zwar verschlechtern. Jedoch stellt die Fernwärme-Variante in der Passivhaus-Siedlung auch bei einer Energiepreissteigerungsrate von 7 % p. a. eine vergleichsweise preiswerte Variante dar. Hier ist zu beachten, dass die Investitionskosten für das Fernwärmenetz auf den Energiepreis umgelegt wurden, woraus sich höhere verbrauchsgebundene Kosten und niedrigere Investitionskosten ergeben. Da sich die Energiepreissteigerungen auf die verbrauchsgebundenen Kosten und nicht auf die Investitionskosten beziehen, können andere Annahmen zu anderen Ergebnissen führen. Das Nahwärme-BHKW ist ausschließlich in der Passivhaus-Siedlung bis zu einer

Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a. vergleichsweise kostengünstig. Diese Variante ist jedoch aufgrund der hohen verbrauchsgebundenen Kosten stark preissensitiv, so dass sich steigende Energiepreise negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Die dezentralen BHKW sind weniger sensitiv, da der KWK-Strom in den Gebäuden genutzt wird und wenig Strom zugekauft werden muss. Bei den Gas-Brennwertkesseln ohne Solarthermie fallen die Investitionskosten eher gering und die verbrauchsgebundenen Kosten hoch aus, so dass sich Steigerungen der Energiepreise stärker bemerkbar machen. Gleiches gilt für die Stromdirektheizungen, die die höchsten verbrauchsgebundenen Kosten aufweisen, jedoch im Gegensatz zu den Gas-Brennwertkesseln sehr hohe Jahresgesamtkosten aufweist. Mit steigenden Energiepreisen werden in der Tendenz Technologien mit hohem Kapitalanteil, aber geringen Verbrauchskosten zukünftig besser abschneiden.

Wie aus der

Abbildung 31 erkennbar wird, verringert sich der Abstand zwischen den Linien mit steigendem Energiestandard: Sind die Jahresgesamtkosten im unsanierten Gebäudebestand bei einer 7%-igen Preissteigerung 1,9- bis 2,2-mal höher als bei heutigen Preisen, sind die Jahresgesamtkosten in der Passivhausiedlung nur noch 1,6- bis 1,7-mal so hoch. Darüber hinaus sind die Jahresgesamtkosten in der Passivhaus-Siedlung niedriger als im unsanierten Gebäudebestand. Ein geringer Wärmebedarf ist gewissermaßen eine gute Versicherung gegen steigende Energiepreise.

#### **5.4.5 Externe Kosten**

Die in der Tabelle 14 aufgeführten Kostensätze für externe Effekte basieren auf der Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes (vgl. UBA 2012c). Untersucht wurde, wie sich die Wirtschaftlichkeit der Systeme (Jahresgesamtkosten) unter Berücksichtigung der externen Kosten für Wärme und Strom verändert. Die Daten zu den externen Kosten sind im Anhang J aufgeführt.

Die Höhe der externen Kosten hängt sowohl von der Höhe des Kostensatzes für Umweltschäden als auch von der Höhe des Endenergiebedarfs ab. Die Abbildung 35 stellt die Jahresgesamtkosten und die internalisierten externen Kosten für Wärme (Heizung und Warmwasser) und Strom graphisch dar. Die Ergebnisse wurden nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette sortiert.



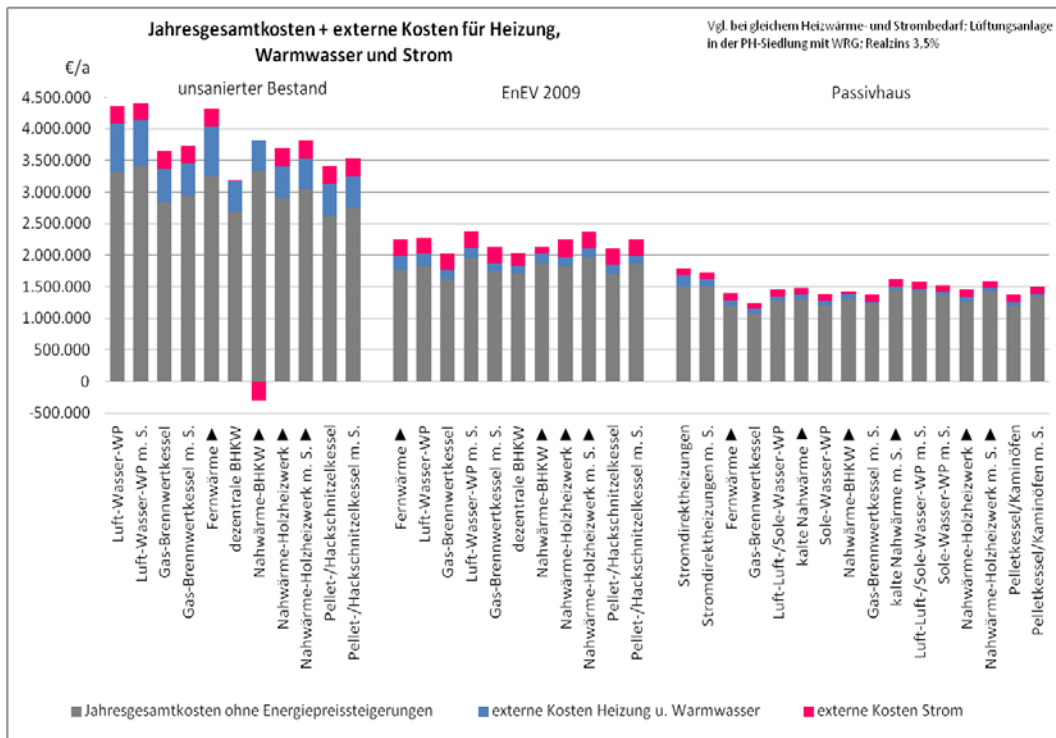


Abbildung 35: Jahresgesamtkosten (€/a) und externe Kosten (€/a) der Siedlung, sortiert nach sinkenden THG-Emissionen m. Vork.; sortiert nach sinkenden THG-Emissionen mit Vorkette

Mit abnehmendem Wärmebedarf nimmt auch die absolute und relative Differenz der externen Kosten zwischen den verschiedenen Wärmeversorgungssystemen ab. Grund ist, dass der anteilige Strombedarf am Gesamtenergiebedarf der Siedlung steigt und für alle Wärmeversorgungssysteme weitgehend gleich hoch ist. In der unsanierten Siedlung liegen die externen Kosten zwischen 0,2 Mio. €/a und 1,1 Mio. €/a, in der EnEV 2009-Siedlung zwischen 0,3 Mio. €/a und 0,5 Mio. €/a und in der Passivhaus-Siedlung zwischen 0,1 Mio. €/a und 0,3 Mio. €/a.

Die Abbildung 36 zeigt einen Vergleich der Jahresgesamtkosten mit und ohne internalisierten externen Kosten.

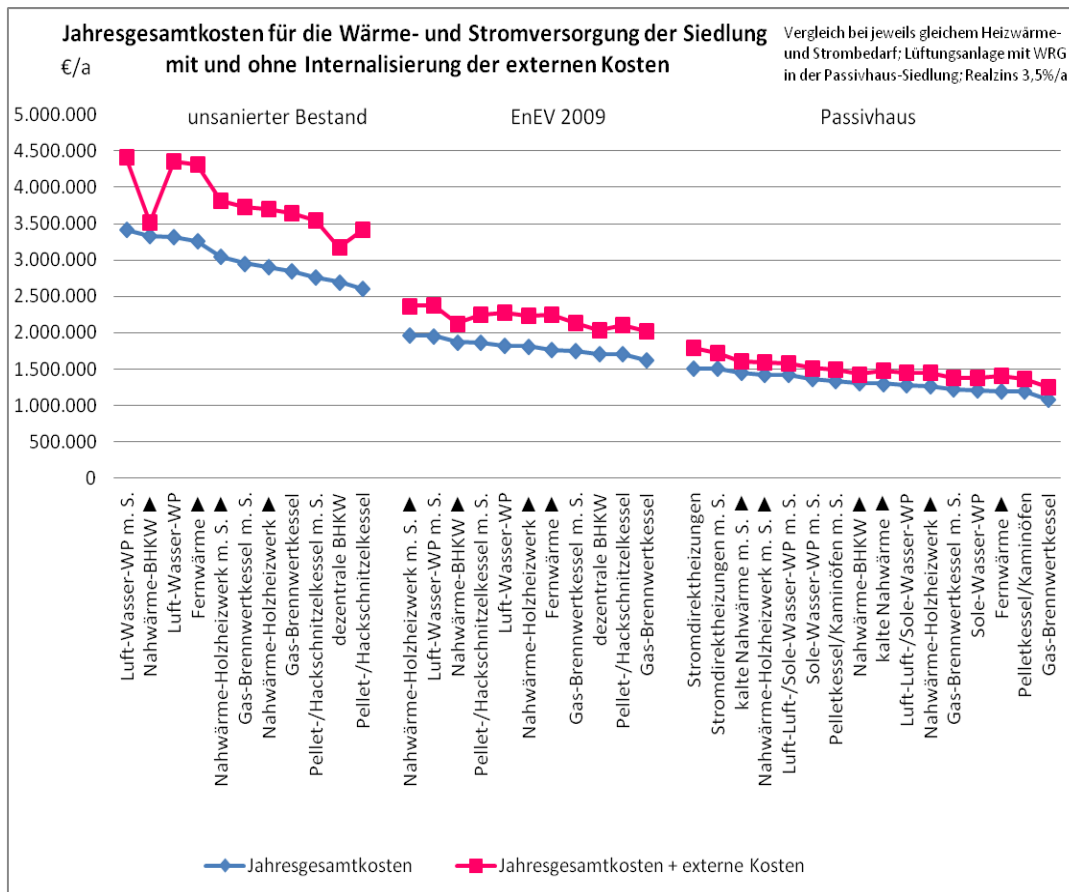


Abbildung 36: Vergleich Jahresgesamtkosten untersuchten Systeme mit und ohne Internalisierung der externen Kosten (€/a); sortiert nach sinkenden Jahresgesamtkosten ohne externe Kosten

Es zeigt sich, dass die Internalisierung der externen Kosten kaum Einfluss auf die Reihenfolge der Systeme im Vergleich zu den Jahresgesamtkosten ohne externe Kosten hat. Eine Ausnahme bilden die BHKW, deren Jahresgesamtkosten sich unter Berücksichtigung der externen Kosten im Vergleich zu den anderen Systemen deutlich verbessern, was auf die Gutschrift des eingespeisten Stroms mit hohem Kostensatz (7,8 €-Cent/kWh) und den vergleichsweise geringen Kostensatz für Umweltschäden für den Brennstoff (Erdgas: 2,28 €-Cent/kWh) zurückzuführen ist. Auch die Fernwärme ist hervorzuheben, deren Wirtschaftlichkeit sich im Gegensatz zu den BHKW aufgrund des hohen Kostensatzes für Umweltschäden (3,48 €-Cent/kWh) verschlechtert. Bei den Wärmepumpen-Varianten und der kalten Nahwärme sind trotz des hohen Kostensatzes für Strom kaum Veränderungen der Reihenfolge festzustellen, was auf die – im Vergleich zu den anderen Systemen – geringen Endenergiebedarfe zurückzuführen ist. Die Stromdirektheizungen weisen zwar sowohl mit als auch ohne externe Kosten die höchsten Jahresgesamtkosten aus. Jedoch ist aus der Abbildung 36 erkennbar, dass die Linie der Jahresgesamtkosten mit externen Kosten stärker abfällt, als bei den Jahresgesamtkosten ohne externe Kosten. Dieser Effekt ist ebenfalls durch den hohen Kostensatz für Strom bedingt.

In der unsanierten Siedlung erhöhen sich die Jahresgesamtkosten durch die Internalisierung der externen Kosten – mit Ausnahme des Nahwärme-BHKW – um 18 % bis 33 % (siehe Anhang J). In der EnEV 2009-Siedlung erhöhen sich

die Jahresgesamtkosten aufgrund des abnehmenden Wärmebedarfs nur noch um 19 % bis 28 % und in der Passivhaussiedlung um 11 % bis 19 %. Bei dem Nahwärme-BHKW hängt die Höhe der externen Kosten neben dem Endenergiebedarf auch von der Stromeinspeisequote ab. Deswegen schwankt der Prozentsatz, um den sich die Jahresgesamtkosten aufgrund der Internalisierung der externen Kosten erhöhen, mit sinkendem Wärmebedarf und nimmt nicht – wie bei den anderen Systemen – stetig ab (unsaniert: 5 %, EnEV 2009: 14 %, Passivhaus: 9 %).

## 6 Schlussfolgerungen

### 6.1 Allgemeines

Die Tabelle 36 fasst die Ergebnisse zu den Primärenergiebedarfen, den THG-Emissionen mit Vorkette und den Jahresgesamtkosten der untersuchten Wärmeversorgungssysteme für Wärme (Heizung und Warmwasser) und Strom<sup>51</sup> zusammen und bewertet sie. Der Endenergiebedarf fließt mittelbar über die drei vorgenannten Kriterien in die Bewertung ein. Deshalb hätte eine zusätzliche Beurteilung des Endenergiebedarfs eine doppelte Bewertung dessen zur Folge. Die Reduzierung der Luftschadstoff-Emissionen sind keine klimapolitischen Ziele der Bundesregierung, weshalb diese ebenfalls nicht in die Bewertung einbezogen sind. Sofern sie besonders hervorstechen, wurden sie mit „\*“ gekennzeichnet.

Insgesamt wurden vier Kategorien gebildet, die in Quantile aufgeteilt wurden:

- Kategorie 1:  $\leq Q_{20}$  (++, „sehr empfehlenswert“)
- Kategorie 2:  $> Q_{20}$  bis  $\leq Q_{70}$  (+, „empfehlenswert“)
- Kategorie 3:  $> Q_{70}$  bis  $\leq Q_{85}$  (-/+, „eingeschränkt empfehlenswert“)
- Kategorie 4:  $> Q_{85}$  bis  $\leq Q_{100}$  (-, „nicht empfehlenswert“)

Die Kategorie 1 ist der Wert des Punktes einer Verteilung, unterhalb dessen sich 20 % aller Fälle der Verteilung befinden. Das soll die Wärmeversorgungssysteme identifizieren, die im Vergleich zu den anderen Systemen am besten abschneiden. Die Kategorie 2 soll das Mittelfeld abbilden und ist der Wert des Punktes einer Verteilung, unterhalb dessen sich 70 % aller Fälle der Verteilung befinden, exklusive der Systeme, die unter die Kategorie 1 fallen. Die Kategorie 3 bildet den Abschnitt zwischen 70 % und 85 % der Verteilung ab. Die Fälle oberhalb von  $Q_{85}$  bilden die Kategorie 4 und schneiden im Vergleich zu den anderen Systemen am schlechtesten ab.

Die folgenden Schlussfolgerungen beziehen sich auf die gegenständliche Modellsiedlung und die zu dem Siedlungsgebiet und den Versorgungssystemen getroffenen Annahmen. Andere Annahmen können zu anderen Ergebnissen führen.

---

<sup>51</sup> Umfasst neben dem Haushalts- bzw. Nutzungsstrom auch den Strom für Hilfsenergiebedarfe, Lüftungen und Solarpumpen, Pumpstrom der Fern- und Nahwärmenetze und den Strom für die Straßenbeleuchtung.

Tabelle 36: Auswertung der Primärenergiebedarfe, der Emissionen und der jährlichen Kosten der Siedlung für Heizung, Warmwasser und Strom

Wärmeversorgungssysteme	Primärenergiebedarf	Treibhausgasemissionen	Jahresgesamtkosten	Gesamturteil
<b>Energiestandard: unsanierter Gebäudebestand</b>				
Luft-Wasser-WP	-	-	-/+	nicht empfehlenswert
Luft-Wasser-P m. S.	-/+	-	-	nicht empfehlenswert
Gas-Brennwertkessel	-	-/+	+	eingeschränkt empfehlenswert
Gas-Brennwertkessel m. S.	-/+	-/+	+	eingeschränkt empfehlenswert
Fernwärme	+	+	-/+	empfehlenswert
dezentrale BHKW	+	+	++	sehr empfehlenswert
Nahwärme-BHKW	+	+	-	eingeschränkt empfehlenswert
Nahwärme-Holzheizwerk	+	+	+	empfehlenswert*
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	+	+	+	empfehlenswert*
Pellet-/Hackschnitzelkessel	++	++	++	sehr empfehlenswert*
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	++	++	+	sehr empfehlenswert*
<b>Energiestandard: EnEV 2009</b>				
Fernwärme	-/+	-	+	eingeschränkt empfehlenswert
Luft-Wasser-WP	-	-	+	eingeschränkt empfehlenswert
Gas-Brennwertkessel	-	-/+	++	eingeschränkt empfehlenswert
Luft-Wasser-WP m. S.	+	-/+	-	eingeschränkt empfehlenswert
Gas-Brennwertkessel m. S.	-/+	+	+	empfehlenswert
dezentrale BHKW	+	+	+	empfehlenswert
Nahwärme-BHKW	+	+	+/-	empfehlenswert
Nahwärme-Holzheizwerk	+	+	+	empfehlenswert*
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	+	+	-	eingeschränkt empfehlenswert
Pellet-/Hackschnitzelkessel	++	++	++	sehr empfehlenswert*
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	++	++	+/-	empfehlenswert*
<b>Energiestandard: Passivhaus</b>				
Stromdirektheizungen	-	-	-	nicht empfehlenswert
Stromdirektheizungen m. S.	-	-	-	nicht empfehlenswert
Fernwärme	-/+	-	++	eingeschränkt empfehlenswert
Gas-Brennwertkessel	-	-/+	++	eingeschränkt

Wärmeversorgungssysteme	Primärenergiebedarf	Treibhausgasemissionen	Jahresgesamtkosten	Gesamturteil
				empfehlenswert
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	-/+	-/+	+	eingeschränkt empfehlenswert
kalte Nahwärme	+	+	+	empfehlenswert
Sole-Wasser-WP	+	+	+	empfehlenswert
Nahwärme-BHKW	+	+	+	empfehlenswert
Gas-Brennwertkessel m. S.	+	+	+	empfehlenswert
kalte Nahwärme m. S.	+	+	-	eingeschränkt empfehlenswert
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	+	+	-/+	empfehlenswert
Sole-Wasser-WP m. S.	+	+	+	empfehlenswert
Nahwärme-Holzheizwerk	+	+	+	empfehlenswert*
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	++	++	+/-	empfehlenswert*
Pelletkessel/Kaminöfen	++	++	++	sehr empfehlenswert*
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	++	++	+	sehr empfehlenswert*

\* Die Luftschadstoff-Emissionen von Holzfeuerungsanlagen wurden hier nicht berücksichtigt. Diese fallen im Vergleich zu anderen Wärmeversorgungssystemen hoch aus. Die Einbeziehung von Luftschadstoff-Emissionen kann daher zu einem anderen Gesamturteil führen.

## 6.2 Modellsiedlung

In der *unsanierten Siedlung* können durch die Wahl des am besten geeigneten Systems nicht nur mehrere Tonnen THG-Emissionen, sondern auch Energieressourcen und Kosten in erheblichem Maß eingespart werden. Im Vergleich zur Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Solarthermie, die die meisten THG-Emissionen emittiert (8.513 t/a), verringern die Pellet-/Hackschnitzelkessel<sup>52</sup> mit Solarthermie die THG-Emissionen um 5.585 t/a (66 %), der Primärenergiebedarf um 19.792 MWh/a (57 %) und die Kosten um ca. 556.346 €/a (17 %). Die Pellet-/Hackschnitzelkessel sind für die unsanierte Modellsiedlung sowohl wirtschaftlich als auch hinsichtlich des Primärenergiebedarfs und der THG-Emissionen die am besten geeignete Variante. Auch bei steigenden Energiepreisen sind die dezentralen Holzfeuerungsanlagen im Vergleich zu den anderen Systemen als sehr wirtschaftlich zu bewerten. Daraus sollte jedoch nicht geschlossen werden, dass Gebäude, die mit holzbefeuerten Wärmeversorgungssystemen ausgestattet sind, nicht energetisch zu sanieren (z. B. Wärmedämmung der Fassade, Keller- und Geschossdecke, etc.) sind. Holz ist eine begrenzte Ressource, weshalb sie nachhaltig (z. B. in Passivhäusern) eingesetzt werden sollte (siehe auch 4.2.9.). Zu berücksichtigen sind auch die sehr hohen Luftschadstoff-Emissionen von Holzfeuerungsanlagen. Gas-Brennwertkessel

<sup>52</sup> RH und Sondergebäude: Pellet-Heizkessel, MFH Hackschnitzel-Heizkessel.

können im Vergleich zu Luft-Wasser-Wärmepumpen zumindest 5 % an THG-Emissionen sowie 14 % der Jahresgesamtkosten einsparen. Die Primärenergiebedarfe sind annähernd gleich hoch. Wegen der schlechten Primärenergie- und THG-Bilanzen sind Luft-Wasser-Wärmepumpen nicht und Gas-Brennwertkessel nur aus wirtschaftlicher Sicht für den unsanierten Gebäudebestand der untersuchten Siedlung empfehlenswert. Dezentrale Lösungen auf KWK-Basis erfüllen die drei vorgenannten Kriterien deutlich besser und weisen zudem sehr geringe Luftschadstoff-Emissionen auf. Bei den leitungsgebundenen Wärmeversorgungssystemen eignen sich in der Gesamtbilanz das Nahwärme-Holzheizwerk mit und ohne Solarthermie sowie die Fernwärme, wobei die Jahresgesamtkosten der Fernwärme – trotz KWK-Förderung für den Netzneubau – im Vergleich zum Nahwärme-Holzheizwerk um 7 % bis 12 % höher ausfallen. Das Nahwärme-BHKW weist auch mit KWK-Förderung für den Netzneubau und Einspeisevergütung für den KWK-Strom im Vergleich zu den meisten Systemen sehr hohe Jahresgesamtkosten auf. Daher ist das Nahwärme-BHKW trotz der ökologischen Vorteile in der unsanierten Siedlung nur eingeschränkt empfehlenswert. Bei den BHKW-Systemen zeigt sich, dass der Umstand, ob der Strom in der Siedlung selbst genutzt wird, wesentlich die Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Das Nahwärme BHKW reagiert auf Energiepreissteigerungen deutlich sensibler als die dezentralen BHKW, bei denen der selbst erzeugte KWK-Strom den Strombedarf der Haushalte deckt.

In der *EnEV 2009-Siedlung* emittiert die Fernwärme die höchsten THG-Emissionen. Die Pellet-/Hackschnitzelkessel mit Solarthermie, die die geringsten THG-Emissionen aufweisen, emittieren 1.549 t/a (40 %) weniger THG-Emissionen und verbrauchen 4.231 MWh/a (30 %) weniger Primärenergie. Jedoch kosten die Pellet-/Hackschnitzelkessel mit Solarthermie jährlich 6 % mehr als die Fernwärme; Fördermittel würden in der Praxis die Kosten senken. Hingegen sparen Pellet-/Hackschnitzelkessel ohne Solarthermie jährlich 3 % an Jahresgesamtkosten ein. Bei der Fernwärme fällt neben der THG-Bilanz auch die Primärenergiebilanz schlecht aus. Aufgrund der guten Kostenbilanz ist diese Variante zwar aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, in der Gesamtbewertung aber nur eingeschränkt empfehlenswert; die Eigenschaften von Fernwärme unterscheiden sich von Ort zu Ort von diesen durchschnittlichen Werten. Die Wirtschaftlichkeit der Fernwärme verschlechtert sich aufgrund der vergleichsweise hohen verbrauchsgebundenen Kosten jedoch mit steigenden Energiepreisen deutlich. Ebenso eingeschränkt geeignet – aufgrund der geringen Jahresgesamtkosten – sind die Gas-Brennwertkessel ohne Solarthermie und die Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Solarthermie. Hingegen weist das Nahwärme-Holzheizwerk mit Solarthermie bessere Primärenergiebilanzen auf. Einschränkungen ergeben sich hier durch die hohen Jahresgesamtkosten und Luftschadstoff-Emissionen. Die Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie, die beiden BHKW-Varianten, die Pellet-/Hackschnitzelkessel und das Nahwärme-Holzheizwerk ohne Solarthermie scheinen hinsichtlich der Primärenergiebedarfe, THG-Emissionen und Jahresgesamtkosten für die Siedlung geeignet. Auch für den Energiestandard 2009 gilt für das Nahwärme-BHKW die Einschränkung, dass sich die Wirtschaftlichkeit bei steigenden Energiepreisen verschlechtert und sich die vergleichsweise hohen Luftschadstoff-Emissionen negativ beim Nahwärme-Holzheizwerk auswirken.

In der *Passivhaus-Siedlung* weisen die Stromdirektheizungen die höchsten THG-Emissionen auf. Im Vergleich dazu können mit Pelletkessel/Kaminöfen mit Solarthermie jährlich 1.362 Tonnen Treibhausgase (59 %), 5.315 MWh Primärenergie (57 %) und ca. 170.000 € (11 %) Jahresgesamtkosten eingespart werden. Die Stromdirektheizungen weisen in allen drei Kategorien (Primärenergiebedarf, THG-Emissionen, Jahresgesamtkosten) im Vergleich zu den anderen Systemen die höchsten Werte auf, weswegen sie selbst in der untersuchten Passivhaus-Siedlung – trotz der geringen Investitionskosten in Wohngebäuden – nicht zu empfehlen ist. Die Gas-Brennwertkessel weisen deutlich geringere Jahresgesamtkosten auf und sind auch in der Gesamtbetrachtung positiv zu beurteilen. Mit solarer Heizungsunterstützung würde sich die ökologische Bewertung sogar noch weiter verbessern. Bei den dezentralen Wärmepumpen sind für die Modellsiedlung nur die Sole-Wasser-Wärmepumpen in der Gesamtbeurteilung geeignet. Die Luft-Luft-/Sole-Wasser-Wärmepumpen<sup>53</sup> ohne Solarthermie sind wegen der zu geringen Jahresarbeitszahl und mit Solarthermie wegen der zu hohen Kosten für die Solaranlage nur eingeschränkt empfehlenswert. In der Gesamtbetrachtung kann aufgrund der guten Primärenergie- und THG-Emissionsbilanz zumindest eine Empfehlung für die Variante mit Solarthermie ausgesprochen werden. Besonders geeignet sind aus ökologischer Sicht die Pelletkessel/Kaminöfen und das Nahwärme-Holzheizwerk, wobei sich auch hier die hohen Luftschadstoffe negativ auswirken. Hervorzuheben ist, dass sich die Wirtschaftlichkeit des Nahwärme-BHKW in der Passivhaus-Siedlung deutlich verbessert und damit in der Gesamtbetrachtung für die untersuchte Siedlung geeignet ist; die starke Sensitivität gegenüber steigenden Energiepreisen relativiert sich aufgrund des geringen Energiebedarfs beim Passivhausstandard. Die Fernwärme<sup>54</sup>, die sehr geringe Jahresgesamtkosten aufweist, ist aufgrund des hohen Primärenergiebedarfs und der THG-Emissionen nur eingeschränkt empfehlenswert. Die kalte Nahwärme ist nur ohne solarthermische Anlage als geeignet zu bewerten. Mit Solarthermie fallen die Jahresgesamtkosten dieses Systems im Vergleich zu den anderen Systemen hoch aus. Aus exergetischer Sicht, sind hier die geringen Verluste beim Wärmetransport hervorzuheben.

### 6.3 Versorgungssysteme

Die Fernwärme, die in der unsanierten Siedlung trotz KWK-Vergütung für den Netzneubau hohe Jahresgesamtkosten, aber einen niedrigen Primärenergiebedarf und niedrige THG-Emissionen aufweist, verbessert mit abnehmendem Wärmebedarf ihre Wirtschaftlichkeit und verschlechtert sich in den ökologischen Kriterien. Vorliegend wurden die Annahmen zur Fernwärme aus UBA 2011a für die Gebäude übernommen. Eigene Annahmen wurden zu den Netzwärmeverlusten<sup>55</sup> getroffen. Die Energiebalance-Studie kommt dagegen zu dem Ergebnis, dass in einem Passivhaus-Quartier mit 34

---

<sup>53</sup> RH elektrische Luft-Luft-Wärmepumpe, MFH und Sondergebäude: elektrische Sole-Wasser-Wärmepumpe.

<sup>54</sup> Der Netzwärmeverluste der Fernwärme betragen in der Passivhaus-Siedlung 832 MWh/a. Das entspricht 4 % des Jahreswärmebedarfes der Siedlung.

<sup>55</sup> Netzwärmeverluste: unsaniert (20 kWh/m<sup>2</sup>a) = 1.546 MWh/a, EnEV 2009: 1.546 MWh/a, Passivhaus: 832 MWh/a.

Wohneinheiten die Fernwärme-Variante mit Stichleitungen aufgrund der hohen Netzwärmeverluste unwirtschaftlich ist (Pehnt u. a. 2009: 209f.). Die unterschiedlichen Ergebnisse können auf unterschiedliche Annahmen zu den Netzwärmeverlusten, Investitionskosten und dem Arbeitspreis der Fernwärme sowie dessen Zusammensetzung<sup>56</sup> zurückgeführt werden. Ein weiterer Unterschied besteht in der Zusammensetzung der Siedlung. In der hier untersuchte Siedlung befinden sich 197 Wohngebäude und drei Nicht-Wohngebäude. Die Nicht-Wohngebäude weisen auch in der Passivhaus-Siedlung im Vergleich zu einem Passivhaus-Wohngebäude einen hohen Wärmebedarf auf. Der Wärmebedarf übersteigt den Wärmebedarf des Quartiers der Energiebalance-Studie um ein 20-faches. Aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse sollten die Parameter, die sich auf die Wirtschaftlichkeit der Fernwärme in Passivhaus-Siedlungen auswirken, in weiteren Studien untersucht werden. Zu den Parametern zählen neben den Netzwärmeverlusten auch die Siedlungsgröße, der Arbeitspreis und der Brennstoffeinsatz. Bei einem Netzneubau können sich auch die Förderungsmöglichkeiten nach dem KWKG positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken<sup>57</sup>.

Bei den BHKW sind sowohl die dezentrale als auch die zentrale Variante in allen drei Energiestandards ökologisch sinnvoll. Die Wirtschaftlichkeit der dezentralen BHKW fällt aufgrund der Eigennutzung des KWKG-Stroms wesentlich besser als die der Nahwärme-Variante aus. Das Nahwärme-BHKW schafft in der unsanierten Siedlung trotz Förderung nach dem KWKG nicht den Sprung in die Wirtschaftlichkeit, die sich bei steigenden Energiepreisen zudem deutlich im Verhältnis zu den anderen Systemen verschlechtert. Die Untersuchung zeigt, dass mit abnehmendem Wärmebedarf der Siedlung das Nahwärme-BHKW wirtschaftlicher wird. Höhere Vergütungssätze nach KWKG würden den Ausbau ökologisch sinnvoller Nahwärmenetze mit BHKW unterstützen.

Die zusätzlichen Kosten für die solarthermischen Anlagen verschlechtern in der EnEV 2009-Siedlung die Wirtschaftlichkeit der Pellet-/Hackschnitzelkessel mit Solarthermie und in der Passivhaus-Siedlung die des Nahwärme-Holzheizwerkes mit Solarthermie. Hier ist zu prüfen, ob die bestehende Förderung zur Wirtschaftlichkeit ausreicht oder ob von solarthermischen Anlagen in Kombination mit der Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien weiter ausgebaut werden könnte. Gleiches gilt für das kalte Nahwärmenetz in der Passivhaus-Siedlung. Diese Variante ist aus ökologischer und exergetischer Sicht besonders aufgrund der geringen Netzwärmeverluste, die gegen Null tendieren, interessant. Denn es werden keine Energieressourcen für die Wärmegewinnung verschwendet, die – wie bei anderen Wärmenetzen – ungenutzt beim Wärmetransport verloren gehen. Kalte Nahwärmesysteme und Sole-Wasser-Wärmepumpen sind in Verbindung

---

<sup>56</sup> In UBA2011 werden die Investitionskosten auf den Arbeitspreis umgelegt. Daher fallen die Investitionskosten für die Fernwärme geringer und die verbrauchsgebundenen Kosten entsprechend höher aus. Diese Annahme wurde in der vorliegenden Arbeit übernommen.

<sup>57</sup> Gemäß § 5a Absatz 1 Satz 1 Nummer 2 KWKG werden Wärmenetze gefördert, wenn der KWKG-Anteil  $\geq 60\%$  beträgt.



mit solarthermischen Anlagen aufgrund ihrer im Vergleich zu den anderen Systemen geringen Primärenergiebedarfe und THG-Emissionen besonders in Passivhaus-Siedlungen attraktiv. Die ökologische Attraktivität dieser strombasierten Systeme wird in Zukunft mit steigendem Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix zunehmen.

Um die Energieeffizienz von Wärmepumpen zu steigern, bedarf es einer Weiterentwicklung dieser Technik, die auf eine Steigerung der Jahresarbeitszahlen abzielen sollte. Bei der kalten Nahwärme schlagen die Kosten für das Sondenfeld von 1,2 Mio. € stark zu Buche, so dass auch hier eine Weiterentwicklung der Technik unter dem Aspekt der Kosteneffizienz förderungswert erscheint. Bei allen leitungsgebundenen Systemen – bis auf die kalte Nahwärme – machen die Kosten für die Verlegung des Rohrnetzes mit Abstand den höchsten Kostenblock aus. Kosten für die Verlegung könnten auch durch eine mittel- bzw. langfristige Planung der Kommune gesenkt werden. So könnte die Planung eines Wärmeversorgungsnetzes zusammen mit einer Erneuerung des Straßenbelages erfolgen, um Synergieeffekte zu nutzen.

## 7 Ausblick

Vor dem Hintergrund des Energiekonzeptes der Bundesregierung sind innovative Konzepte gefragt. Besonders bei Gebäuden besteht großes Optimierungspotential, das durch einen tiefen Sanierungsgrad und effiziente Wärmeversorgungssysteme erschlossen werden kann. Die vorliegende Untersuchung hat sich aufgrund des begrenzten Umfangs mit ausgewählten Techniken befasst. Zukunftsträchtige Techniken, die zur Zielerreichung des Energiekonzeptes der Bundesregierung beitragen können, sind beispielsweise solare Nahwärmenetze, wie im baden-württembergischen Crailsheim umgesetzt. Hier werden 260 Wohneinheiten, eine Schule und eine Sporthalle über solare Nahwärme versorgt<sup>58</sup>. Optimierungspotential besteht auch bei Wärmeversorgungskonzepten für Passivhaus-Siedlungen. Hier werden geringere Vorlauftemperaturen für Heizungen als in unsanierten Siedlungen benötigt. Dieses Temperaturniveau kann durch alternative Energiequellen wie z. B. den Rücklauf von Fernwärmenetzen, geothermische Wärme, Umgebungs-, Abwasser- und Prozesswärme in Kombination mit Wärmepumpen erreicht werden (vgl. Pehnt 2009: 172f.). Diese sogenannten LowEx-Konzepte verfolgen das Ziel, Exergieverluste zu vermeiden, indem Energieträger mit hohem Exergiegehalt (z. B. Erdgas, Erdöl und Kohle) dort eingesetzt werden, wo ein hohes Temperaturniveau erforderlich ist (z. B. Stromerzeugung, Hochtemperaturprozesse, etc., vgl. Pehnt 2009: 173). Hingegen sollten für niedrige Temperaturniveaus Niedrigtemperaturquellen (z. B. Geothermie, Umgebungs- und Abwasserwärme) verwendet werden, um Ressourcen zu schonen. Zur Steigerung der Kosteneffizienz von kalten Nahwärmenetzen sollten zukünftig auch andere Wärmequellen, wie Umgebungswärme, Prozess-

---

<sup>58</sup> Die Wärme wird über eine Kollektorfläche von ca. 7.400 m<sup>2</sup> gewonnen und umfasst einen Erdsonden-Wärmespeicher sowie zwei Pufferspeicher (vgl. Bine 2013).

Abwärme, Abwasser-Abwärme oder Abwärme aus Lüftungs- und Kälteanlagen in Betracht gezogen werden (vgl. Pehnt 2009: 174). Die Berliner Wasserbetriebe haben mit der Wärmeversorgung des IKEA-Einrichtungshauses in Berlin-Lichtenberg ein Projekt mit Abwasserwärmenutzung realisiert<sup>59</sup>. Saisonale Wärmespeicher (z. B. mit Kies und Wasser oder Eisspeicher), in denen im Sommer Sonnenenergie gespeichert und im Winter für Heizung und Warmwasser genutzt wird, sind innovative Technologien, die zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele beitragen können.

---

<sup>59</sup> Vgl. Berliner Wasserbetriebe 2012.

## Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AGFW	Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BWP	Bundesverband Wärmepumpen
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DHH	Doppelhaushälfte
EEX	European Energy Exchange
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden
EU	Europäische Union
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FW	Fernwärme
GWP	Global Warming Potential
GZF	Gleichzeitigkeitsfaktor
HAL	Hausanschlussleitung
HW	Heizwerke
IEA	Internationale Energieagentur
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
k. A.	keine Angaben
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
m. S.	mit Solarthermie
MFH	Mehrfamilienhaus
MwSt	Mehrwertsteuer
NT	Niedertemperatur
o. S.	ohne Solarthermie
p. a.	pro anno
PH	Passivhaus
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket

RA	Rohrabschnitt
RH	Reihenendhaus
SSX	Sommer-Sonntag
ST	Siedlungstyp
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
SWX	Sommer-Werktag
THG	Treibhausgasemissionen
trm	Trassenmeter
TRY	Testreferenzjahr
TWW	Trinkwarmwasser
UBA	Umweltbundesamt
ÜSB	Übergang-Sonntag-Bewölkt
ÜSH	Übergang-Sonntag-Heiter
ÜWB	Übergang-Werktag-Bewölkt
ÜWH	Übergang-Werktag-Heiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vork.	Vorkette
WE	Wohneinheit
WF	Wohnfläche
WP	Wärmepumpe
WRG	Wiederrückgewinnung
WSB	Winter-Sonntag-Bewölkt
WSH	Winter-Sonntag-Heiter
WWB	Winter-Werktag-Bewölkt
WWH	Winter-Werktag-Heiter
ZSE	Zentrales System Emissionen

## Symbolverzeichnis

$A$	Fläche
$A_0$	Anschaffungskosten
$A_{\text{Bne KWK}}$	Nettostromerzeugung
$A_N$	Gebäudenutzfläche
$A_{N,K}$	Annuität
$ANF$	Annuitätsfaktor
$A/V$	Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis
$\sigma_{neKWK}$	Stromkennzahl
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität
$d$	Durchmesser
$\varepsilon$	Leistungszahl
$E_{ab}$	abgegebene Energie
$\text{etaKWK}_{el}$	elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
$\text{etaKWKREF}_{el}$	elektrischer Wirkungsgrad der Referenzanlage
$\text{etaKWKREF}_{th}$	thermischer Wirkungsgrad der Referenzanlage
$\text{etaKWK}_{th}$	thermischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
$e_{WP}$	Jahresaufwandszahl Wärmepumpe
$E_{zu}$	zugeführte Energie
$F_{el,TT}$	Faktor Strombedarf je Typtag
$F_{Heiz,TT}$	Faktor Heizenergiebedarf je Typtag
$f_p$	Primärenergiefaktor
$F_{TWW,TT}$	Faktor Trinkwarmwasserenergiebedarf je Typtag
$i$	realer Zinssatz
$l$	Länge
$\dot{m}$	Massestrom
$N_{\text{Pers./WE}}$	Anzahl der Personen pro Wohneinheit
$P_{ab}$	abgegebene Leistung
$PEE$	Primärenergieeinsparung
$P_{el}$	elektrische Leistung
$P_n$	Pumpenleistung
$P_{zu}$	zugeführte Leistung
$\Delta p$	Druckdifferenz
$\dot{Q}$	Wärmestrom

$\dot{Q}_v$	Wärmeverlust
$Q_{\text{Bne KWK}}$	Nettowärmeerzeugung
$Q_E$	Endenergiebedarf
$Q_{g,HP}$	Wärmegewinne aus internen und solaren Gewinnen
$Q_h$	Heizwärmebedarf
$Q_H$	Heizenergiebedarf
$Q_{\text{Heiz,a}}$	Jahresendenergiebedarf Heizung
$Q_{\text{Heiz,TT}}$	Heizenergiebedarf je Typtag
$Q_{l,HP}$	Wärmeverluste aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlust
$\dot{Q}_{\text{Nutz,max}}$	effektiver Leistungsbedarf
$\dot{Q}_N$	Anschlussleistung
$Q_P$	Primärenergiebedarf
$Q_{\text{tw}}$	Trinkwasserwärmebedarf
$Q_{\text{TW}}$	Trinkwasser-Energiebedarf
$Q_{\text{TWW,a}}$	Jahresendenergiebedarf Trinkwarmwasser
$Q_{\text{TWW,TT}}$	Trinkwarmwasserenergiebedarf je Typtag
$Q_{\text{WP}}$	Nutzwärmestrom
$\rho$	Dichte
$t$	Zeit
$T$	Nutzungsdauer
$T_E$	Erdreichtemperatur
$T_R$	Temperaturrücklauf
$T_V$	Temperaturvorlauf
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$U$	Wärmedurchgangskoeffizienten
$\dot{V}$	Volumenstrom
$V_e$	beheiztes Gebäudevolumen
$\omega$	wirtschaftliche Geschwindigkeit
$W$	Arbeit, Energie
$W_a$	Jahresbedarf Strom
$W_{el}$	elektrische Arbeit, Energie
$W_{\text{Nutz}}$	Nutzwärme, Nutzenergie
$W_{\text{th}}$	thermische Arbeit, Energie
$W_{\text{TT}}$	Strombedarf je Typtag

## Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

$\beta$	Jahresarbeitszahl
$\eta$	Wirkungsgrad
$\eta_{el}$	elektrischer Wirkungsgrad
$\eta_{HP}$	Ausnutzungsgrad Wärmegewinne
$\eta_{th}$	thermischer Wirkungsgrad
$\pi$	LUDOLFsche Konstant

## Literaturverzeichnis

- Ages GmbH 2005: Verbrauchskennwerte 2005: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland
- AGFW (Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V.) beim VDEW: Witterhold, F.G u. a. 1997: Neuartige Wärmeverteilung. Schlussbericht für das BMBF-Vorhaben 0328789B, Forschungsstelle der AGFW, Frankfurt, 1997
- AGFW (Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V.) 2001: AGFW- Arbeitsblatt FW 308: Zertifizierung von KWK-Anlagen - Ermittlung des KWK-Stromes, AGFW Frankfurt am Main
- Althaus, Wilhelm/Wigbels, Michael 2002: Energieversorgungssysteme, Hagen/Oberhausen, Eigenverlag
- Änderung der Richtlinie 92/42/EWG; Amtsblatt L 52 vom 21.2.2004, S. 50 f.
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) 2011: BHKW-Kenndaten: Module, Anbieter, Kosten, <http://asue.de/themen/blockheizkraftwerke/bhkw-tools/bhkw-kenndaten-anbieter-2011-kopie.html> (15.06.2012)
- Berliner Wasserbetriebe 2012: Startseite, Das Unternehmen, Umweltschutz, Wärme aus dem Kanal, <http://www.bwb.de/content/language1/html/7660.php> (17.07.2012)
- Bine 2012: Themen, Gebäude & Stadt, Stadt & Region, Sonne fürs Lernen und Wohnen speichern, <http://www.bine.info/themen/gebaeude-stadt/stadt-region/news/sonne-fuers-lernen-und-wohnen-speichern/> (06.03.2013)
- Blesl, Markus 2002: Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturbedarfs, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Anwendung, Universität Stuttgart
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2010: Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf) (22.08.2012)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2012: Beitrag der Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung zur Energiewende, Vortrag von Müller, Wolfgang auf den Berliner Energietagen am 23.05.2012
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) 2012: Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012 – Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit, [http://www.bbsr.bund.de/cln\\_032/nn\\_1174880/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/ON052012.html](http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_1174880/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/ON052012.html), 25.08.2012
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) 2012: Zahlen und Fakten: Energiedaten: Nationale und Internationale Entwicklung, <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und->



[Prognosen/Energiedaten/gesamtausgabe.html](#), Stand 19.04.2012  
(23.05.2012)

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie)/BMU  
(Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2010:  
Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare  
Energieversorgung,  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf) (30.06.2012)

Buchert, M./Fritsche U./Jenseit, W. Rausch, L./Deilmann, C./Schiller,  
G./Siedentop, S./Lipkow, A. 2004: Nachhaltiges Bauen und Wohnen in  
Deutschland, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit, Berlin

Buderus Bosch Gruppe 2011a: Katalog 2011 - Teil 1 - Zentralheizungsanlagen  
bis 70 kW,  
[http://www.buderus.de/Info\\_Center/Fachinformationen/Fachunterlagen/Buderus\\_Kataloge-2229989.html](http://www.buderus.de/Info_Center/Fachinformationen/Fachunterlagen/Buderus_Kataloge-2229989.html) (22.06.2012)

Buderus Bosch Gruppe 2011b: Katalog 2011 - Teil 2 - Zentralheizungsanlagen  
ab 70 kW,  
[http://www.buderus.de/Info\\_Center/Fachinformationen/Fachunterlagen/Buderus\\_Kataloge-2229989.html](http://www.buderus.de/Info_Center/Fachinformationen/Fachunterlagen/Buderus_Kataloge-2229989.html) (22.06.2012)

C.A.R.M.E.N. 2012: Persönliche Mitteilung von Sebastian Kilburg, C.A.R.M.E.N.,  
Straubing, vom 13.03.2012

Das Kreismagazin 2012: Deutschland, Kreisgebiet, Ortschaften, Linkenheim-  
Hochstetten: <http://www.kreisgebiet.de/kreis-karlsruhe/linkenheim.htm>  
(30.06.2012)

DESTATIS (Statistisches Bundesamt) 2012a: Baupreisindizes Neubau  
(konventionelle Bauart) von Wohn- und Nichtwohngebäuden,  
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr110.html> (24.05.2012)

DESTATIS (Statistisches Bundesamt) 2012b: Baupreisindizes Neubau sonstiger  
Bauwerke sowie Instandhaltung von Wohngebäuden,  
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr210.html> (24.05.2012)

Diefenbach, Nikolaus/Loga, Tobias 2011: Basisdaten für die Hochrechnung der  
Deutschen Gebäudetypologie des IWU, IWU

DIN (Deutsches Institut für Normung) EN 832 1998: Wärmetechnisches  
Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs –  
Wohngebäude, Normenausschuss Bauwesen DIN Deutsches Institut für  
Normung e.V.

DIN (Deutsches Institut für Normung) V 18599: Energetische Bewertung von  
Gebäuden, Ausgabe 2012

DIN (Deutsches Institut für Normung) V 4108-6 2003: Wärmeschutz und  
Energie-Einsparung in Gebäuden: Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme-  
und Jahresheizenergiebedarfs, Normenausschuss Bauwesen DIN Deutsches  
Institut für Normung e.V.

- DIN (Deutsches Institut für Normung) V 4701-10 2003: Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen: Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Normenausschuss Bauwesen DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Endres, Alfred/Radke, Volker 2002: Einführung in die Volkswirtschaftslehre für Umweltwissenschaftler, Hagen/Oberhausen, Eigenverlag
- Energieagentur.NRW 2011: Wo im Haushalt bleibt der Strom?: Anteile, Verbrauchswerte und Kosten von 12 Verbrauchsbereichen in Ein- bis Sechs-Personen-Haushalten, <http://www.energieagentur.nrw.de/presse/singles-verbrauchen-strom-anders-15327.asp>, 07.05.2012
- Erhorn-Kluttig, Heike/Jank, Reinhard/Schrempf, Ludger/Dütz, Armand/Rumpel, Friedrun/Schrade, Johannes/Erhorn, Hans/Beier, Carsten/Sager, Christina/Schmidt, Dietrich 2011: Energetische Quartiersplanung: Methoden – Technologien – Praxisbeispiele, Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag
- EU (Kommission der Europäischen Union) 2007: Entscheidung der Kommission vom 21.Dezember 2006 zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates; Amtsblatt L 32 vom 6.2.2007, S. 183 f.
- EU (Parlament und Rat der Europäischen Union) 2004: Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG
- Fabricius, J. O. 2005: Rahmenbedingungen, Bautechniken und Baukosten des Fernwärmeleitungsbaus. Aus Forschung und Entwicklung – Mitteilungen der Forschungsstelle und des Forschungsbeirates der AGFW, Heft Nr. 10: Das Wachstumspotenzial der Nah- und Fernwärme und Voraussetzungen für den Ausbau, Frankfurt, 2005
- Fernwärmeversorgung Niederrhein GmbH/Projekträger Jülich/ Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT/ GEF Ingenieur AG 2008: Leitungsgebundene Wärmeversorgung im ländlichen Raum: Handbuch zur Entscheidungsunterstützung - Fernwärme in der Fläche
- FERRO Wärmetechnik 2011: Katalog Wärmeerzeuger und Zubehör, <http://ferro-waermetechnik.de/html/download/katalog.php> (22.06.2012)
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) 2010: Pelletheizungen Marktübersicht, <http://www.nachwachsenderohstoffe.de/index.php?id=1202&idtitel=269&idkat=100&pflanzen=0&verarbeitung=0&gruppen=0&level=0&spezial=0&titel suche=> (22.06.2012)
- Fraunhofer ISI 2012: Ermittlung vermiedener Umweltschäden – Hintergrundpapier zur Methodik – im Rahmen des Projekts „Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien“, Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, <http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee->

- [import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hg\\_umweltschaeden\\_bf.pdf](#)  
(25.03.2013)
- Geothermiekontor GmbH 2012: Persönliche Mitteilung von Dr. Jakob Sierig,  
Geothermiekontor GmbH, Tübingen, vom 16.04.2012
- GW (Güstrower Wärmepumpen) 2011: Katalog,  
<http://pdf.archiexpo.de/pdf/gustrower-warmepumpen-gmbh-73059.html>  
(22.06.2012)
- IFK (Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik) 2011: Persönliche  
Mitteilung von Winfried Juschka, IFK, Stuttgart, vom 08.08.2011
- Investitionsbank Schleswig-Holstein 2006: 29. Arbeitskreis der  
Energiebeauftragten in Schleswig-Holstein: Intelligente Straßenbeleuchtung  
- Möglichkeiten der Kostenreduzierung im Bereich der Straßenbeleuchtung,  
<http://www.ib-sh.de/arbeitskreis-der-energiebeauftragten/> (08.05.2012)
- isoplus 2011: Planungshandbuch,  
<http://www.isoplus.de/de/download/planungshandbuch/> (03.04.2012)
- isoplus 2012: Persönliche Mitteilung von Wolfgang Kretschmer, isoplus,  
Rosenheim, vom 23.02.2012
- IWU (Institut für Wohnen und Umwelt GmbH) 2005: Deutsche  
Gebäudetypologie: Systematik und Datensätze, IWU
- IWU (Institut Wohnen und Umwelt) 2002: Bewertung der Wärmeerzeugung  
in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen, Darmstadt,  
<http://www.iwu.de/downloads/veroeffentlichungen/energie/> (08.05.2012)
- Jagnow, Kati/Wolff, Dieter 2011: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur  
Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung;  
Wolfenbüttel/Braunschweig, [www.delta-q.de](http://www.delta-q.de) (23.05.2012)
- Josef-Zerhoch-Mittelschule 2011: Sanierung und Erweiterung der Mittelschule  
Peißenberg: Beantragung von Fördermitteln der DBU, nicht veröffentlicht
- Kaltschmitt, Martin/Streicher, W./Wiese, Andreas 2006: Erneuerbare Energien:  
Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 4. Auflage
- Krimmling, Jörn 2011: Energieeffiziente Nahwärmesysteme: Grundwissen,  
Auslegung, Technik für Energieberater und Planer; Stuttgart, Fraunhofer  
IRB-Verlag
- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) in der Fassung vom 01.01.2012
- Löhne 2010: Klimaschutzprojekt Löhne: Passivhaussanierung Rathaus Löhne  
mit Faktor 10: Vorhabenbeschreibung zum Förderantrag des  
Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
zur Förderung der Umsetzung von Modellprojekten, nicht veröffentlicht
- Loose, Peter 2009: Erdwärmennutzung: versorgungstechnische Planung und  
Berechnung, 3. Auflage
- MAICO 2011: Hauptkatalog
- Mauch, Wolfgang/Corradini, Roger/ Wiesemeyer, Karin/ Schwentzek, Marco  
2010: Allokationsmethoden für spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von Strom und

- Wärme aus KWK-Anlagen, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 55. Jahrgang, Heft 9
- Obernberger, Ingwald 1997: Möglichkeiten der technologischen und wirtschaftlichen Optimierung von Biomasse-Nahwärme und -Mikronetzen, in: Tagungsband zur internationalen ALTENER Konferenz „Mikronetze – Gebäudeübergreifende Wärmeversorgung aus Biomassebasis“, 16./17.10.1997, Salzburg
- Planungsbüro Graw 2012: Persönliche Mitteilung von Detlef Vagelpohl, Planungsbüro Graw, Osnabrück, vom 08.02.2012.
- Pehnt, Martin/Paar, Angelika/Otter, Philipp/Merten, Frank/Hanke, Thomas/Irrek, Wolfgang/Schüwer, Dietmar/Supersberger, Nikolaus/Zeiss, Christoph 2009: Energiebalance – Optimale Systemlösungen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz, [http://www.ifeu.de/energie/pdf/Energiebalance %20Endbericht.pdf](http://www.ifeu.de/energie/pdf/Energiebalance%20Endbericht.pdf) (04.04.2012)
- Passivhaus Institut 2012a: Home, Informationen zum Passivhaus, Qualitätsanforderungen an Passivhäuser, [http://www.passiv.de/de/02\\_informationen/02\\_qualitaetsanforderungen/02\\_qualitaetsanforderungen.htm](http://www.passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm) (30.06.2012)
- Passivhaus Institut 2012b: Luftdichtheit vermeidet Bauschäden, [http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus\\_D/luftdicht\\_06.html](http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/luftdicht_06.html) (22.08.2012.)
- Passivhaus Institut 2012c: Energie – Bezugs – Fläche, [http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus\\_D/energie\\_bezugs\\_flaeche.html](http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/energie_bezugs_flaeche.html) (24.08.2012)
- Passivhaus Institut 2012d: Home, Informationen zum Passivhaus, kostengünstige Passivhäuser in Mitteleuropa, [http://www.passiv.de/de/02\\_informationen/05\\_ph-mittleuropa/05\\_ph-mittleuropa\\_mehr.htm](http://www.passiv.de/de/02_informationen/05_ph-mittleuropa/05_ph-mittleuropa_mehr.htm) (21.05.2012)
- Rötsch, Dietmar 1999: Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen: Fernwärme und Wasser, Berlin/Heidelberg, Springer Verlag
- Sirola, V.-P 2004: Construction Costs and other DH Pipeline Statistics of Finland. EuroHeat & Power II/2004, pp 62-67.
- Thomsen, Claudia 2011: Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahem Untergrundes : Erdwärmekollektoren - Erdwärmesonden ; Empfehlungen für Planer, Ingenieure und Bauherren
- Tzscheutscher, Peter/Lipp, Josef 2011: Praxiserfahrung mit Mini und Mikro BHKW, [http://www.vde.com/de/regionalorganisation/bezirksvereine/suedbayern/facarbeit %20regional/akenergietechnik/documents/2011-05 %20vde %20vortrag %20kwk.pdf](http://www.vde.com/de/regionalorganisation/bezirksvereine/suedbayern/facarbeit%20regional/akenergietechnik/documents/2011-05%20vde%20vortrag%20kwk.pdf), 22.07.2012
- UBA (Umweltbundesamt) 2007a: Praktische Anwendung der Methodenkonvention: Möglichkeiten der Berücksichtigung externer Umweltkosten bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von öffentlichen

- Investitionen, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3194.html> (12.06.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2007b: Externe Kosten kennen – Umwelt besser schützen: Die Methodenkonvention zur Schätzung externer Kosten am Beispiel Energie und Verkehr, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3533.html> (12.06.2012)
- UBA (UMWELTBUNDESAMT) 2007c: ÖKONOMISCHE BEWERTUNG VON UMWELTSCHÄDEN - METHODENKONVENTION ZUR SCHÄTZUNG EXTERNER UMWELTKOSTEN, <HTTP://WWW.UMWELTBUNDESAMT.DE/UBA-INFO-MEDIEN/3193.HTML> (13.06.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2007d: Einheitliche Stoffwerte für Emissionsfaktoren, Heizwerte und Kohlenstoffgehalte für Brennstoffe, Rohstoffe und Produkte, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007, Teil I, Nr. 40 vom 17.08.2007
- UBA (Umweltbundesamt) 2007e: Potenziale von Nah- und Fernwärmenetzen für den Klimaschutz bis zum Jahr 2020, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3501.pdf> (14.07.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2008: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3476.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt) 2009: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2007, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3761.html> (08.05.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2010: Endbericht zum UBA-Vorhaben: Modellrechnungen zu den Immissionsbelastungen bei einer verstärkten Verfeuerung von Biomasse in Feuerungsanlagen der 1. BImSchV, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3787.pdf> (18.03.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2011a: Endbericht zum UBA-Vorhaben: Umweltwirkungen von Heizungssystemen in Deutschland, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4070.pdf> (04.04.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2011b: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011, [www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf) (16.05.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2012a: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2010: Aktualisierte Anhänge 2 und 4 der Veröffentlichung „Climate Change 12/2009“, [www.umweltdaten.de/publikationen/weitere\\_infos/3761-0.pdf](http://www.umweltdaten.de/publikationen/weitere_infos/3761-0.pdf) (20.06.2012)
- UBA (Umweltbundesamt) 2012b: Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeerzeugung (Anhang B zu „Ökonomische Bewertung von Umweltschäden - Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten“) UBA-Working Paper 2012
- UBA (Umweltbundesamt) 2013: Ökonomische Bewertung von Umweltschäden: Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten, in Kürze erscheinend

- UBA (Umweltbundesamt) 2012d: Persönliche Mitteilung von Michael Memmler und Jeannette Pabst, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, vom 13.06.2012
- UBA (Umweltbundesamt) 2012e: Persönliche Mitteilung von Stefan Rother, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, vom 19.06.2012
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 2067 2000: Wirtschaftlichkeit und gebäudetechnische Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung, VDI
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 4655 2008: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, VDI
- Winter, Walter/Haslauer, Thomas/Obernberger, Ingwald 2011: Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen, in Euroheat & Power, 09&10/2001
- Wöhe, Günter 1996: Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 26. Auflage, München, Verlag Vahlen
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2012: Persönliche Mitteilung von Dietmar Schüwer, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, nach Rücksprache mit Markus Gailfuß, BHKW-Consult, Rastatt, vom 10.05.2012.

## Anhang A: Referenzlastprofile der Nicht-Wohngebäude gemäß VDI 4655

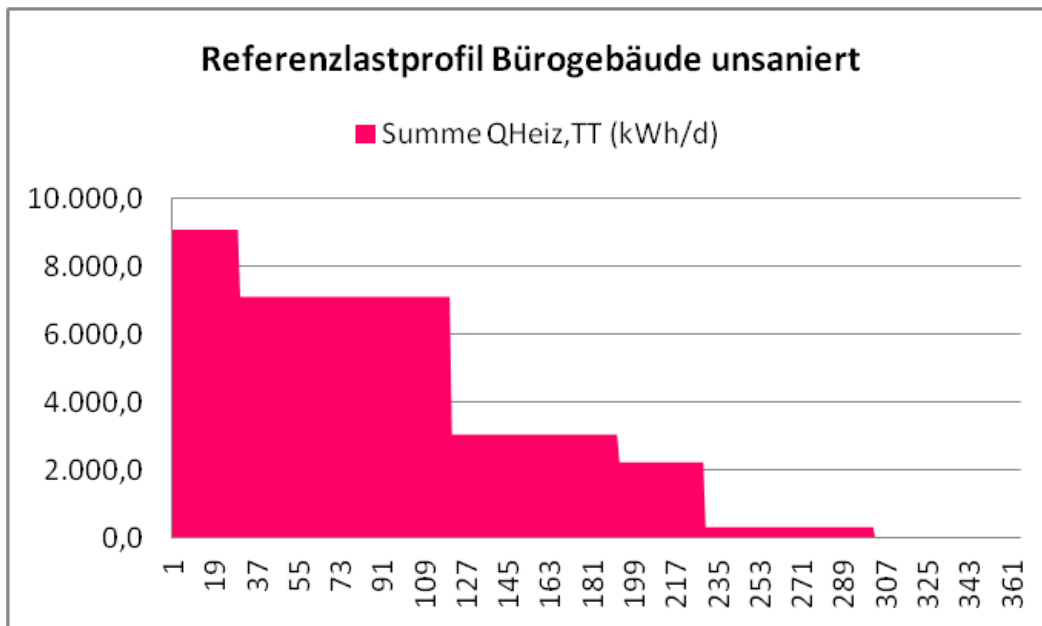


Abbildung 37: Referenzlastprofil des Bürogebäudes für Heizung für den unsanierten Gebäudebestand

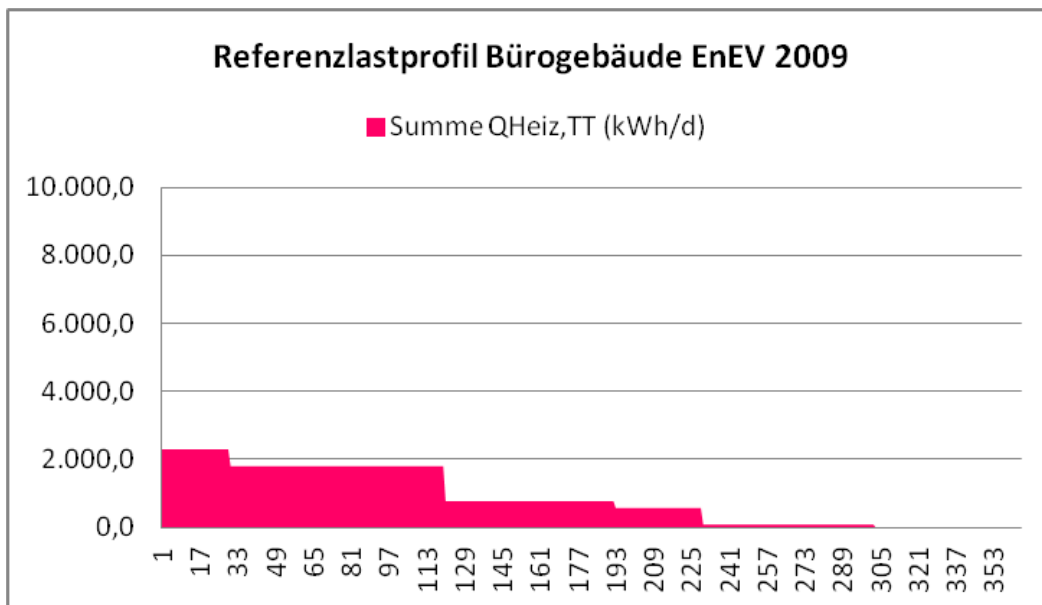


Abbildung 38: Referenzlastprofil des Bürogebäudes für Heizung für den Energiestandard EnEV 2009

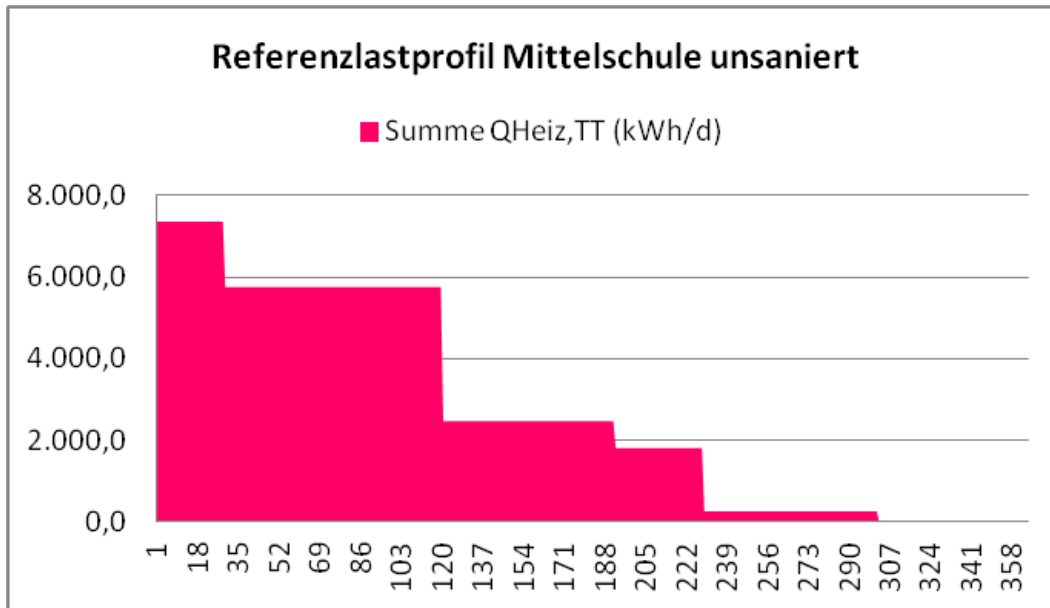


Abbildung 39: Referenzlastprofil der Mittelschule für Heizung für den unsanierten Gebäudebestand

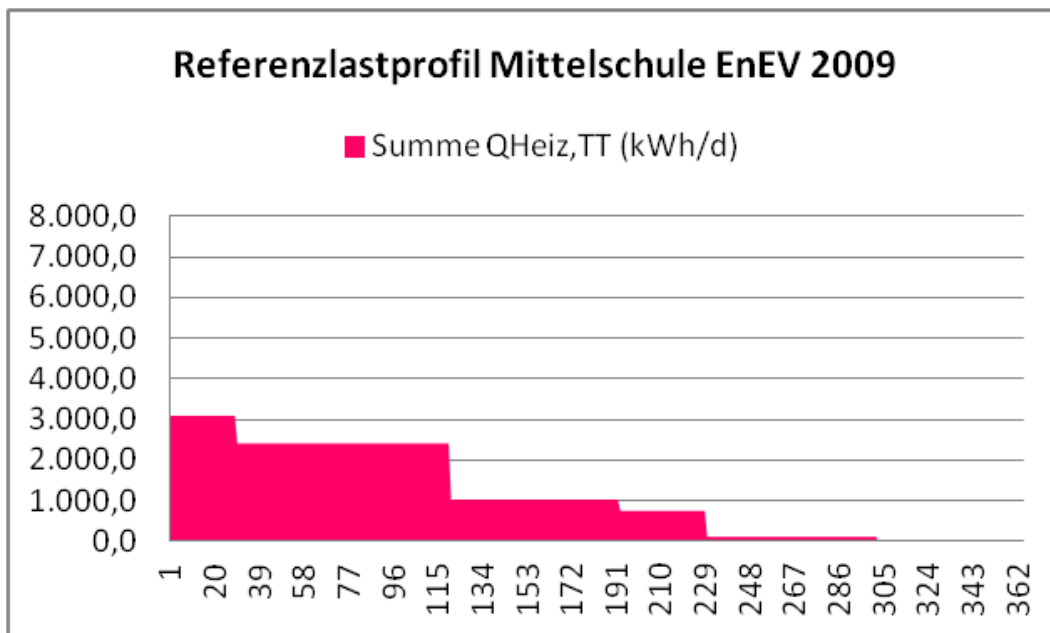


Abbildung 40: Referenzlastprofil der Mittelschule für Heizung für den Energiestandard EnEV 2009



## Anhang B: Berechnung der Nettostromerzeugung

Tabelle 37: Berechnung der Nettostromerzeugung der Nahwärme-BHKW

Energiestandard	Jahres- heizwärme- bedarf (kWh/a)	Deckungsgrad BHKW an Jahresheizwär- mebedarf	Nettowärme- erzeugung KWK (kWh/a)	elektr. Wirkungsgr ad BHKW	thermischer Wirkungsgrad BHKW	Strom- kennzahl BHKW	Nettostrom- erzeugung BHKW (kWh/a)	Hilfsenergie- u. Pumpstrom- bedarf (kWh/a)	Einge- speister Strom (kWh/a)	Einspeise- quote
unsaniert	22.952.483,0	60 %	13.771.489,8	43,3 %	44,0 %	0,984	13.552.397,9	184.414	13.367.984	98,6 %
EnEV 2009	7.442.462,1	61 %	4.539.901,9	39,5 %	49,4 %	0,800	3.630.083,5	105.477	3.524.636	97,1 %
Passivhaus	3.303.940,2	61 %	2.015.403,5	36,0 %	52,0 %	0,692	1.395.279,4	62.111	1.333.168	95,5 %

Tabelle 38: Berechnung der Nettostromerzeugung der dezentralen BHKW

Energiestandard	Anzahl	Nettowärme- erzeugung KWK (kWh/a)	elektr. Wirkungsgrad BHKW	thermischer Wirkungsgrad BHKW	Strom- kennzahl BHKW	Nettostrom- erzeugung BHKW (kWh/a)	Strombedarf Summe Gebäude (kWh/a)	eingespeister Strom (kWh/a)	Einspeise- quote
EFH unsaniert	197	20.886	29,3 %	58,6 %	0,500	2.057.251	853.404	1.203.847	59 %
MFH unsaniert	57	121.454	27,9 %	60,5 %	0,461	3.192.521	2.347.317	845.204	26 %
Bürogebäude unsaniert	2	692.357,0	34,9 %	56,9 %	0,613	849.324	150.000	699.324	82 %
Mittelschule unsaniert	1	561.481,3	35,8 %	53,0 %	0,675	379.265	148.280	230.985	61 %
							<b>Summe:</b>	<b>2.979.360</b>	
EFH EnEV 2009	197	6.409	25,0 %	65,0 %	0,385	485.605	800.805	0	-
MFH EnEV 2009	57	27.129	25,0 %	65,0 %	0,385	594.747	2.201.283	0	-
Bürogebäude EnEV 2009	2	176.512	29,0 %	56,0 %	0,518	182.816	101.400	81.416	45 %
Mittelschule EnEV 2009	1	234.868	28,3 %	61,3 %	0,462	108.430	122.988	0	
							<b>Summe:</b>	81.416	

## Anhang C: Berechnung der KWK-Vergütungen

Tabelle 39: KWK-Vergütungssätze

KWK-Vergütung	Leistungsbereiche	Vergütungssätze
Stromeinspeisevergütung (€/kWh)		0,05
Netzvermeidungskosten (€/kWh)		0,005
KWK-Zuschlag (€/kWh) gem. § 7 Abs. 2 S. 2 KWKG	⚡ 50 kW <sub>el</sub>	0,0541
	> 50kW <sub>el</sub> bis ⚡ 250 kW <sub>el</sub>	0,04
	> 50 kW <sub>el</sub> (a.F)/250 kW <sub>el</sub> (n.F.)	0,024
KWK-Zuschlag (€/kWh) gem. § 7 Abs. 1 KWKG	bis 50 kW <sub>el</sub>	0,0541

Tabelle 40: Berechnung der KWK-Vergütungen Nahwärme-BHKW-Varianten für alle Energiestandards

zentrale BHKW-Variante	P <sub>el</sub> (kW)	Nettostromerzeugung (kWh)	eingespeister Strom (kWh)	Leistungsanteil zugeordnete KWK-Strommenge ⚡ 50 kW <sub>el</sub> (kWh)	Leistungsanteil zugeordnete KWK-Strommenge > 50kW <sub>el</sub> bis ⚡ 250 kW <sub>el</sub>	Leistungsanteil zugeordnete KWK-Strommenge > 250 kW <sub>el</sub> bis 2 MW <sub>el</sub> (kWh)	Stromeinspeisevergütung (€)	Netzvermeidungskosten (€)	KWK-Zuschlag gem. § 7 Abs. 5 S. 4 KWKG (€)	Summe KWK Vergütung (€)
Nahwärme-BHKW unsaniert	1.560	13.552.398	13.367.984	434.372	1.737.487	11.380.539	668.399	66.840	366.132	<b>1.101.371</b>
Nahwärme-BHKW EnEV 2009	420	3.630.108	3.524.661	432.156	1.728.623	1.469.330	176.233	17.623	127.788	<b>321.645</b>
Nahwärme-BHKW Passivhaus	150	1.395.279	1.333.168	465.093	930.186	-	66.658	6.666	62.369	<b>135.693</b>

Tabelle 41: Berechnung der KWK-Vergütungen der dezentralen BHKW für den Energiestandard „unsaniert“

dezentrale BHKW-Variante unsaniert	$P_{el}(kW)$	Nettostromerzeugung (kWh)	eingespeister Strom (kWh)	Leistungsanteil zugeordnete KWK-Strommenge $\nabla 50 kW_{el}$ (kWh)	Leistungsanteil zugeordnete KWK-Strommenge $> 50kW_{el}$ bis $\nabla 250 kW_{el}$	Stromeinspeisevergütung (€)	Netzvermeidungskosten (€)	KWK-Zuschlag (€)	Summe KWK Vergütung (€)
EFH unsaniert (Anz. 197)	8	2.057.251	1.203.847	2.057.251	-	60.192	6.019	111.297	177.509
MFH unsaniert (Anz. 57)	12	3.192.521	845.204	3.192.521	-	42.260	4.226	172.715	219.202
Bürogebäude unsaniert (Anz. 2)	119	849.324	699.324	356.859	492.465	34.966	3.497	39.005	77.467
Mittelschule unsaniert (Anz. 1)	105	379.265	230.985	180.602	198.662	11.549	1.155	17.717	30.421
<b>Summe</b>									<b>504.599</b>

Tabelle 42: Berechnung der KWK-Vergütungen der dezentralen BHKW für den Energiestandard „EnEV 2009“

dezentrale BHKW-Variante EnEV 2009	$P_{el}$ (kW)	Nettostrom- erzeugung (kWh)	eingespeister Strom (kWh)	Leistungsanteil zugeordnete KWK- Strommenge ↕ $50 \text{ kW}_{el}$ (kWh)	Stromeinspeise- vergütung (€)	Netzvermei- dungskosten (€)	KWK- Zuschlag (€)	Summe KWK Vergütung (€)
EFH EnEV 2009 (Anz. 197)	1,5	485.605	-	-	-	-	26.271	26.271
MFH EnEV 2009 (Anz. 57)	4	594.747	-	-	-	-	32.176	32.176
Bürogebäude EnEV 2009 (Anz. 2)	25	182.816	81.416	182.816	4.071	914	9.890	14.875
Mittelschule EnEV 2009 (Anz. 1)	30	108.430	-	-	-	-	5.866	5.866
							<b>Summe</b>	<b>79.188</b>

## Anhang D: Netzwärmeverluste unterschiedlicher Rohrarten

Tabelle 43: Netzwärmeverluste unterschiedlicher Rohrarten

Energiestandard	Gesamtenergiebedarf alle Einzelgebäude (kWh/a)	Netzwärmeverluste Einzelrohr Standard Dämmung (kWh/a)	Netzwärmeverluste Doppelrohr 1-fach verstärkte Dämmung (kWh/a)	Gesamtenergiebedarf Siedlung; Einzelrohr (kWh/a)	Gesamtenergiebedarf Siedlung. Doppelrohr (kWh/a)	Netzwärmeverluste Einzelrohr Standard Dämmung ( %)	Netzwärmeverluste Doppelrohr 1-fach verstärkte Dämmung ( %)
Nahwärme-BHKW unsaniert	22.273.290	1.505.822	838.583	23.779.112	23.111.873	6 %	4 %
Nahwärme-BHKW EnEV 2009	6.411.627	1.505.822	838.583	7.917.449	7.250.210	19 %	12 %
Nahwärme-BHKW Passivhaus	2.737.914	831.904	529.946	3.569.819	3.267.861	23 %	16 %
Nahwärme-Holzheizwerk o.S. unsaniert	22.273.290	1.505.822	838.583	23.779.112	23.111.873	6 %	4 %
Nahwärme-Holzheizwerk o.S. EnEV 2009	6.411.627	1.505.822	838.583	7.917.449	7.250.210	19 %	12 %
Nahwärme-Holzheizwerk o.S. Passivhaus	2.737.914	831.904	529.946	3.569.819	3.267.861	23 %	16 %
Nahwärme-Holzheizwerk m. S. unsaniert	20.906.319	1.505.822	838.583	22.412.141	21.744.902	7 %	4 %
Nahwärme-Holzheizwerk m. S. EnEV 2009	5.291.968	1.505.822	838.583	6.797.790	6.130.551	22 %	14 %
Nahwärme-Holzheizwerk m. S. Passivhaus	1.749.986	831.904	529.946	2.581.890	2.279.932	32 %	23 %

## Anhang E: End- und Primärenergiebedarfe

Tabelle 44: End- und Primärenergiebedarfe für den Energiestandard „unsanierter Gebäudebestand“

Daten	Endenergiebedarf (MWh/a)			Primärenergiebedarf (MWh/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Luft-Wasser-WP	9.807	3.518	13.325	25.497	9.148	34.645
Luft-Wasser-WP m. S.	9.281	3.496	12.777	24.130	9.089	33.219
Gas-Brennwertkessel	23.079	3.600	26.679	25.387	9.361	34.747
Gas-Brennwertkessel m. S.	21.785	3.609	25.394	23.964	9.382	33.346
Fernwärme	23.819	3.634	27.453	16.674	9.448	26.122
dezentrale BHKW	20.735	7.491	28.226	22.808	3.833	26.641
Nahwärme-BHKW	21.446	10.372	31.817	23.590	-3.373	20.218
Nahwärme-Holzheizwerk	25.659	3.815	29.474	10.443	9.919	20.362
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	24.142	3.823	27.965	9.825	9.941	19.766
Pellet-/Hackschnitzelkessel	27.514	3.696	31.210	5.503	9.611	15.113
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	26.103	3.705	29.807	5.221	9.632	14.853

Tabelle 45: End- und Primärenergiebedarfe für den Energiestandard „EnEV 2009“

Daten	Endenergiebedarf (MWh/a)			Primärenergiebedarf (MWh/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Fernwärme	8.067	3.306	11.373	5.647	8.596	14.242
Luft-Wasser-WP	2.520	3.305	5.825	6.552	8.594	15.145
Gas-Brennwertkessel	6.480	3.260	9.740	7.128	8.477	15.605
Luft-Wasser-WP m. S.	2.093	3.357	5.449	5.441	8.727	14.168
Gas-Brennwertkessel m. S.	5.444	3.269	8.713	5.989	8.498	14.487
dezentrale BHKW	5.478	4.166	9.644	6.026	7.426	13.452
Nahwärme-BHKW	6.903	5.129	12.032	7.594	5.205	12.799
Nahwärme-Holzheizwerk	8.173	3.395	11.567	3.326	8.826	12.152
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	6.930	3.403	10.333	2.820	8.848	11.668
Pellet-/Hackschnitzelkessel	7.622	3.348	10.970	1.524	8.706	10.230
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	6.417	3.357	9.773	1.283	8.727	10.011



Tabelle 46: End- und Primärenergiebedarfe für den Energiestandard „Passivhaus“

Daten	Endenergiebedarf (MWh/a)			Primärenergiebedarf (MWh/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Stromdirektheizungen	2.242	1.357	3.599	5.829	3.528	9.357
Stromdirektheizungen m. S.	1.427	1.382	2.809	3.710	3.594	7.304
Fernwärme	3.570	1.414	4.984	2.499	3.676	6.175
Gas-Brennwertkessel	2.693	1.357	4.050	2.963	3.528	6.491
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	915	1.357	2.272	2.380	3.528	5.908
kalte Nahwärme	801	1.433	2.234	2.083	3.726	5.808
Sole-Wasser WP	801	1.357	2.158	2.083	3.528	5.611
Nahwärme-BHKW	3.118	2.174	5.291	3.429	2.427	5.856
Gas-Brennwertkessel m. S.	1.765	1.382	3.147	1.941	3.594	5.535
kalte Nahwärme m. S.	516	1.458	1.974	1.340	3.792	5.132
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	582	1.382	1.964	1.513	3.594	5.107
Sole-Wasser WP m. S.	516	1.382	1.898	1.340	3.594	4.934
Nahwärme-Holzheizwerk	3.629	1.461	5.089	1.510	3.797	5.307
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	2.532	1.486	4.018	1.054	3.863	4.917
Pelletkessel/Kaminöfen	3.396	1.357	4.753	679	3.528	4.207
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	2.239	1.382	3.621	448	3.594	4.042

## Anhang F: THG-Emissionen für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom (Sensitivitätsanalyse)

Tabelle 47: Sensitivitätsanalyse: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom „unsanierter Gebäudebestand“

Daten	THG-Emissionen 638,8 g THG/kWh (t/a)			THG-Emissionen 400 g THG/kWh (t/a)			THG-Emissionen 200 g THG/kWh (t/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Luft-Wasser-WP	6.265	2.248	8.513	3.923	1.407	5.330	1.961	704	2.665
Luft-Wasser-WP m. S.	5.929	2.233	8.162	3.712	1.398	5.111	1.856	699	2.555
Gas-Brennwertkessel	5.789	2.300	8.089	5.789	1.440	7.229	5.789	720	6.509
Gas-Brennwertkessel m. S.	5.465	2.305	7.770	5.465	1.443	6.908	5.465	722	6.186
Fernwärme	5.097	2.321	7.419	5.097	1.454	6.551	5.097	727	5.824
dezentrale BHKW	5.201	739	5.940	5.201	1.441	6.642	5.201	2.028	7.229
Nahwärme-BHKW	5.379	-1.222	4.157	5.379	1.132	6.511	5.379	3.103	8.482
Nahwärme-Holzheizwerk	1.684	2.437	4.121	1.684	1.526	3.210	1.684	763	2.447
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1.585	2.443	4.027	1.585	1.529	3.114	1.585	765	2.349
Pellet-/Hackschnitzelkessel	588	2.361	2.949	588	1.479	2.067	588	739	1.327
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	561	2.367	2.928	561	1.482	2.043	561	741	1.302

Tabelle 48: Sensitivitätsanalyse: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom „ENEV 2009-Siedlung“

Daten	THG-Emissionen 638,8 g THG/kWh (t/a)			THG-Emissionen 400 g THG/kWh (t/a)			THG-Emissionen 200 g THG/kWh (t/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Fernwärme	1.726	2.112	3.838	1.726	1.322	3.049	1.726	661	2.387
Luft-Wasser-WP	1.610	2.112	3.721	1.008	1.322	2.330	504	661	1.165
Gas-Brennwertkessel	1.625	2.083	3.708	1.625	1.304	2.930	1.625	652	2.277
Luft-Wasser-WP m. S.	1.337	2.144	3.481	837	1.343	2.180	419	671	1.090
Gas-Brennwertkessel m. S.	1.366	2.088	3.454	1.366	1.307	2.673	1.366	654	2.019
dezentrale BHKW	1.374	1.781	3.155	1.374	1.328	2.702	1.374	949	2.323
Nahwärme-BHKW	1.732	1.174	2.905	1.732	1.243	2.975	1.732	1.301	3.033
Nahwärme-Holzheizwerk	536	2.169	2.705	536	1.358	1.894	536	679	1.215
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	455	2.174	2.629	455	1.361	1.816	455	681	1.135
Pellet-/Hackschnitzelkessel	168	2.139	2.308	168	1.339	1.508	168	670	838
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	145	2.144	2.289	145	1.343	1.487	145	671	816

Tabelle 49: Sensitivitätsanalyse: THG-Emissionen m. Vork. für die Wärme- und Stromversorgung der Siedlung bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Strom „Passivhaus-Siedlung“

Daten	THG-Emissionen 638,8 g THG/kWh (t/a)			THG-Emissionen 400 g THG/kWh (t/a)			THG-Emissionen 200 g THG/kWh (t/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Stromdirektheizungen	1.432	867	2.299	897	543	1.440	448	271	720
Stromdirektheizungen m. S.	912	883	1.795	571	553	1.124	285	276	562
Fernwärme	764	903	1.667	764	566	1.329	764	283	1.047
Gas-Brennwertkessel	676	867	1.542	676	543	1.218	676	271	947
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	585	867	1.452	366	543	909	183	271	454
kalte Nahwärme	512	915	1.427	320	573	894	160	287	447
Sole-Wasser-WP	512	867	1.379	320	543	863	160	271	432
Nahwärme-BHKW	782	554	1.336	782	549	1.331	782	544	1.326
Gas-Brennwertkessel m. S.	443	883	1.326	443	553	996	443	276	719
kalte Nahwärme m. S.	329	932	1.261	206	583	790	103	292	395
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	372	883	1.255	233	553	786	116	276	393
Sole-Wasser-WP m. S.	329	883	1.212	206	553	759	103	276	380
Nahwärme-Holzheizwerk	247	933	1.180	247	584	831	247	292	539
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	172	949	1.122	172	594	767	172	297	469
Pelletkessel/Kaminöfen	82	867	949	54	543	625	82	271	353
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	54	883	937	82	553	607	54	276	331

## Anhang G: Luftschadstoff-Emissionen

Tabelle 50: CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Staub Emissionen für Heizung, Warmwasser und Strom für den Energiestandard „unsanierter Gebäudebestand“

Daten	CO-Emissionen ohne Vorkette (t/a)			NO <sub>x</sub> -Emissionen ohne Vorkette (t/a)			Staub-Emissionen ohne Vorkette (t/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Luft-Wasser-WP	2,157	0,774	2,932	4,021	1,443	5,463	0,196	0,070	0,267
Luft-Wasser-WP m. S.	2,042	0,769	2,811	3,805	1,433	5,238	0,186	0,070	0,256
Gas-Brennwertkessel	1,569	0,792	2,361	1,085	1,476	2,561	0	0,072	0,072
Gas-Brennwertkessel m. S.	1,481	0,794	2,275	1,024	1,480	2,503	0	0,072	0,072
Fernwärme	2,239	0,799	3,038	5,502	1,490	6,992	0,143	0,073	0,216
dezentrale BHKW	1,606	0,063	1,669	1,528	-0,715	0,813	0	-0,059	-0,059
Nahwärme-BHKW	4,359	-0,793	3,567	6,589	-3,090	3,499	0	-0,197	-0,197
Nahwärme-Holzheizwerk	5,617	0,839	6,457	4,142	1,564	5,706	0,508	0,076	0,584
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	5,285	0,841	6,126	3,897	1,568	5,465	0,478	0,076	0,554
Pellet-/Hackschnitzelkessel	24,307	0,813	25,120	8,776	1,516	10,292	3,170	0,074	3,243
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	22,995	0,815	23,810	8,315	1,519	9,834	2,996	0,074	3,071

Tabelle 51: CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Staub Emissionen für Heizung, Warmwasser und Strom für den Energiestandard „EnEV 2009“

Daten	CO-Emissionen ohne Vorkette (t/a)			NO <sub>x</sub> -Emissionen ohne Vorkette (t/a)			Staub-Emissionen ohne Vorkette (t/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Fernwärme	0,758	0,727	1,486	1,863	1,355	3,219	0,048	0,066	0,115
Luft-Wasser-WP	0,554	0,727	1,282	1,033	1,355	2,388	0,050	0,066	0,117
Gas-Brennwertkessel	0,441	0,717	1,158	0,305	1,337	1,641	0	0,065	0,065
Luft-Wasser-WP m. S.	0,460	0,738	1,199	0,858	1,376	2,234	0,042	0,067	0,109
Gas-Brennwertkessel m. S.	0,370	0,719	1,089	0,256	1,340	1,596	0	0,065	0,065
dezentrale BHKW	0,425	0,571	0,996	0,405	0,884	1,289	0	0,038	0,038
Nahwärme-BHKW	1,457	0,305	1,762	2,225	0,135	2,360	0	-0,006	-0,006
Nahwärme-Holzheizwerk	1,789	0,747	2,536	1,319	1,392	2,711	0,162	0,068	0,230
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1,517	0,749	2,266	1,119	1,395	2,514	0,137	0,068	0,205
Pellet-/Hackschnitzelkessel	6,615	0,737	7,352	2,411	1,373	3,784	0,859	0,067	0,926
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	5,512	0,738	6,251	2,020	1,376	3,397	0,714	0,067	0,781

Tabelle 52: CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Staub Emissionen für Heizung, Warmwasser und Strom für den Energiestandard „Passivhaus“

Daten	CO-Emissionen ohne Vorkette (t/a)			NO <sub>x</sub> -Emissionen ohne Vorkette (t/a)			Staub-Emissionen ohne Vorkette (t/a)		
	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe	Wärme	Strom	Summe
Stromdirektheizungen	0,493	0,299	0,792	0,919	0,556	1,476	0,045	0,027	0,072
Stromdirektheizungen m. S.	0,314	0,304	0,618	0,585	0,567	1,152	0,029	0,028	0,056
Fernwärme	0,336	0,311	0,647	0,825	0,580	1,404	0,021	0,028	0,050
Gas-Brennwertkessel	0,183	0,299	0,482	0,127	0,556	0,683	0	0,027	0,027
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	0,201	0,299	0,500	0,375	0,556	0,932	0,018	0,027	0,045
kalte Nahwärme	0,176	0,315	0,491	0,328	0,588	0,916	0,016	0,029	0,045
Sole-Wasser-WP	0,176	0,299	0,475	0,328	0,556	0,885	0,016	0,027	0,043
Nahwärme-BHKW	0,474	0,151	0,626	0,540	0,111	0,651	0	0,00048	0,000
Gas-Brennwertkessel m. S.	0,120	0,304	0,424	0,083	0,567	0,650	0	0,028	0,028
kalte Nahwärme m. S.	0,113	0,321	0,434	0,211	0,598	0,809	0,010	0,029	0,039
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	0,128	0,304	0,432	0,239	0,567	0,805	0,012	0,028	0,039
Sole-Wasser-WP	0,176	0,299	0,475	0,328	0,556	0,885	0,016	0,027	0,043
Nahwärme-Holzheizwerk	0,787	0,321	1,109	0,580	0,599	1,179	0,071	0,029	0,100
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	0,549	0,327	0,876	0,405	0,609	1,014	0,049	0,030	0,079
Pelletkessel/Kaminöfen	3,442	0,299	3,740	0,984	0,556	1,540	0,382	0,027	0,409
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	2,258	0,304	2,562	0,648	0,567	1,215	0,251	0,028	0,278

## Anhang H: Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten, Jahresgesamtkosten

Tabelle 53: Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten, Jahresgesamtkosten für den Energiestandard „unsanierter Gebäudebestand“

Daten	kapitalgebundene Kosten (€)	Annuität kapitalgebundene Kosten (€/a)	Betriebsgebundene Kosten (€/a)	Verbrauchsgebundene Kosten (€/a)			Jahresgesamtkosten (€/a)
				Wärme	Strom	Summe	
Luft-Wasser-WP	10.628.494	683.321	34.230	1.718.334	882.434	2.600.769	3.318.320
Luft-Wasser-WP m. S.	12.898.333	880.400	34.230	1.626.222	876.730	2.502.952	3.417.582
Gas-Brennwertkessel	5.197.960	310.688	90.180	1.537.044	902.934	2.439.978	2.840.846
Gas-Brennwertkessel m. S.	7.467.800	507.767	90.180	1.450.900	905.036	2.355.936	2.953.883
Fernwärme	4.672.206	282.019	230.408	1.832.201	911.377	2.743.578	3.256.004
dezentrale BHKW	14.893.890	986.420	129.471	1.380.930	200.282	1.581.212	2.697.103
Nahwärme-BHKW	7.157.016	431.052	346.987	1.428.284	1.126.918	2.555.201	3.333.240
Nahwärme-Holzheizwerk	10.076.908	618.605	337.570	988.536	956.781	1.945.317	2.901.491
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	12.346.748	815.684	341.084	930.079	958.884	1.888.963	3.045.730
Pellet-/Hackschnitzelkessel	8.293.187	524.831	93.094	1.062.504	927.047	1.989.552	2.607.476
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	10.686.850	728.642	93.094	1.011.088	929.150	1.940.238	2.761.974



Tabelle 54: Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten, Jahresgesamtkosten für den Energiestandard „EnEV 2009“

Daten	kapitalgebundene Kosten (€)	Annuität kapitalgebundene Kosten (€/a)	Betriebsgebundene Kosten (€/a)	Verbrauchsgebundene Kosten (€/a)			Jahresgesamtkosten (€/a)
				Wärme	Strom	Summe	
Fernwärme	4.219.657	250.177	146.312	536.375	829.157	1.365.532	1.762.021
Luft-Wasser-WP	8.245.455	516.676	34.230	441.538	828.977	1.270.515	1.821.421
Gas-Brennwertkessel	4.831.971	284.937	85.100	431.579	817.666	1.249.244	1.619.281
Luft-Wasser-WP m. S.	10.515.295	713.755	34.230	366.666	841.850	1.208.516	1.956.501
Gas-Brennwertkessel m. S.	7.101.811	482.016	85.100	362.586	819.768	1.182.354	1.749.470
dezentrale BHKW	10.232.797	659.489	119.282	364.851	567.882	932.733	1.711.504
Nahwärme-BHKW	6.236.049	366.344	193.409	459.759	850.314	1.310.073	1.869.826
Nahwärme-Holzheizwerk	7.800.536	458.529	188.645	314.855	851.347	1.166.202	1.813.376
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	10.070.376	655.608	190.410	266.975	853.449	1.120.424	1.966.442
Pellet-/Hackschnitzelkessel	7.546.297	473.306	91.056	299.923	839.748	1.139.671	1.704.033
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	9.939.960	677.118	91.056	255.214	841.850	1.097.064	1.865.238

Tabelle 55: Investitionskosten, Annuitäten, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten, Jahresgesamtkosten für den Energiestandard „Passivhaus“

Daten	kapitalgebundene Kosten (€)	Annuität kapitalgebundene Kosten (€/a)	Betriebs-gebundene Kosten (€/a)	Verbrauchsgebundene Kosten (€/a)			Jahresgesamtkosten (€/a)
				Wärme	Strom	Summe	
Stromdirektheizungen	6.092.359	412.722	192.500	562.274	340.318	902.592	1.507.814
Stromdirektheizungen m. S.	8.362.199	609.801	192.500	357.887	346.666	704.553	1.506.854
Fernwärme	6.068.910	409.076	209.286	225.221	354.577	579.798	1.198.160
Gas-Brennwertkessel	6.043.433	407.283	158.700	179.385	340.318	519.703	1.085.686
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	10.794.142	666.133	109.240	160.384	340.318	500.702	1.276.075
kalte Nahwärme	10.068.178	684.367	117.575	140.363	359.392	499.756	1.301.697
Sole-Wasser-WP	10.175.024	622.571	109.240	140.363	340.318	480.681	1.212.492
Nahwärme-BHKW	7.913.505	512.972	238.306	207.637	347.815	555.452	1.306.730
Gas-Brennwertkessel m. S.	8.313.272	604.362	158.700	117.537	346.666	464.203	1.227.265
kalte Nahwärme m. S.	12.337.198	881.446	117.575	90.339	365.740	456.079	1.455.100
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	13.063.981	863.212	109.240	101.951	346.666	448.617	1.421.069
Sole-Wasser-WP m. S.	12.444.863	819.650	109.240	90.339	346.666	437.005	1.365.894
Nahwärme-Holzheizwerk	8.037.539	521.699	233.250	141.124	366.295	507.419	1.262.368
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	10.307.378	718.778	235.932	98.477	372.643	471.120	1.425.829
Pelletkessel/Kaminöfen	7.589.144	515.791	164.656	173.291	340.318	513.609	1.194.056
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	9.858.983	712.870	164.656	114.178	346.666	460.844	1.338.370

## Anhang I: Sensitivitätsanalyse verbrauchsgebundener Kosten

Tabelle 56: Verbrauchsgebundene Kosten und Jahresgesamtkosten mit einer Energiepreissteigerungsrate von 3 % p. a.

Daten	Verbrauchsgebundene Kosten mit Preissteigerung 3 % p. a. (€/a)			Jahresgesamtkosten m. Preissteigerung 3 %
	Wärme	Strom	Summe	p.a. (€/a)
<b>unsanierter Gebäudebestand</b>				
Luft-Wasser-WP	2.346.466	1.205.005	3.551.472	4.269.023
Luft-Wasser-WP m. S.	2.220.683	1.197.216	3.417.899	4.332.529
Gas-Brennwertkessel	2.098.905	1.232.999	3.331.904	3.732.772
Gas-Brennwertkessel m. S.	1.981.272	1.235.869	3.217.141	3.815.089
Fernwärme	2.501.956	1.244.528	3.746.484	4.258.910
dezentrale BHKW	1.885.725	457.949	2.343.673	3.459.565
Nahwärme-BHKW	1.950.388	1.941.462	3.891.850	4.669.889
Nahwärme-Holzheizwerk	1.349.892	1.306.530	2.656.422	3.612.596
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1.270.066	1.309.401	2.579.467	3.736.235
Pellet-/Hackschnitzelkessel	1.450.899	1.265.927	2.716.826	3.334.751
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	1.380.689	1.268.797	2.649.486	3.471.222
<b>EnEV 2009</b>				
Fernwärme	732.445	1.132.253	1.864.698	2.261.187
Luft-Wasser-WP	602.941	1.132.007	1.734.948	2.285.854
Gas-Brennwertkessel	589.341	1.116.561	1.705.902	2.075.939
Luft-Wasser-WP m. S.	500.700	1.149.586	1.650.285	2.398.270
Gas-Brennwertkessel m. S.	495.129	1.119.432	1.614.560	2.181.676
dezentrale BHKW	498.221	804.416	1.302.638	2.081.408
Nahwärme-BHKW	627.823	1.278.720	1.906.543	2.466.295
Nahwärme-Holzheizwerk	429.950	1.162.554	1.592.504	2.239.678
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	364.566	1.165.425	1.529.992	2.376.010
Pellet-/Hackschnitzelkessel	409.559	1.146.715	1.556.274	2.120.636
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	348.507	1.149.586	1.498.093	2.266.267
<b>Passivhaus</b>				
Stromdirektheizungen	767.812	464.720	1.232.532	1.837.754
Stromdirektheizungen m. S.	488.711	473.389	962.100	1.764.401
Fernwärme	307.550	484.192	791.741	1.410.104
Gas-Brennwertkessel	244.959	464.720	709.679	1.275.662
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	219.012	464.720	683.732	1.459.105
kalte Nahwärme	191.673	490.767	682.440	1.484.381
Sole-Wasser-WP	191.673	464.720	656.393	1.388.204
Nahwärme-BHKW	283.538	524.560	808.098	1.559.376
Gas-Brennwertkessel m. S.	160.502	473.389	633.891	1.396.953
kalte Nahwärme m. S.	123.362	499.436	622.797	1.621.818
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	139.219	473.389	612.607	1.585.059

Daten	Verbrauchsgebundene Kosten mit Preissteigerung 3 % p. a. (€/a)			Jahresgesamtkosten m. Preissteigerung 3 %
	Wärme	Strom	Summe	p.a. (€/a)
Sole-Wasser-WP m. S.	123.362	473.389	596.750	1.525.640
Nahwärme-Holzheizwerk	192.712	500.192	692.904	1.447.853
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	134.475	508.861	643.336	1.598.046
Pelletkessel/Kaminöfen	236.637	464.720	701.357	1.381.804
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	155.916	473.389	629.305	1.506.830

Tabelle 57: Verbrauchsgebundene Kosten und Jahresgesamtkosten mit einer Energiepreissteigerungsrate von 5 % p. a.

Daten	Verbrauchsgebundene Kosten mit Preissteigerung 5 % p. a. (€/a)			Jahresgesamtkosten m. Preissteigerung 5 %
	Wärme	Strom	Summe	p.a. (€/a)
<b>unsanierter Gebäudebestand</b>				
Luft-Wasser-WP	2.922.744	1.500.947	4.423.691	5.141.242
Luft-Wasser-WP m. S.	2.766.069	1.491.245	4.257.314	5.171.944
Gas-Brennwertkessel	2.614.383	1.535.815	4.150.199	4.551.067
Gas-Brennwertkessel m. S.	2.467.860	1.539.391	4.007.251	4.605.199
Fernwärme	3.116.421	1.550.176	4.666.597	5.179.023
dezentrale BHKW	2.348.847	694.344	3.043.191	4.159.083
Nahwärme-BHKW	2.429.391	2.688.762	5.118.154	5.896.192
Nahwärme-Holzheizwerk	1.681.417	1.627.406	3.308.822	4.264.997
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1.581.987	1.630.981	3.212.968	4.369.736
Pellet-/Hackschnitzelkessel	1.807.231	1.576.830	3.384.061	4.001.986
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	1.719.777	1.580.406	3.300.183	4.121.920
<b>EnEV 2009</b>				
Fernwärme	912.329	1.410.328	2.322.656	2.719.145
Luft-Wasser-WP	751.020	1.410.021	2.161.041	2.711.946
Gas-Brennwertkessel	734.079	1.390.781	2.124.861	2.494.898
Luft-Wasser-WP m. S.	623.668	1.431.917	2.055.585	2.803.570
Gas-Brennwertkessel m. S.	616.729	1.394.357	2.011.086	2.578.202
dezentrale BHKW	620.581	1.021.424	1.642.005	2.420.776
Nahwärme-BHKW	782.012	1.671.759	2.453.772	3.013.524
Nahwärme-Holzheizwerk	535.543	1.448.071	1.983.613	2.630.787
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	454.102	1.451.646	1.905.748	2.751.766
Pellet-/Hackschnitzelkessel	510.144	1.428.341	1.938.485	2.502.847
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	434.098	1.431.917	1.866.015	2.634.189
<b>Passivhaus</b>				
Stromdirektheizungen	956.382	578.852	1.535.234	2.140.456

Daten	Verbrauchsgebundene Kosten mit Preissteigerung 5 % p. a. (€/a)			Jahresgesamtkosten m. Preissteigerung 5 %
	Wärme	Strom	Summe	p.a. (€/a)
Stromdirektheizungen m. S.	608.736	589.650	1.198.386	2.000.687
Fernwärme	383.082	603.106	986.188	1.604.551
Gas-Brennwertkessel	305.119	578.852	883.972	1.449.955
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	272.800	578.852	851.653	1.627.026
kalte Nahwärme	238.746	611.296	850.043	1.651.984
Sole-Wasser-WP	238.746	578.852	817.599	1.549.410
Nahwärme-BHKW	353.173	686.713	1.039.887	1.791.165
Gas-Brennwertkessel m. S.	199.920	589.650	789.570	1.552.633
kalte Nahwärme m. S.	153.658	622.094	775.752	1.774.773
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	173.410	589.650	763.060	1.735.511
Sole-Wasser-WP m. S.	153.658	589.650	743.308	1.672.198
Nahwärme-Holzheizwerk	240.041	623.037	863.077	1.618.026
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	167.501	633.834	801.335	1.756.045
Pelletkessel/Kaminöfen	294.753	578.852	873.606	1.554.053
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	194.208	589.650	783.858	1.661.384

Tabelle 58: Verbrauchsgebundene Kosten und Jahresgesamtkosten mit einer Energiepreissteigerungsrate von 7 % p. a.

Daten	Verbrauchsgebundene Kosten mit Preissteigerung 7 % p. a. (€/a)			Jahresgesamtkosten m. Preissteigerung 7 %
	Wärme	Strom	Summe	p.a. (€/a)
<b>unsaniertes Gebäudebestand</b>				
Luft-Wasser-WP	3.671.113	1.885.265	5.556.378	6.273.929
Luft-Wasser-WP m. S.	3.474.322	1.873.079	5.347.400	6.262.030
Gas-Brennwertkessel	3.283.797	1.929.061	5.212.858	5.613.727
Gas-Brennwertkessel m. S.	3.099.756	1.933.553	5.033.309	5.631.256
Fernwärme	3.914.382	1.947.099	5.861.480	6.373.907
dezentrale BHKW	2.950.270	1.001.334	3.951.604	5.067.496
Nahwärme-BHKW	3.051.438	3.659.227	6.710.665	7.488.704
Nahwärme-Holzheizwerk	2.111.944	2.044.103	4.156.047	5.112.222
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1.987.055	2.048.595	4.035.650	5.192.417
Pellet-/Hackschnitzelkessel	2.269.973	1.980.578	4.250.551	4.868.476
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	2.160.127	1.985.069	4.145.196	4.966.933
<b>EnEV 2009</b>				
Fernwärme	1.145.931	1.771.442	2.917.373	3.313.862
Luft-Wasser-WP	943.319	1.771.057	2.714.376	3.265.282
Gas-Brennwertkessel	922.041	1.746.891	2.668.932	3.038.969

Daten	Verbrauchsgebundene Kosten mit Preissteigerung 7 % p. a. (€/a)			Jahresgesamtkosten m. Preissteigerung 7 %
	Wärme	Strom	Summe	p.a. (€/a)
Luft-Wasser-WP m. S.	783.359	1.798.560	2.581.918	3.329.903
Gas-Brennwertkessel m. S.	774.643	1.751.382	2.526.026	3.093.142
dezentrale BHKW	779.482	1.303.236	2.082.718	2.861.488
Nahwärme-BHKW	982.247	2.182.171	3.164.418	3.724.170
Nahwärme-Holzheizwerk	672.669	1.818.850	2.491.518	3.138.692
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	570.375	1.823.341	2.393.715	3.239.733
Pellet-/Hackschnitzelkessel	640.766	1.794.068	2.434.834	2.999.197
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	545.250	1.798.560	2.343.809	3.111.983
<b>Passivhaus</b>				
Stromdirektheizungen	1.201.264	727.068	1.928.331	2.533.554
Stromdirektheizungen m. S.	764.603	740.630	1.505.232	2.307.534
Fernwärme	481.170	757.532	1.238.702	1.857.064
Gas-Brennwertkessel	383.245	727.068	1.110.313	1.676.296
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	342.651	727.068	1.069.719	1.845.092
kalte Nahwärme	299.877	767.819	1.067.696	1.869.638
Sole-Wasser-WP	299.877	727.068	1.026.945	1.758.756
Nahwärme-BHKW	443.604	897.291	1.340.894	2.092.172
Gas-Brennwertkessel m. S.	251.110	740.630	991.740	1.754.802
kalte Nahwärme m. S.	193.003	781.381	974.384	1.973.404
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	217.812	740.630	958.441	1.930.893
Sole-Wasser-WP m. S.	193.003	740.630	933.633	1.862.523
Nahwärme-Holzheizwerk	301.503	782.565	1.084.069	1.839.017
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	210.390	796.127	1.006.518	1.961.227
Pelletkessel/Kaminöfen	370.225	727.068	1.097.293	1.777.740
Pelletkessel/Kaminöfen m. S.	243.935	740.630	984.565	1.862.091

## Anhang J: Externe Kosten

Tabelle 59: Externe Kosten (€/a) für Heizung, Warmwasser und Strom

Daten	Externe Kosten (€/a)		
	Wärme	Strom	Summe
<b>unsanierter Gebäudebestand</b>			
Luft-Wasser-WP	764.910	274.441	1.039.351
Luft-Wasser-WP m. S.	723.906	272.667	996.574
Gas-Brennwertkessel	526.195	280.817	807.012
Gas-Brennwertkessel m. S.	496.704	281.471	778.175
Fernwärme	775.110	283.443	1.058.553
dezentrale BHKW	472.751	8.599	481.349
Nahwärme-BHKW	488.962	-307.481	181.481
Nahwärme-Holzheizwerk	505.997	297.564	803.560
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	476.075	298.217	774.292
Pellet-/Hackschnitzelkessel	517.265	288.316	805.581
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	490.730	288.970	779.700
<b>EnEV 2009-Siedlung</b>			
Fernwärme	226.913	257.872	484.785
Luft-Wasser-WP	196.549	257.816	454.365
Gas-Brennwertkessel	147.748	254.298	402.046
Luft-Wasser-WP m. S.	163.220	261.819	425.039
Gas-Brennwertkessel m. S.	124.129	254.952	379.080
dezentrale BHKW	124.904	199.629	324.533
Nahwärme-BHKW	157.395	100.873	258.268
Nahwärme-Holzheizwerk	161.163	264.773	425.936
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	136.655	265.427	402.082
Pellet-/Hackschnitzelkessel	143.286	261.166	404.451
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	120.634	261.819	382.454
<b>Passivhaus-Siedlung</b>			
Stromdirektheizungen	174.870	105.841	280.710
Stromdirektheizungen m. S.	111.305	107.815	219.119
Fernwärme	95.279	110.275	205.555
Gas-Brennwertkessel	61.411	105.841	167.252
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	71.394	105.841	177.235
kalte Nahwärme	62.482	111.773	174.255
Sole-Wasser-WP	62.482	105.841	168.323
Nahwärme-BHKW	71.083	50.873	121.956
Gas-Brennwertkessel m. S.	40.238	107.815	148.053
kalte Nahwärme m. S.	40.214	113.747	153.961
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	45.383	107.815	153.198
Sole-Wasser-WP m. S.	40.214	107.815	148.029
Nahwärme-Holzheizwerk	71.705	113.919	185.624

Daten	Externe Kosten (€/a)		
	Wärme	Strom	Summe
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	49.934	115.894	165.828
Pelletkessel/Kaminöfen m. W-Tasche	63.842	105.841	169.682
Pelletkessel/Kaminöfen m. W-Tasche m. S.	42.084	107.815	149.899

Tabelle 60: Vergleich der Jahresgesamtkosten (€/a) zu den Jahresgesamtkosten mit internalisierten Umweltschäden

Daten	Jahresgesamtkosten (€/a)	Jahresgesamtkosten + externe Kosten (€/a)	Anteil externe Kosten an Jahresgesamtkosten ohne externe Kosten (€/a)
<b>unsanierter Gebäudebestand</b>			
Luft-Wasser-WP	3.318.320	4.357.671	31 %
Luft-Wasser-WP m. S.	3.417.582	4.414.156	29 %
Gas-Brennwertkessel	2.840.846	3.647.858	28 %
Gas-Brennwertkessel m. S.	2.953.883	3.732.059	26 %
Fernwärme	3.256.004	4.314.557	33 %
dezentrale BHKW	2.697.103	3.178.453	18 %
Nahwärme-BHKW	3.333.240	3.514.721	5 %
Nahwärme-Holzheizwerk	2.901.491	3.705.052	28 %
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	3.045.730	3.820.022	25 %
Pellet-/Hackschnitzelkessel	2.607.476	3.413.058	31 %
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	2.761.974	3.541.674	28 %
<b>EnEV 2009-Siedlung</b>			
Fernwärme	1.762.021	2.246.806	28 %
Luft-Wasser-WP	1.821.421	2.275.786	25 %
Gas-Brennwertkessel	1.619.281	2.021.327	25 %
Luft-Wasser-WP m. S.	1.956.501	2.381.540	22 %
Gas-Brennwertkessel m. S.	1.749.470	2.128.551	22 %
dezentrale BHKW	1.711.504	2.036.036	19 %
Nahwärme-BHKW	1.869.826	2.128.094	14 %
Nahwärme-Holzheizwerk	1.813.376	2.239.312	23 %
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1.966.442	2.368.524	20 %
Pellet-/Hackschnitzelkessel	1.704.033	2.108.484	24 %
Pellet-/Hackschnitzelkessel m. S.	1.865.238	2.247.692	21 %
<b>Passivhaus-Siedlung</b>			
Stromdirektheizungen	1.507.814	1.788.525	19 %
Stromdirektheizungen m. S.	1.506.854	1.725.973	15 %
Fernwärme	1.198.160	1.403.715	17 %
Gas-Brennwertkessel	1.085.686	1.252.938	15 %
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP	1.276.075	1.453.310	14 %



Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards

Daten	Jahresgesamtkosten (€/a)	Jahresgesamtkosten + externe Kosten (€/a)	Anteil externe Kosten an Jahresgesamtkosten ohne externe Kosten (€/a)
kalte Nahwärme	1.301.697	1.475.952	13 %
Sole-Wasser-WP	1.212.492	1.380.815	14 %
Nahwärme-BHKW	1.306.730	1.428.686	9 %
Gas-Brennwertkessel m. S.	1.227.265	1.375.318	12 %
kalte Nahwärme m. S.	1.455.100	1.609.060	11 %
Luft-Luft-/Sole-Wasser-WP m. S.	1.421.069	1.574.266	11 %
Sole-Wasser-WP m. S.	1.365.894	1.513.923	11 %
Nahwärme-Holzheizwerk	1.262.368	1.447.991	15 %
Nahwärme-Holzheizwerk m. S.	1.425.829	1.591.657	12 %
Pelletkessel/Kaminöfen m. W-Tasche	1.194.056	1.363.738	14 %
Pelletkessel/Kaminöfen m. W-Tasche m. S.	1.338.370	1.488.269	11 %