

Wirtschaftliche und energetische Betrachtung von Wärmeversorgungssystemen am Beispiel einer Neubausiedlung in Hamburg

BACHELOR-ARBEIT

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Science
Studiengang Umwelttechnik

Vorgelegt von Ev Barckhan
Matrikelnummer: 2019224

Hamburg, den 30. April 2014

1. Gutachter: Prof. Dr. Heiner Kühle (HAW-Hamburg)
2. Gutachter: Dipl. Ing. (FH) Holger Krämer (sumbi INGENIEURE)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in der Firma
sumbi INGENIEURE Energieberatungs- und Planungsgesellschaft mbH.

Zusammenfassung

In einer Hamburger Neubausiedlung werden 120 Wohneinheiten in unterschiedlichen Gebäudetypen mit dem Effizienzhaus-Standard-40 geplant. Im Rahmen dieser Bachelor-Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Wärmeversorgungssysteme auf den Primärenergiebedarf, die Treibhausgas-Emissionen sowie die Investitions- und Vollkosten der Siedlung haben. Dabei wird die Versorgung über Brennwertkessel, Wärmepumpen und zwei verschiedene Blockheizkraftwerke miteinander verglichen. Ziel ist es, die hinsichtlich der energetischen und wirtschaftlichen Eigenschaften zu empfehlende Wärmeversorgungsvariante herauszuarbeiten.

Im Ergebnis wird dabei deutlich, dass die Wärmepumpen-Variante zwar den niedrigsten Energiebedarf und die geringsten Treibhausgas-Emissionen aufweist, gleichzeitig jedoch die höchsten Investitions- und Vollkosten hat. Aus finanzieller Sicht ist in der untersuchten Neubausiedlung die Brennwert-Variante die zu empfehlende Wärmeversorgung. Durch den Vergleich mit dem von sumbi erstellten Gutachten für ein ähnliches Projekt aus dem Jahr 2010 zeigt sich, dass der Bau von Mehrfamilienhäusern gegenüber dem Bau von Einfamilienhäusern zu bevorzugen ist, da wenige große Anlagen benötigt werden, wodurch die Investitionskosten gesenkt werden. Darüber hinaus kann anhand des 2010er Projekts festgestellt werden, dass mit steigender Gebäudeeffizienz der Bau von Brennwerttechnik zunehmend finanziell attraktiv wird.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Das Bauvorhaben	4
3 Grundlagen	6
3.1 Rechtsgrundlagen	6
3.1.1 Energieeinsparungsgesetz	6
3.1.2 Energieeinsparverordnung	7
3.1.3 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz	8
3.1.4 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	8
3.2 Effizienzhaus-Standards.....	9
3.2.1 KfW-Effizienzhaus	9
3.2.2 IFB-Effizienzhaus	10
3.3 Software	10
3.4 Gebäudemodell	11
3.4.1 Gebäudehülle und Bauteile	11
3.4.2 Anlagentechnik	13
3.4.2.1 Brennwerttechnik	14
3.4.2.2 Wärmepumpe	14
3.4.2.3 Blockheizkraftwerk.....	14
3.4.2.4 enercity contracting.....	15
4 Berechnungen	18
4.1 Energiebedarfe und Treibhausgas-Emissionen	18
4.2 Wirtschaftlichkeit.....	22
4.2.1 Investitionskosten.....	23
4.2.2 Kosten für das Nahwärmenetz	25
4.2.3 Fördermittel.....	26
4.2.4 Vollkosten	27
4.2.5 Ermittlung der Einspeisevergütung.....	28
4.2.6 Szenarien	29
4.3 Strombedarf.....	30
5 Ergebnisse	31
5.1 Erreichter Effizienzhaus-Standard	31

5.1.1	Vergleich der Anforderungen	32
5.2	Energiebedarf	33
5.3	Treibhausgas-Emissionen	35
5.4	Investitionskosten	36
5.5	Vollkosten.....	37
5.5.1	Grund- und Arbeitspreis	38
5.5.2	Zusammensetzung der Vollkosten.....	40
5.5.3	Vollkosten je Wohneinheit	41
5.5.4	Spezifische Wärmeerzeugungskosten	42
5.6	Szenarien	45
5.6.1	Szenario I.....	45
5.6.2	Szenario II	46
5.7	Bewertung des Strombedarfes	47
5.8	Zusammenfassung	48
6	Uhlenhorst 12.....	49
6.1	Das Bauvorhaben Uhlenhorst 12.....	49
6.2	Vergleich der beiden Bauvorhaben	50
7	Fazit	54
	Literaturverzeichnis.....	56
	Anhang	61
	Abbildungsverzeichnis.....	62
	Tabellenverzeichnis.....	63
A	Gebäudetypen.....	64
A.1	Heizwärme- & Warmwasserwärmebedarf	66
A.2	Spezifischer Transmissionswärmeverlust.....	67
A.3	Jahres-Primärenergiebedarf	68
B	Bauteilaufbauten.....	71
C	Auslegung des Nahwärmenetzes	73
D	Hottgenroth-Berechnung	76

Abkürzungsverzeichnis

A_N	Nutzfläche
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BHKW _e	BHKW-Variante auf Basis der Zahlen von <u>enercity</u> contracting (in Diagrammen auch BHKW(e))
BHKW _s	für <u>sumbi</u> berechnete BHKW-Variante (oder BHKW(s))
B-Plan	Bebauungsplan
BV	Bauvorhaben
DH	Doppelhaus
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien - Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich - Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
EH	Effizienzhaus
EnEG	Gesetz zur Einsparung von Energien in Gebäuden - Energieeinsparungsgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
Gesamtenergieverbrauch	Bruttoendenergieverbrauch, mit allen Energieprodukte (Wärme, Strom, Kraft), in allen Sektoren (Wohnen, Industrie, Gewerbe usw.), sowie die bei der Verteilung und Übertragung auftretenden Elektrizitäts- und Wärmeverluste (Richtlinie 2009/28/EG, Artikel 2, Absatz f).
H_T	Spezifischer Transmissionswärmeverlust [$W/(m^2 \cdot K)$]
ICPP	Intergovernmental Panel on Climate Change
IFB	Investitions- und Förderbank (Hamburg)
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien

Abkürzungsverzeichnis

IRENA.....	International Renewable Energy Agency
KfW.....	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK.....	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG.....	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
MFH.....	Mehrfamilienhaus
PEF.....	Primärenergiefaktor
RH.....	Reihenhaus
RLT-Anlage.....	Raumlufttechnische-Anlage
Q_P	Jahres-Primärenergiebedarf [kWh/(m ² ·a)]
WE.....	Wohneinheit
WK.....	Wohnungskreditanstalt (Hamburg)
WP.....	Wärmepumpe
WRG.....	Wärmerückgewinnung
WW.....	Warmwasser

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Primärenergieverbrauch im Jahr 2013: Anteile in Prozent (Vorjahreswert in Klammern) (AGEB, 2014)	1
Abbildung 1.2 Vergleich der Anteile, die Erneuerbare Energien am Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2011 in ihrem Land haben anhand einiger ausgewählter europäischer Länder (IRENA, 2011)	2
Abbildung 3.1 Diese geordnete Jahresdauerlinie hat enercity contracting für die Neubausiedlung ermittelt (enercity contracting, 2014)	17
Abbildung 4.1 In diesem Organigramm sieht man, welche Werte in die Ermittlung der Treibhausgas-Emissionen, dem End- und dem Primärenergiebedarf einfließen. Einige Berechnungsschritte (die blauen Kästen) sind bei allen Varianten ähnlich. Die zentrale Variante unterscheidet sich in mehreren Schritten von den dezentralen Varianten (eigene Abbildung)	19
Abbildung 4.2 Zur Bewertung der Wärmeerzeuger werden die Investitionskosten und die Vollkosten miteinander verglichen. Die Höhe der Vollkosten hängen neben anderen Faktoren auch von den Investitionskosten ab (eigene Abbildung).....	22
Abbildung 4.3 Die Anlagenkosten beinhalten alle Kosten, die innerhalb der Gebäude anfällt (grüner Bereich), die Anschlusskosten sind die anfallenden Kosten, beim Anschluss an das Netz (rot) und die Erschließungskosten fallen bei dem Bau des Netzes und gegebenenfalls der damit zusammenhängenden Anlagentechnik an (blau; eigene Abbildung).....	23
Abbildung 4.4 Unterschiede im Anschluss von Reihenhäusern an das Nahwärmenetz: rot: enercity contracting (nachgebildet), grün: sumbi	26
Abbildung 5.1 Vergleich des Primärenergiebedarfs, bei den BHKW-Varianten kann man den produzierten Strom gegenrechnen	34
Abbildung 5.2 Graphische Darstellung der Treibhausgas-Emissionen. Beim BHKW wird die Gutschrift der Stromproduktion als hellblaue Säule dargestellt.	36
Abbildung 5.3 Darstellung der Investitionskosten unterteilt in die Kostentypen Anlagen-, Anschluss- und Erschließungskosten	37
Abbildung 5.4 Übersicht der von den einzelnen Wohnungen zu zahlenden Grundpreise	39
Abbildung 5.5 Darstellung der Preise, die die Kilowattstunde Strom, Gas oder Wärme den Verbraucher kostet (e.on, 2014; Vattenfall, 2014, sumbi, 2014; enercity contracting, 2014).....	40
Abbildung 5.6 Vergleich der Vollkosten aufgegliedert in ihre Bestandteile. Die Energieversorgungskosten werden in Wärme- und Grundkosten aufgeteilt	41

Abbildung 5.7 Die jährlich anfallenden Energiekosten je Wohnung wurden pauschal auf alle Wohnungen gerechnet, unabhängig vom Gebäudetyp oder Wohnungsgröße. Die Kindertagesstätte gilt hier ebenfalls als Wohnung..... 42

Abbildung 5.8 In den spezifischen Wärmeerzeugungskosten werden alle jährlich anfallenden Kosten (inklusive Kapitalkosten, ungleich dem Arbeitspreis aus Kapitel 4.2.4) durch die benötigte Wärme geteilt 43

Abbildung 5.9 Im ersten Szenario steigen die Brennstoffkosten um vier Prozent je Jahr..... 45

Abbildung 5.10 Die Brennstoffkosten werden im zweiten Szenario jedes Jahr um sechs Prozent teurer 46

Abbildung 5.11 Gegenüberstellung der abgeschätzten Stromnachfrage und der durch die BHKW produzierten Strommengen (die Säulen des produzierten Stroms sind durch die rote Umrandung hervorgehoben) 47

Abbildung 6.1 Vergleich der Heizwärmebedarfe von Reihen- und Mehrfamilienhäusern der beiden Bauvorhaben. Die Werte wurden je Gebäudetyp gemittelt 50

Abbildung 6.2 Vergleich der beiden Bauvorhaben anhand der gemittelten Heizwärmebedarfe der gesamten Siedlung je Quadratmeter Nutzfläche 51

Abbildung 6.3 Vergleich der gemittelten Heizwärmebedarfe je m² Nutzfläche der verschiedenen Gebäudetypen anhand der in dieser Bachelor-Arbeit betrachteten Neubausiedlung ... 51

Abbildung 6.4 Graphische Darstellung der spezifischen Wärmeerzeugungskosten aus dem Projekt Uhlenhorst (sumbi, 2010) 53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Übersicht über die im Baugebiet geplanten Gebäudetypen sowie ihrer Anzahl (Begründung L, 2013 S. 41)	4
Tabelle 3.1 Übersicht über den KWK-Zuschlag (KWKG, 2013, §7)	9
Tabelle 3.2 Übersicht der KfW-Anforderungen an die Kennwerte der Effizienzhäuser unter EnEV 2009 (KfW, 2013 S. 2)	10
Tabelle 3.3 Übersicht der getroffenen Annahmen bezüglich der Wohnfläche und der Anzahl der Voll- und Nichtvollgeschosse je Gebäudetyp.....	12
Tabelle 3.4 Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile nach EnEV 2009 (EnEV, 2009, Anlage 1, Tabelle 1), beim Passivhaus (target GmbH, 2009 S. 3, Kap. Bauphysik Teil 1) und der Bauteilen, die für die Gebäudehülle ausgewählt wurden..	13
Tabelle 3.5 Von enercity contracting abgeschätzte Arbeits- und Grundpreise sowie Anschlusskostenbeiträge (enercity contracting, 2014). Letzteres entspricht dem Punkt „Anschlusskosten“, welche wiederum die gesamten Investitionskosten dieser Variante sind, da für die Hausbesitzer keine weiteren Kosten anfallen (vgl. Kapitel 4.2.1).....	16
Tabelle 4.1 Übersicht der CO ₂ -Äquivalente verschiedener Brennstoffe (kea bw). Die Faktoren für biogene Stoffe soll verdeutlichen, wie viele CO ₂ -Äquivalente eingespart werden können, bei der Nutzung eines anderen Brennstoffes	21
Tabelle 4.2 Die Wärmepumpenvariante hat weder Anschluss- noch Erschließungskosten, während sich die Erschließungskosten bei der BHKW- und der Brennwertkessel-Variante aus ganz unterschiedlichen Posten zusammensetzen.....	23
Tabelle 4.3 Die Szenarien unterscheiden sich in Höhe der Brennstoffpreissteigerung	29
Tabelle 4.4 Getroffene Annahmen bezüglich des Strombedarfes der raumluftechnischen Anlage (IFB, 2014a S. 12)	30
Tabelle 5.1 Übersicht, welche Versorgungsvariante den Grenzwert des Jahres- Primärenergiebedarfes der Effizienzhaus-Standards einhalten. Beim BHKW werden drei Varianten mit unterschiedlichem Primärenergiefaktor betrachtet.....	31
Tabelle 5.2 Vergleich der gemittelten Grenzwerte für den Jahres-Primärenergiefaktor der Effizienzhäuser unter EnEV 2009 mit den gemittelten erreichten Werten der Gebäude der Siedlung.....	32
Tabelle 5.3 Vergleich der Jahres-Primärenergiebedarfe der Wohngebäude der gesamten Siedlung (ohne Kindertagesstätte) anhand der erlaubten Grenzwerten nach den verschiedenen EnEV und dem Effizienzhaus-Standards	33
Tabelle 5.4 Vergleich der Varianten mit der Referenzvariante Brennwertkessel bezüglich des Primärenergiebedarfes	34

Tabelle 5.5 Vergleich der Endenergiebedarfe der einzelnen Varianten mit der Brennwert-Variante	35
Tabelle 5.6 Vergleich der Emissionen in Bezug auf die Brennwertkessel-Variante.....	36
Tabelle 5.7 Vergleich des Grundpreises je Wohneinheit mit der Referenzvariante (e.on, 2014; Vattenfall, 2014, sumbi, 2014; enercity contracting, 2014).....	38
Tabelle 5.8 Vergleich der Arbeitspreise je Kilowattstunde mit der Brennwertkessel-Variante.....	39
Tabelle 5.9 Relativer Vergleich der einzelnen Bestandteile der Vollkosten zur Referenzvariante Brennwertkessel. Es werden die Summen der für die gesamte Siedlung anfallenden Kosten verglichen	40
Tabelle 5.10 Vergleich der Wärmeerzeugungskosten mit der Referenzvariante	43
Tabelle 5.11 Vergleich spezifischen Wärmeerzeugungskosten der BHKW(s)-25%-Varianten vor und nach der Anpassung der Trassenlänge des Nahwärmenetzes(der Gewinn beim BHKW(s) beträgt 20%)	44
Tabelle 5.12 Übersicht, welche Variante in welcher Kategorie gut beziehungsweise nicht so gut abgeschnitten hat (das BHKW wird nur mit Stromgutschrift betrachtet, die Variante enercity wird hier nicht bewertet)	48
Tabelle 6.1 Übersicht über die Wärmebedarfe und die Heizlast der beiden betrachteten Siedlungen samt Nichtwohngebäude	52

„WIR SIND BEIM UMWELTSCHUTZ ALSO AUCH MAL
WIEDER NUR DER GEFÜHLTE WELTMEISTER, SO WIE
BEIM DEUTSCHEN FUSSBALLSOMMERMÄRCHEN.“

aus dem Vorwort von Volker Quaschnings „Mülltrenner, Müsliesser und Klimaschützer“

1 Einleitung

In Deutschland hat sich in den letzten Jahrzehnten das Umweltbewusstsein stark verändert. In den Medien ist regelmäßig die Sprache vom Klimawandel und erst vor kurzem wurde ein neuer ICPP-Bericht veröffentlicht, der ermahnt, dass die Klimaerwärmung in Grenzen gehalten werden muss, sofern sich die Umwelt nicht drastisch verändern soll (FAZ, 2014).

Ein Werkzeug gegen den Klimawandel und für mehr Klimaschutz ist die Energiewende. In den Medien hat sich die Energiewende primär zu einer Stromwende entwickelt, deren Fokus auf der Umstellung der Stromerzeugung liegt. Für das Jahr 2013 wird geschätzt, dass der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung 23,4 Prozent beträgt (Bundesregierung, 2014).

Ein Energiesektor, der von den Medien eher stiefmütterlich behandelt wird, ist die Wärmeversorgung. Was den wenigsten Menschen bewusst ist: Neben den Zielen der Bundesregierung bezüglich des Anteils erneuerbarer Energien im Stromsektor gibt es auch Ziele für die Anteile an der Erzeugung von Wärme sowie vom gesamten Energiebedarfs. Die Grundlage dafür sind die 20-20-20-Ziele der EU. Denen zufolge sollen:

- entsprechend dem Kyoto-Protokoll die Treibhausgasemissionen um 20 Prozent gegenüber 1990 reduziert (Richtlinie 2009/28/EG, Begründung Abs.1; BMUB, 2013),
- die Energieeffizienz um 20 Prozent gesteigert (Richtlinie 2009/28/EG, Begründung Abs. 17) und
- der Anteil erneuerbarer Energien auf 20 Prozent des Bruttoendenergieverbrauchs erhöht

werden (Richtlinie 2009/28/EG, Art. 3, Abs. 1).

Das von der EU für Deutschland festgelegte Ziel lautet, bis 2020 einen Anteil von mindestens 18 Prozent am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen (Richtlinie 2009/28/EG, Anhang I, S. L140/46). Der Gesamtenergieverbrauch beinhaltet dabei die drei Bereiche Strom, Wärme und Kraft.

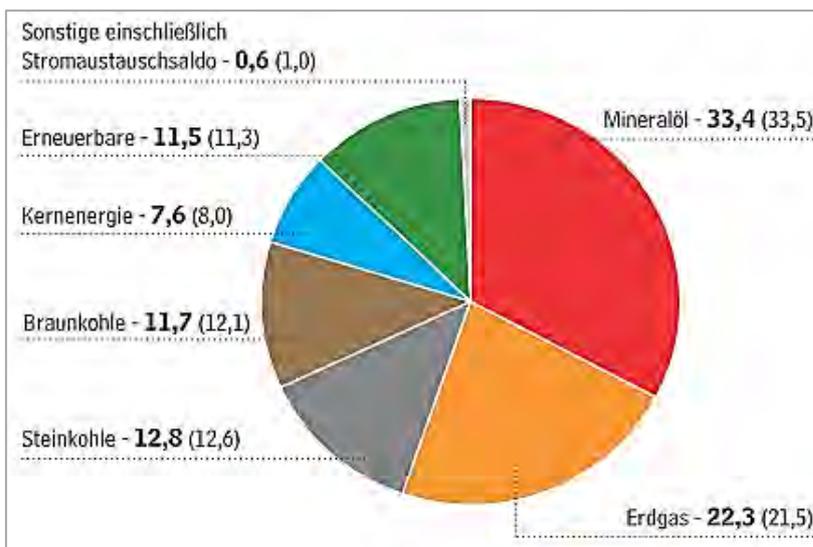


Abbildung 1.1 Primärenergieverbrauch im Jahr 2013: Anteile in Prozent (Vorjahreswert in Klammern) (AGEB, 2014)

Im Jahr 2013 lag der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch in Deutschland bei 11,5 Prozent (vgl. Abbildung 1.1). Im europäischen Vergleich liegt Deutschland damit eher im Mittel-

feld (vgl. Abbildung 1.2). Man darf zwar nicht außer Acht lassen, dass jedes Land andere Umweltbedingungen hat und die zur Verfügung stehende Fläche sowie der absolut zu deckende Gesamtenergiebedarf sehr unterschiedlich ist, doch zeigen diese Zahlen, dass in Deutschland der Anteil an erneuerbaren Energien am Gesamtenergiebedarf nicht so hoch ist, wie die Medien oftmals durch neue Spitzenwerte in der erneuerbaren Stromerzeugung suggerieren. Von 100 Prozent erneuerbare Energien im Gesamtverbrauch und dem Titel „Europameister“ ist Deutschland noch ein ganzes Stück entfernt.

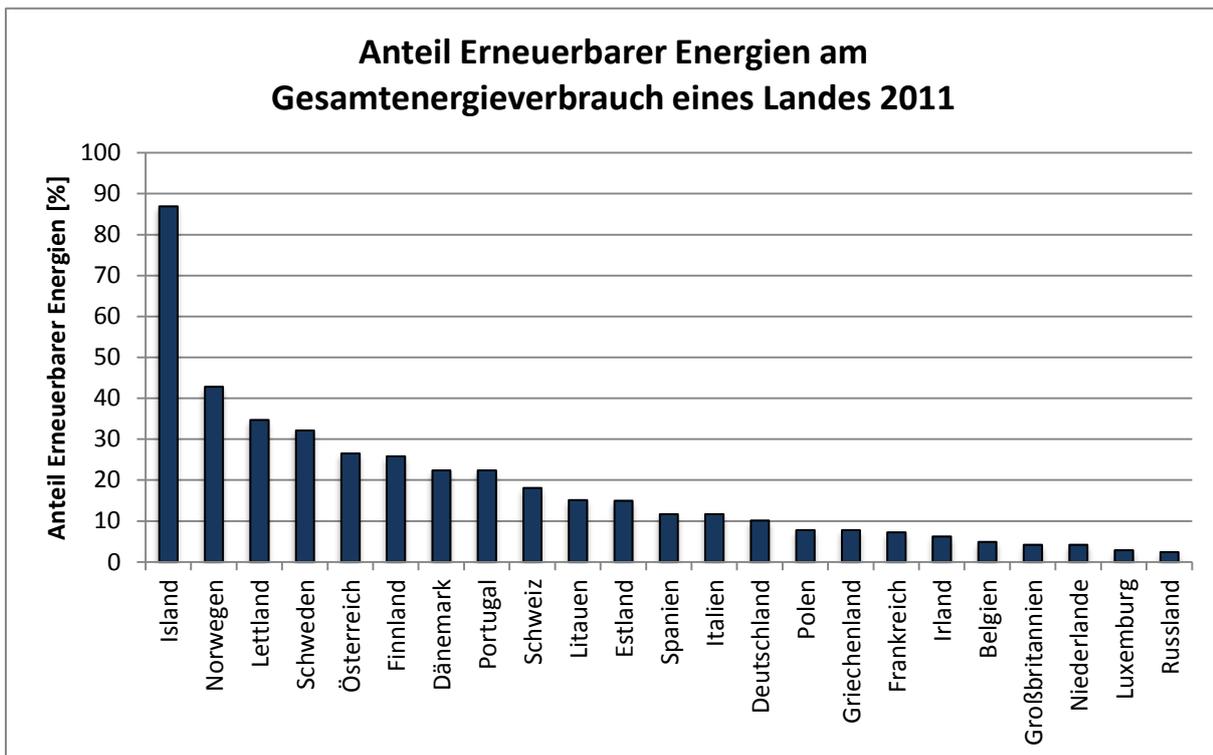


Abbildung 1.2 Vergleich der Anteile, die Erneuerbare Energien am Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2011 in ihrem Land haben anhand einiger ausgewählter europäischer Länder (IRENA, 2011)

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung liegt zurzeit bei elf Prozent. Von den genannten elf Prozent werden 90 Prozent mittels Biomasse erzeugt. Solarthermie und Umweltwärme haben einen Anteil von lediglich einem Prozent an der Wärmebereitstellung (Heup, 2014 S. 68).

Mit der Kampagne „Die Hauswende“ möchte die große Koalition die Aufmerksamkeit auf den Gebäude- und Wärmesektor lenken. Sie richtet sich insbesondere an die Besitzer von Ein- und Zweifamilienhäusern und durch gezielte Informationen zu diesem Thema soll die Sanierungsrate gesteigert werden (geea, 2014).

Mehr als 75 Prozent der Heizungsanlagen im deutschen Gebäudebestand entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik, da sie älter als zehn Jahre sind (Agentur für Erneuerbare Energie e.V., 2013). Durch die Modernisierung der Anlagentechnik und die Nutzung von erneuerbaren Energien lassen sich sowohl der Energiebedarf an fossilen Energieträgern als auch die Emission von Treibhausgasen reduzieren.

Bislang dominieren die fossilen Energieträger Heizöl und Gas bei der Wärmeerzeugung im Gebäudebestand. Der Anteil des Gasverbrauchs hat in den letzten zwei Jahrzehnten etwas zugenommen und erreicht einen Anteil von etwa 50 Prozent, während die Nutzung von Heizöl etwas abgenommen hat, aber dennoch fast 30 Prozent des Wärmebedarfs deckt (AGEB, 2013 S. 1.10). Im Gegensatz dazu spielt Heizöl im Wohnungsneubau nahezu keine Rolle mehr. Obwohl im Jahr 2000 der Gas-Anteil noch dominierte, stiegen die Anteile von Wärmepumpen und Fernwärme in den letzten Jahren kontinuierlich. Wärmepumpen machten im Jahr 2013 fast 23 Prozent und Fernwärme 20 Prozent der Wärmeversorgung im Neubau aus (AGEB, 2013 S. 1.9).

Im Neubau sinkt demnach der Anteil fossiler Brennstoffe an der Wärmeerzeugung. Durch eine erhöhte Gebäudeeffizienz und damit sinkenden Wärmebedarf sowie gleichzeitiger Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien lassen sich Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen des Neubaus gering halten.

Anhand einer Neubausiedlung in Hamburg soll untersucht werden, wie der geringe verbleibende Wärmebedarf der Effizienzhäuser gedeckt werden kann. Dabei werden drei unterschiedliche Wärmeversorgungssysteme miteinander verglichen. Ziel ist es, eine Variante zu finden, die sowohl einen geringen Primärenergiebedarf als auch vertretbare Investitions- und Vollkosten aufweist.

Ein Vorteil, der sich bei der Betrachtung einer kompletten Neubausiedlung bietet, ist, dass sich die Untersuchung von zentralen und dezentralen Wärmeversorgungssystemen lohnt, da zurzeit keinerlei Infrastruktur auf dem Baugebiet vorhanden ist. Aus diesem Grund hat keine der untersuchten Varianten den Vorteil, dass der benötigte Netzanschluss bereits verlegt wurde und sich diese Wärmeversorgung daher anbieten würde.

Ergänzend sollen die hier ermittelten Ergebnisse mit denen eines energetischen Gutachtens von einem anderen Bauvorhaben aus dem Jahr 2010 verglichen werden. Daraus wird abgeleitet, welche Einflüsse die Wahl der Bebauung auf die Ergebnisse hat.

2 Das Bauvorhaben

Als Grundlage für diese Arbeit dient das energetische Gutachten, welches für eine geplante Neubausiedlung in Hamburg erstellt wurde. In diesem Gutachten werden die wirtschaftlichen und energetischen Vor- und Nachteile unterschiedlicher Wärmeversorgungssysteme gegeneinander abgewogen. Da das Bauvorhaben noch in der frühen Planungsphase ist, können Entscheidungen bezüglich der Wärmeversorgung und des Gebäudestandards getroffen und festgelegt werden. Die Ergebnisse des Gutachtens geben eine Tendenz wieder, wie sich die Wärmeversorgungsvarianten in den betrachteten Punkten entwickeln können. Je nachdem, wie weit sich die letztendliche Umsetzung des Bauvorhabens von den Annahmen unterscheidet, ist mit einer Abweichung der Ergebnisse von bis zu ± 35 Prozent zu rechnen (Krämer, 2014).

Im Rahmen eines Wettbewerbs unter mehreren Architekturbüros wurde bereits ein städtebauliches Konzept entwickelt und in dem aktuellen Bebauungsplan umgesetzt (Begründung L, 2013 S. 40). Neben dem Bebauungsplan liegt die Begründung vor, die für das Genehmigungsverfahren benötigt wird.

Der Stadtteil, in dem die Neubausiedlung integriert werden soll, hat zum Teil einen dörflichen Charakter (Begründung L, 2013 S. 3). Im Bestand sind überwiegend Einfamilienhaustypen zu finden. Die Anordnung der Gebäude in der Umgebung ist in offener Bauweise (Begründung L, 2013 S. 40), das bedeutet, die Gebäude haben einen großzügigen Abstand untereinander und besitzen großflächige Grundstücke. Da in der Begründung mehrfach darauf hingewiesen wird, dass sich die Gebäude des Bauvorhabens in das Bild des Stadtteils einfügen sollen (Begründung L, 2013 S. 41), wird versucht, möglichst viele der genannten Charakteristika des Stadtteils für die Neubausiedlung zu übernehmen.

Insgesamt sollen in dem Bauvorhaben 120 Wohneinheiten entstehen, die in Einfamilien-, Doppel-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser aufgeteilt werden (vgl. Tabelle 2.1). Dem sozialen Wohnungsbau werden dabei 30 Prozent der Wohnungen zur Verfügung gestellt (Begründung L, 2013 S. 3).

Tabelle 2.1 Übersicht über die im Baugebiet geplanten Gebäudetypen sowie ihrer Anzahl (Begründung L, 2013 S. 41)

Gebäudetyp	Anzahl der Gebäude	Anzahl der Wohneinheiten
Einfamilienhaus	31	31
Doppelhaus	8	16
Reihenhaus	9	32
Mehrfamilienhaus	7	41
Summe	55	120

Die Stadt Hamburg möchte mit diesem Quartier der Nachfrage nach familiengerechten Wohnen entgegenkommen (Begründung L, 2013 S. 3). Aus diesem Grund sind hauptsächlich Einfamilienhausty-

pen vorgesehen. Um das familienfreundliche Klima abzurunden, ist der Bau einer Kindertagesstätte vorgesehen. Sie soll im gleichen Effizienzhaus-Standard wie die Wohngebäude errichtet werden und im südöstlichen Bereich der Siedlung entstehen (Begründung L, 2013 S. 39).

Die gesamte Siedlung wird von einem Investor geplant und gebaut. Anschließend werden die bebauten Grundstücke verkauft. Der Investor schätzt das Wohngebiet als so attraktiv ein, dass er bereit ist, das Risiko einzugehen, den Interessenten die Wärmeversorgung vorzuschreiben. Jedoch setzt er voraus, dass die Wärmeversorgung energetisch zukunftsweisend ist. Dabei werden auch in einem gewissen Rahmen eventuell anfallende Mehrkosten in Kauf genommen.

Der Investor fordert, dass die Gebäude mit einem hohen energetischen Standard errichtet werden sollen. Als Ziel wurde zunächst der Effizienzhaus-Standard-40 festgelegt (vgl. Kapitel 3.2). Um für eindeutige Eigentumsverhältnisse zu sorgen, soll bei den Doppel- und Reihenhäusern jede Wohneinheit einen eigenen Anschluss an ein Wärmenetz erhalten.

3 Grundlagen

Die Werte, auf denen die Berechnungen basieren, stammen so weit es möglich ist, aus den bisher vorliegenden Unterlagen des Bauvorhabens. Darüber hinaus werden Annahmen getroffen, welche sich am gesetzlichen Rahmen orientieren, der durch mehrere Verordnungen und Gesetze abgesteckt ist. Des Weiteren muss das Bauvorhaben die Anforderungen der Förderbanken an den Effizienzhaus-Standard erfüllen, welche ebenfalls bei der Erstellung der Gebäudemodelle berücksichtigt werden. Daher werden die getroffenen Annahmen zu dem Aufbau der Bauteile und der Geometrie der Gebäudetypen im vierten Abschnitt dieses Kapitels erläutert. Im Anschluss wird die Anlagentechnik und die Unterschiede in den betrachteten Varianten vorgestellt.

3.1 Rechtsgrundlagen

Auf Bundesebene gibt es Gesetze und Verordnungen, in denen die Richtlinien der EU umgesetzt werden. Diese müssen bei den Gebäudemodellen und durchgeführten Berechnungen berücksichtigt werden.

Um die EU-Ziele bezüglich des Anteils erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen, wurden das EEG und das EEWärmeG eingeführt. Der Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Stromsektor soll bis zum Jahr 2020 35 Prozent betragen (EEG, 2012, §1, Abs. 2, Satz 1), im Wärmesektor werden 14 Prozent angestrebt (EEWärmeG, 2011, §1, Abs. 2). Durch das KWKG sollen Treibhausgasemissionen gesenkt und Effizienz gesteigert werden, indem der Anteil von KWK-Strom auf 25 Prozent steigen soll (KWKG, 2013, §1).

In den folgenden Abschnitten werden die für dieses Projekt relevanten Gesetze und Verordnungen kurz vorgestellt und die für die Berechnung wichtigen Aspekte herausgearbeitet.

3.1.1 Energieeinsparungsgesetz

Mit dem Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (EnEG), das im Jahr 1976 zum ersten Mal erstellt und zuletzt am 04.07.2013 geändert wurde, wird die Bundesregierung ermächtigt mit Zustimmung des Bundesrates die Anforderungen an den Wärmeschutz in Gebäuden festzulegen (EnEG, 2013, §1, Abs.1). Im Jahr 2002 wurde die Richtlinie der EU über die Gesamtenergieeffizienz in Gebäuden eingearbeitet (EnEG, 2013 S. 1).

In diesem Gesetz wird festgelegt, dass ab dem 01. Januar 2021 alle neuerrichteten Gebäude als Niedrigstenergiegebäude ausgeführt werden sollen. Nichtwohngebäude im Eigentum von Behörden sollen bereits ab dem Jahr 2019 als Niedrigstenergiegebäude gebaut werden (EnEG, 2013, §2a, Abs. 1).

Ein Niedrigstenergiegebäude weist eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz auf. Der Energiebedarf liegt fast bei null kWh/(m²·a) oder ist sehr gering und sollte zu einem wesentlichen Teil aus erneuerbaren Energien gedeckt werden (Richtlinie 2010/31/EU, §2, Abs. 2).

Näher wurde das Niedrigstenergiegebäude bisher nicht definiert. Es gibt unter anderem Vorschläge auch den Strombedarf von Wohngebäuden in die Bilanzierung miteinzubeziehen (Großklos, 2011). Darüber hinaus wird vermutet, dass der Jahres-Primärenergiebedarf und Jahres-Endenergiebedarf bei Gebäuden dieses Effizienzstandards rechnerisch bei null kWh/(m²·a) liegen werden (Krämer, 2014).

3.1.2 Energieeinsparverordnung

Seit dem 01. Oktober 2009 gilt die aktuelle Energieeinsparverordnung (EnEV, 2009). Sie ist ein Bestandteil der Umsetzung der EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (enev-online, 2002). Hier werden die Anforderungen an die Beschaffenheit von Wohn- und Nichtwohngebäuden festgelegt und beschrieben, wie Energieausweise auszustellen sind.

Zur Bewertung von Gebäuden werden der Jahres-Primärenergiebedarf und der spezifische Transmissionswärmeverlust herangezogen, deren Berechnung in den DIN 4701-10 und 4108-6 vorgeschrieben sind.

Der **Jahres-Primärenergiebedarf** sagt aus, wie groß der Heizwärme- und Warmwasserbedarf des Gebäudes ist. Mithilfe des Primärenergiefaktors werden die Verluste bei der Umwandlung des Brennstoffs (Primärenergie) in nutzbare Energieformen wie zum Beispiel Wärme und Strom (Endenergie) berücksichtigt. Die Anlagentechnik und die Gebäud Kubatur fließen ebenfalls in die Bewertung mit ein. Dadurch lassen sich unterschiedliche Erzeugungsmethoden und Gebäudetypen miteinander vergleichen.

Der **spezifische Transmissionswärmeverlust** bewertet die Gebäudehülle. Eine gute Dämmung sorgt für einen niedrigen Transmissionswärmeverlust, das heißt, wenig Wärmeenergie geht durch die Gebäudehülle an die Außenluft verloren.

Um die Grenzwerte der beiden Kenngrößen zu ermitteln, wird ein Referenz-Gebäude erstellt. Das Referenz-Gebäude entspricht einem Mindest-Standard, der von Neubauten einzuhalten ist. Die U-Werte der Bauteile und die Anforderungen an die Anlagentechnik sind in der EnEV festgelegt (vgl. Tabelle 3.4 auf Seite 13). Das Referenz-Gebäude besitzt die gleiche Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung wie das zu bilanzierende Gebäude (EnEV, 2009, §3, Abs.1). Daraus lassen sich Jahres-Primärenergiebedarf und spezifischer Transmissionswärmeverlust berechnen, die von dem bilanzierten Gebäude eingehalten werden müssen (EnEV, 2009, §3, Abs. 1 und 2).

Ab dem 01. Mai 2014 wird die Novellierung der EnEV schrittweise eingeführt. Die gesamte EnEV 2014 soll ab dem 1. Januar 2016 gelten. Eine der Neuerungen ist, dass der Grenzwert für den Jahres-Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes um 25 Prozent gesenkt und damit die Anforderung ver-

schärft wird. Des Weiteren wird der Primärenergiefaktor von Strom von 2,6 auf 1,8 gesenkt (dena). Der Primärenergiefaktor wirkt sich erheblich auf die energetische Bewertung aus, da der Strombedarf der Anlagentechnik bilanziert wird, welche wiederum direkt in den Jahres-Primärenergiebedarf mit eingerechnet wird.

3.1.3 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz

Um im Wärmesektor einen Anteil von 14 Prozent an Erneuerbaren Energien zu erreichen, wurde das Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) verabschiedet. Dieses Gesetz schreibt für Neubauten und sanierte öffentliche Gebäude vor, wie viel Wärme und Kälte (nachfolgend als Wärme bezeichnet) über erneuerbare Energien bezogen werden muss.

Es gibt zum einen die Möglichkeit, den Wärmebedarf direkt über den Einsatz von erneuerbaren Energien zu decken. Dabei wird je nach der eingesetzten Energieform ein Deckungsgrad festgelegt, der erfüllt werden muss (EEWärmeG, 2011, §5 und Anlage).

Alternativ kann durch den Bezug von energieeffizient erzeugter Wärme oder durch die Einsparung von Wärme die Anforderungen an das EEWärmeG erfüllt werden. Letzteres verlangt eine um 15 Prozent verbesserte Ausführung der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik gegenüber dem Referenzgebäude nach EnEV (EEWärmeG, 2011, §7 und Anlage). Eine Kombination unterschiedlicher Maßnahmen ist ebenfalls möglich (EEWärmeG, 2011, §8).

3.1.4 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Ergänzend zu dem Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) gibt es das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), welches 2002 eingeführt und zuletzt 2013 geändert wurde. Es dient als Instrument, um die Modernisierung und den Neubau von Kraft-Wärmekopplungsanlagen (KWK-Anlagen), sowie den Neu- und Ausbau von Wärmenetzen, die durch KWK-Anlagen gespeist werden, zu fördern (KWKG, 2013, §1).

Der aus KWK-Anlagen erzeugte Strom wird über den KWK-Zuschlag gefördert. Dabei ist die Höhe des Zuschlags von der elektrischen Leistung des BHKW abhängig (vgl. Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite).

Tabelle 3.1 Übersicht über den KWK-Zuschlag (KWKG, 2013, §7)

Elektrische Leistung des BHKW	KWK-Zuschlag	Dauer der Zahlung
< 50 kW	5,41 ct/kWh _{el}	10 Jahre oder 30.000 Vollbenutzungsstunden
50 – 250 kW	4,00 ct/kWh _{el}	30.000 Vollbenutzungsstunden
> 250 kW	2,40 ct/kWh _{el}	30.000 Vollbenutzungsstunden

Darüber hinaus wird der Neu- und Ausbau von Wärme- und Kältenetzen finanziell gefördert. Die Gelder werden vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) ausgezahlt. Dabei ist die Höhe der Förderung abhängig von dem durchschnittlichen Nenndurchmesser der Rohre des Wärmebeziehungweise Kältenetzes. Ist der Nenndurchmesser kleiner als DN100, beträgt der Zuschlag 100 € je laufenden Meter, jedoch maximal 40 Prozent der ansatzfähigen Investitionskosten und maximal zehn Millionen Euro. Ist der Nenndurchmesser der Rohre größer, werden bis zu 30 Prozent des Investitionsvolumens gefördert (BAFA; KWKG, 2013, §7a).

3.2 Effizienzhaus-Standards

Die Gebäude der hier betrachteten Siedlungen sollen im Effizienzhaus-Standard-40- geplant werden. Die Begrifflichkeit Effizienzhaus stammt von Förderbanken, welche durch zinsgünstige Kredite und finanzielle Förderungen den Bau und die Sanierung von energieeffizienten und CO₂-sparenden Gebäuden belohnt.

Im Folgenden werden die zwei für Hamburg wichtigsten Einrichtungen und deren Anforderungen an ihre Effizienzhäuser vorgestellt.

3.2.1 KfW-Effizienzhaus

Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) fördert den energieeffizienten Bau und die energetische Sanierung von Gebäuden. Sie bietet verschiedene Maßnahmenpakete an.

Als Grundlage und Referenzwert gilt das KfW-Effizienzhaus-100, welches den Mindestanforderungen nach EnEV 2009 entspricht. Davon ausgehend werden die energiesparenden Effizienzhaus-Varianten bewertet. Die Grenzwerte für den Jahres-Primärenergiebedarf und den spezifischer Transmissionswärmeverlust sind bei jedem Effizienzhaus-Standard festgelegt (vgl. Tabelle 3.2). Die KfW fördert Passivhäuser nicht in einer eigenen Kategorie. Sie fallen unter die Effizienzstandards-40 und -55 (KfW, 2013 S. 2).

Tabelle 3.2 Übersicht der KfW-Anforderungen an die Kennwerte der Effizienzhäuser unter EnEV 2009 (KfW, 2013 S. 2)

KfW-Effizienzhaus	70	55	40
Q_p in % $Q_{p,REF}$	70%	55%	40%
H_T in % $H_{T,REF}$	85%	70%	55%

Bisher hat sich die KfW noch nicht konkret zu den Änderungen mit der EnEV 2014 geäußert. Für die Ermittlung der Kennwerte wird davon ausgegangen, dass das Effizienzhaus-100 ab dem 01. Januar 2016 dem Referenzhaus nach EnEV 2014 entspricht. Änderungen in der Definition der Effizienzhaus-Standards werden nicht angenommen.

3.2.2 IFB-Effizienzhaus

Die Hamburgische Investitions- und Förderbank (IFB), die aus der ehemaligen Wohnungskreditanstalt (WK) entstand, fördert ebenfalls den Neubau und die Sanierung von energieeffizienten Wohnungen und Häusern in Hamburg.

Die IFB vergibt Fördermittel für das Erreichen des IFB-Effizienzhaus-40₀₉ beziehungsweise das IFB-Passivhaus. Darüber hinaus fördert die IFB auch einen Effizienzhaus-Plus-Standard. Der Bezug von Fördermitteln der IFB schließt die Förderung durch die KfW nicht aus (IFB, 2014 S. 5).

Das IFB-Effizienzhaus-40 hat die gleichen Anforderungen wie das KfW-Effizienzhaus-40 (vgl. Tabelle 3.2). Das IFB-Passivhaus muss einen Jahres-Heizwärmebedarf von 15 kWh pro Jahr und Quadratmeter Energiebezugsfläche sowie einen Jahres-Primärenergiebedarf von 40 kWh pro Jahr und Quadratmeter Gebäudenutzfläche A_N haben (IFB, 2014 S. 10). Darüber hinaus werden einige Anforderungen an die Eigenschaften der Anlagentechnik gestellt (IFB, 2014 S. 11ff)

Ein IFB-Effizienzhaus-Plus basiert auf einem IFB-Effizienzhaus-40₀₉ oder einem IFB-Passivhaus. Dabei muss nachgewiesen werden, dass mehr Energie aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wird, als rechnerisch für Heizung, Warmwasser und Strom benötigt werden. Beim Haushaltsstrombedarf darf der pauschale Wert von 37 kWh/(m²·a) Wohnfläche angesetzt werden (IFB, 2014 S. 10). Es wird empfohlen, dass der Gesamtwärmebedarf des Gebäudes mit mindestens 35 Prozent über Solarthermie gedeckt werden sollte (IFB, 2014 S. 14)

3.3 Software

Für die Ermittlung der Referenz-Gebäude nach EnEV 2009 sowie der Wärmebedarfe der Gebäude wird die Berechnungssoftware „Energieberater 18599“ von Hottgenroth Software genutzt. In dieser Software sind die von der EnEV 2009 geforderten Berechnungen und Anforderungen nach den Normen DIN 4108-6 und DIN 4701-10 für Wohngebäude hinterlegt.

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Projektes sind die Neuerungen der EnEV 2014 noch nicht in die Berechnungssoftware eingearbeitet. Der neue Primärenergiefaktor von Strom lässt sich im Programm anpassen. Die höheren Anforderungen an den Primärenergiebedarf werden in einer Excel-Tabelle ermittelt, indem 25 Prozent von dem Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes abgezogen werden.

3.4 Gebäudemodell

Um die Wärmeversorgungssysteme auslegen zu können, werden zunächst die geplanten Gebäude in Form von Modellen in der Berechnungssoftware Hottgenroth dargestellt. In das Programm werden alle Daten aus den Unterlagen des Bauvorhabens sowie die Annahmen, die auf den gesetzlichen Rahmenbedingungen und den Effizienzhaus-Standards beruhen, eingegeben. Daraus ergeben sich der Wärmebedarf und die Heizlast des Gebäudes, welche für die Dimensionierung der Anlagentechnik benötigt werden. Da die Gebäude für das Baugebiet nach dem Effizienzhaus-Standard-40 geplant werden, wird die Ersatzmaßnahme zur Einsparung von Energie nach EEWärmeG erfüllt. Bereits mit dem Bau eines Effizienzhauses-70 wird dieser Ersatzmaßnahme entsprochen.

Des Weiteren kann das Programm das Referenzgebäude nach EnEV 2009 auf Basis der gemachten Eingaben erstellen. Hieraus können die Mindestanforderungen bezüglich des Jahres-Primärenergiebedarfes und des spezifischen Transmissionsverlustes entnommen werden, die von dem Gebäude unterschritten werden müssen, um die EnEV 2009 einzuhalten. Der Jahres-Primärenergiebedarf muss jedoch noch von Hand an die neue EnEV angepasst werden (vgl. vorheriges Kapitel).

3.4.1 Gebäudehülle und Bauteile

Alle Gebäude- und Wärmeversorgungs-Varianten erhalten die gleiche Gebäudehülle. Sie wird so ausgelegt, dass sie den spezifischen Transmissionswärmeverlust eines Effizienzhaus-40 nach EnEV 2014 ab dem 01. Januar 2016 einhält.

Zunächst werden die Grundflächen und die Anzahl der Geschosse aus dem Bebauungsplan entnommen. Die Gebäudegeometrie und –form sind einfach und ohne architektonische Extravaganzen gewählt. Des Weiteren wird angenommen, dass die Gebäudehülle luftdicht gebaut wird und das Gebäude nahezu wärmebrückenfrei ist.

Im Bebauungsplan ist die maximale Anzahl der Vollgeschosse eingetragen. Der Ausbau des Dachgeschosses wird jedoch in der Begründung nicht ausgeschlossen (Begründung L, 2013 S. 45). Um die Wohnfläche ordnungsgemäß auf die Geschosse zu verteilen, ist zu prüfen, wie die Begriffe „Vollgeschoss“ und „Nichtvollgeschoss“ definiert sind. In der Hamburger Bauordnung steht dazu:

„Das oberste Geschoss oder Geschosse im Dachraum sind Vollgeschosse, wenn sie diese Höhe [lichte Höhe von mindestens 2,30 m, (HBauO, 2014, §2, Abs. 6, Satz 2)] über mindestens zwei Drittel der Geschossfläche des darunter liegenden Geschosses haben“ (HBauO, 2014, §2, Abs. 6, Satz 3).

Daher wird die mit dem Architekten des Projektes abgesprochene Wohnfläche so auf die Geschosse verteilt, dass die Fläche des Dachgeschosses genau zwei Drittel des Vollgeschosses beträgt (vgl. Tabelle 3.3). Bei den Mehrfamilienhäusern wird die gesamte Fläche den Wohnungen zu geordnet. Unter den getroffenen Annahmen wird es nicht möglich sein, die gewünschte Wohnungsgröße von 85 Quadratmetern für alle Wohnungseinheiten zu realisieren. Das Treppenhaus wird nicht berücksichtigt, da es in der thermischen Hülle liegen wird. Für die Berechnungen in Hottgenroth sind die Größe des Treppenhauses und der einzelnen Wohneinheiten nicht relevant.

Tabelle 3.3 Übersicht der getroffenen Annahmen bezüglich der Wohnfläche und der Anzahl der Voll- und Nichtvollgeschosse je Gebäudetyp

Gebäudetyp	Wohnfläche je Wohneinheit	Anzahl Vollgeschosse	Anzahl Nichtvollgeschosse
Einfamilienhaus	150 m ²	1	1
Doppelhaushälfte	145 m ²	2	1
Reihenhaus	120 m ²	2	0
Mehrfamilienhaus	85 m ²	2	1

Im Gebäudebestand sind vorwiegend Satteldächer vertreten. Um die Siedlung dem Stadtbild entsprechend zu gestalten, erhalten die Gebäudemodelle ebenfalls Satteldächer, deren Neigung mit 45 Grad angenommen wird. Jede Dachschräge erhält ein Dachflächenfenster, bei den Mehrfamilienhäusern sind es zwei Dachflächenfenster je Schräge. Des Weiteren wird angenommen, dass der Fensterflächenanteil je Wand 30 Prozent beträgt. Bei allen Fenstern handelt es sich um Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von 50 Prozent (g-Wert = 0,5).

Mit Ausnahme von drei Mehrfamilienhäusern, die eine Tiefgarage besitzen, wird angenommen, dass die Gebäude nicht unterkellert sind.

Aus dem vorliegenden Bebauungsplan werden außerdem Größe und Ausrichtung der Baufelder herausgelesen. Die mögliche Grundfläche der Gebäude wird aus der Größe der Baufelder abgeleitet. Die Ausrichtung der Gebäude muss in der Berechnung von Hottgenroth berücksichtigt werden, da die solaren Strahlungsgewinne über die Fensterflächen insbesondere bei Effizienzhäusern stark ins Gewicht fallen können. Unter Beachtung von Gebäudetyp, Ausrichtung und Größe der Grundfläche werden insgesamt zwanzig unterschiedliche Gebäudekategorien ermittelt und in die Software eingegeben.

Die Kindertagesstätte besitzt als stilistische Abgrenzung zu den Wohngebäuden ein Flachdach (Begründung L, 2013 S. 45). Sie wird in der Berechnungssoftware als Nichtwohngebäude simuliert. Da noch kein Grundriss vorhanden ist, wird sich dem Ein-Zonen-Modell bedient und die gesamte Flä-

che dem Nutzungsprofil „8 - Klassenzimmer (Schulen), Gruppenraum (Kindergarten)“ zugeordnet. Die Bauteile und weiteren Rahmenbedingungen sind die gleichen, wie bei den Wohngebäuden.

Im nächsten Schritt wird der Aufbau der Bauteile eingegeben. Die U-Werte werden an denen der Passivhaus-Bauteile orientiert (vgl. Tabelle 3.4, Darstellung der Bauteile im Anhang B auf Seite 71).

Tabelle 3.4 Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile nach EnEV 2009 (EnEV, 2009, Anlage 1, Tabelle 1), beim Passivhaus (target GmbH, 2009 S. 3, Kap. Bauphysik Teil 1) und der Bauteilen, die für die Gebäudehülle ausgewählt wurden

Bauteil	U-Wert nach EnEV 2009 [W/(m ² ·K)]	U-Wert im Passivhaus [W/(m ² ·K)]	Im Baugebiet ermittelter U-Wert [W/(m ² ·K)]
Fenster	1,30	≤ 0,85	0,80
Dach	0,20	≤ 0,15	0,15
Wand	0,28	≤ 0,15	0,15
Sole	0,35	≤ 0,15	0,11

3.4.2 Anlagentechnik

Nach Eingabe der Geometrie sowie der Bauteile in der Energieberater-Software werden für jeden Gebäudetyp drei Varianten mit unterschiedlicher Anlagentechnik angelegt. Auf diese Weise berechnet die Software den Jahres-Primärenergiebedarf des Gebäudes mit der jeweiligen Anlagentechnik. Da in allen Varianten die Gebäudehülle gleich ist und diese den Anforderungen an das Effizienzhaus-40 genügt, liegt es an der verwendeten Anlagentechnik, ob der Grenzwert bezüglich des Jahres-Primärenergiebedarfs eingehalten wird. In Kapitel 4.1 wird bewertet, welche Varianten den vom Investor geforderten Effizienzhaus-Standard erreichen.

Es gibt einige Punkte bezüglich der Anlagentechnik, die später nicht in die durchgeführten Berechnungen dieser Arbeit einfließen, jedoch für eine vollständige Berechnung in Hottgenroth eingegeben werden müssen. So wird für alle Varianten eine Zu- und Abluftanlage mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 80 Prozent vorgesehen (IFB, 2014 S. 12). Die Dämmung der Rohrleitungen im Heizungssystem entspricht der doppelten EnEV-Anforderung. Während bei der Brennwertkessel-Variante Radiatoren mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C sowie einer Rücklauftemperatur von 45 °C vorgesehen ist, erhalten die anderen Varianten Fußbodenheizungen, deren Vorlauftemperatur 40 °C und Rücklauftemperatur 30°C beträgt.

In den weiteren Berechnungen (Kapitel 4) wird die periphere Anlagentechnik nicht weiter berücksichtigt. Grund hierfür ist beispielsweise, dass die Investitionskosten für die RLT-Anlage in allen Varianten gleich sein werden, da diese von der Gebäudehülle und damit vom gewählten Gebäudestandard abhängt. Würde man unterschiedliche Gebäudestandards miteinander vergleichen, wäre es wichtig, die Kosten der Anlage sowie die Energieeinsparungen aus der Wärmerückgewinnung einzukalkulieren.

Bei den hier gemachten Berechnungen hat die Lüftungsanlage jedoch keine Auswirkungen auf die Tendenz der Ergebnisse und wird daher nicht einkalkuliert. Weitere periphere Anlagentechnik, wie zum Beispiel Pumpen, wird ebenfalls nicht in die Berechnungen mit einbezogen. Für eine genaue Ermittlung der benötigten Pumpen müsste man in die Planungsdienstleistung einsteigen. Zum derzeitigen Planungsstand ist eine genaue Ermittlung der Anlagentechnik nicht sinnvoll.

3.4.2.1 Brennwerttechnik

Diese dezentrale Versorgungsvariante wird als Vergleichsbasis für die anderen Varianten verwendet. Die Anlagentechnik wird dabei an das EnEV-Referenzgebäude angelehnt, wenngleich sie einen höheren Deckungsanteil an regenerativer solarthermischer Energie hat. Jedes Gebäude wird demnach mit einem Brennwertkessel mit zehn Prozent solarthermischer Unterstützung ausgestattet. Ferner werden etwa 60 Prozent des Warmwasserbedarfs über die solarthermische Anlage gedeckt. Bei den Mehrfamilienhäusern wird der solare Deckungsgrad auf rund 55 Prozent festgesetzt.

Da das Baugebiet infrastrukturell nicht erschlossen ist, muss für diese Variante das Gasnetz erweitert werden. Für die Hamburg Netz GmbH ist eine Erschließung des Gebietes mit einem Erdgasnetz nicht rentabel. Aus diesem Grund muss der Bau des Netzes von der Siedlung bezahlt werden (Hamburg Netz GmbH, 2014).

3.4.2.2 Wärmepumpe

Wie bereits in der Referenzvariante wird das Warmwasser zu ca. 60 beziehungsweise 55 Prozent über Solarthermie gedeckt. Der gesamte Heizwärmebedarf sowie der restliche Warmwasserbedarf werden über elektrisch betriebene Sole/Wasser-Wärmepumpen erzeugt. Die Jahresarbeitszahl beträgt 3,8 und entspricht damit den Mindestanforderungen aus dem EEWärmeG (EEWärmeG, 2011, Anhang, Punkt IIIb). Zusätzlich wird je Gebäude ein Warmwasserspeicher eingeplant.

Statt einer Sole/Wasser-Wärmepumpe könnte man auch die Luft/Wasser-Wärmepumpe wählen. Diese ist in der Anschaffung günstiger, da hier das Erdreich als Quelle für die Umweltwärme nicht erschlossen werden muss. Jedoch ist im Winter, wenn der Wärmebedarf am größten ist, die Jahresarbeitszahl am niedrigsten. Dann ist der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ähnlich einer Stromheizung. Da das Erdreich auch im Winter eine höhere Temperatur als die Außenluft aufweist, kann das gesamte Jahr über eine größere Arbeitszahl erreicht werden. Aus energetischer Sicht ist dies die sinnvollere Variante und die damit verbundenen Mehrkosten werden in Kauf genommen.

3.4.2.3 Blockheizkraftwerk

Bei dieser Variante soll eine Heizungszentrale entstehen, in der ein gasbetriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW) stehen soll. Dieses soll wärmegeführt dimensioniert werden. Angelehnt an die Faustregel, dass ein BHKW, das 30 Prozent der maximal benötigten Leistung erbringt, etwa 60 bis 80 Prozent des Jahreswärmebedarfs decken kann, wird das BHKW so ausgelegt, dass es ein Drittel der gesamten

Heizlast der Siedlung also $181 \text{ kW}_{\text{th}}$ deckt (Gailfuß, a). Mit der Annahme, dass 70 Prozent des jährlichen Wärmebedarfes der Siedlung gedeckt werden, ergeben sich 3.725 Vollbenutzungsstunden. Damit das BHKW möglichst viele Volllaststunden hat, wird keine solare Warmwasserunterstützung vorgesehen. Die Mindestanforderung des Deckungsgrades aus dem EEWärmeG sind 50 Prozent (EEWärmeG, 2011, §7, Abs. 1, Nummer 1b).

Ab einem KWK-Anteil von 70 Prozent im Wärmenetz kann ein Pauschalwert für den Primärenergiefaktor in Höhe von 0,7 angesetzt werden. Durch eine Berechnung kann der genaue Wert ermittelt werden (AGFW). Für die hier durchgeführten Berechnungen werden sowohl ein Primärenergiefaktor von 0,7 als auch 0,5 angenommen. Er wurde jedoch nicht berechnet. Zum Vergleich: das Hamburger Nahwärmenetz von Vattenfall hat einen Primärenergiefaktor vom 0,57 (TU Dresden, 2012).

Für die Spitzenlasten und als Back-up-System soll ein Brennwertkessel installiert werden. Es wird ein Kessel gewählt, der die gesamte Heizlast von rund $544 \text{ kW}_{\text{th}}$ leisten kann. Zusätzlich muss ein Nahwärmenetz angelegt werden, um die Wärme in die Haushalte zu transportieren.

Es wird angenommen, dass der vom BHKW erzeugte Strom in das öffentliche Stromnetz eingespeist und verkauft wird. Die Einspeiseerlöse werden bei der Ermittlung der Vollkosten berücksichtigt. Darüber hinaus wird in Kapitel 5.7 überschlagen, wie groß der zu erwartende Strombedarf der Siedlung mindestens sein wird und mit der erzeugten Strommenge verglichen, um eine Aussage über die Möglichkeit der Eigennutzung des Stroms treffen zu können.

3.4.2.4 enercity contracting

Eine weitere Variante, basiert auf den Kosten, die das Unternehmen enercity contracting kalkuliert hat. Die Firma plant, baut und betreibt BHKW und Nahwärmenetze und verkauft die Wärme an den Auftraggeber, welcher in diesem Fall die Neubausiedlung, vertreten durch den Investor, ist.

Bei einem Treffen haben die Ingenieure Sascha Brandt und Stefan Harders die Ergebnisse aus ihrer ersten Kostenabschätzung vorgestellt. Dazu gehören zum einen der Arbeits- und Grundpreis, der für den Wärmebedarf gezahlt werden muss. Zum anderen fällt ein Anschlusskostenbeitrag für jedes Gebäude an (vgl. Tabelle 3.5).

Auf Basis dieser Zahlen sowie den Informationen, die beim Gespräch ausgetauscht wurden, wird versucht, möglichst ähnliche Rechnungen wie bei den anderen Varianten durchzuführen. Für diesen Zweck werden die Werte für eine Vertragslaufzeit von 15 Jahren gewählt, da auch die Investitionskosten bei den anderen Varianten über den gleichen Zeitraum abbezahlt werden.

Tabelle 3.5 Von enercity contracting abgeschätzte Arbeits- und Grundpreise sowie Anschlusskostenbeiträge (enercity contracting, 04. April 2014). Letzteres entspricht dem Punkt „Anschlusskosten“, welche wiederum die gesamten Investitionskosten dieser Variante sind, da für die Hausbesitzer keine weiteren Kosten anfallen (vgl. Kapitel 4.2.1)

Preis	10 Jahre Vertragslaufzeit	15 Jahre Vertragslaufzeit
Arbeitspreis	7,7 Cent/kWh	7,7 Cent/kWh
Grundpreis		
Einfamilien-/Doppelhaus	520 €/WE	480 €/WE
Reihenhaus	480 €/WE	440 €/WE
Mehrfamilienhaus	320 €/WE	300 €/WE
KiTa	3.718 €	3.347 €
Anschlusskostenbeitrag		
Einfamilien-/Doppel-/Reihenhaus	7.500 €	7.500 €
Mehrfamilienhaus/KiTa	10.500 €	10.500 €

enercity contracting hat ihr BHKW auf Grundlage der für sumbi ermittelten Gebäudeflächen berechnet. Dabei haben sie ihre Erfahrungswerte einfließen lassen, wie beispielsweise, dass der Warmwasserbedarf von Kindertagesstätten oft so gering ist, dass er selten über eine Heizzentrale gedeckt wird. Gleichzeitig hat sich ihnen bei realisierten Projekten gezeigt, dass der Wärmebedarf oftmals um bis zu 50 Prozent höher ist als zuvor berechnet wurde. (enercity contracting, 04. April 2014). Grund hierfür ist vermutlich, dass die Haushalte nicht so heizen und lüften wie es in den Berechnungen der Normen angenommen wird. Daher hat enercity contracting bei den Wohngebäuden höhere Wärmebedarfe für ihre Berechnungen zu Grunde gelegt. In der Summe ergibt sich bei enercity contracting dennoch ein ähnlicher Wärmebedarf, wie der für sumbi berechnete. Daher lassen sich die aus dem Wärmebedarf resultierenden Treibhausgas-Emissionen und Energiebedarfe aller Varianten gut miteinander vergleichen.

Aufgrund des höheren KWK-Zuschlags dimensioniert enercity contracting das BHKW so, dass die elektrische Leistung 50 kW_{el} nicht überschreitet. Die thermische Leistung liegt bei etwa 90 kW_{th} (vgl. Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite), der Deckungsgrad des Wärmebedarfs über das BHKW beträgt ca. 60 Prozent und die restliche Wärme wird über zwei Brennwärtekessel erzeugt. Der Anforderung nach dem EEWärmeG wird damit entsprochen (vgl. Kapitel 3.4.2.3). Es ergibt sich ein Primärenergiefaktor von 0,95 (enercity contracting, 04. April 2014). Aus den gegebenen Daten wird eine Vollbenutzungsdauer von 7.313 Stunden ermittelt.

enercity contracting schlägt als weitere Möglichkeit den Betrieb einer elektrischen Wärmepumpe vor. Diese kann mit dem vom BHKW erzeugten Strom betrieben werden und würde die Mittellast abdecken. Die Nutzung des selbst produzierten Stroms ist dabei wirtschaftlich reizvoll. enercity contracting hat solche Varianten für andere Bauvorhaben bereits öfters kalkuliert, jedoch bisher noch nicht umgesetzt (enercity contracting, 04. April 2014). Mit dieser Methode ließen sich der Primärenergiefaktor

und die Umweltverträglichkeit verbessern. Für die hier betrachtete Neubausiedlung wurde die Variante noch nicht ermittelt, da dies zunächst mit dem Investor abgesprochen werden soll.

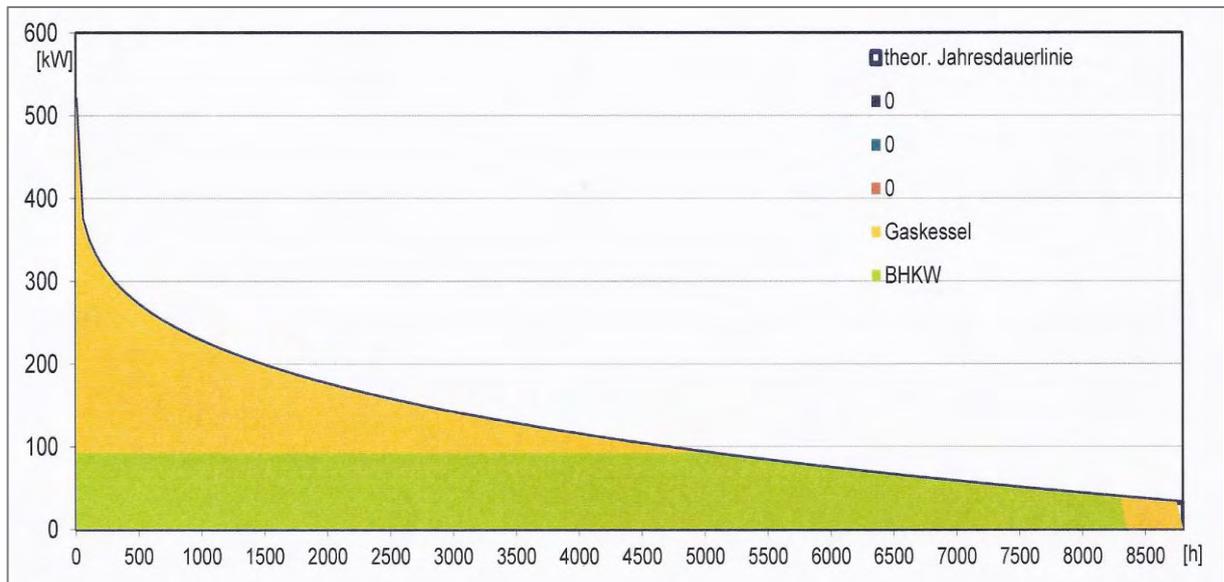


Abbildung 3.1 Diese geordnete Jahresdauerlinie hat enercity contracting für die Neubausiedlung ermittelt (enercity contracting, 04. April 2014)

Abschließend ist zu beachten, dass die Ergebnisse aus der Kalkulation der Kosten des BHKW von enercity contracting nicht direkt mit den anderen Varianten verglichen werden können. Denn bei den zur Verfügung gestellten Daten sind kaum Details bezüglich der getroffenen Annahmen bekannt. Es ist davon auszugehen, dass sich die Grundlagen und die darauf beruhenden Berechnungen, wie sie enercity contracting vorgenommen hat, von den hier betrachteten Berechnungen (Kapitel 4) unterscheiden. Bekannt ist zum Beispiel, dass die Investitionskosten von enercity contracting neben den maßgeblichen Kosten der Anlagentechnik auch die Kosten für Zirkulationspumpen und weitere periphere Anlagentechnik beinhalten. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass andere Annahmen bezüglich der betriebsgebundenen Kosten getroffen wurden. Die Erfahrungen aus bereits realisierten Projekten fließen mit hoher Wahrscheinlichkeit in die Kostenkalkulation mit ein, während in den Berechnungen für sumbi ein pauschaler Prozentsatz der Investitionskosten für alle Varianten angenommen wird. Dies muss bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Zur Unterscheidung der beiden BHKW-Varianten wird im Index der Buchstabe des Erstellers geführt: **BHKW_e** bzw. BHKW(e) in Diagrammen für enercity contracting und **BHKW_s**, oder BHKW(s) für sumbi kalkulierte BHKW.

4 Berechnungen

Zweck der Berechnungen ist es, Werte zu erzeugen, die den Vergleich der unterschiedlichen Wärmeversorgungsvarianten ermöglichen.

Da die Berechnungen für das BHKW in mehreren Punkten von denen der anderen Varianten abweichen, werden sie in jedem Kapitel in einem Unterpunkt näher erläutert.

4.1 Energiebedarfe und Treibhausgas-Emissionen

Die Ermittlung von End- und Primärenergiebedarf sowie Treibhausgas-Emissionen unterscheidet sich bei den einzelnen Wärmeerzeugervarianten in einigen Schritten (vgl. hierzu Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite).

Hüllfläche, Bauteile und Wärmebedarf

Für die Berechnung der Energiebedarfe und der Treibhausgas-Emissionen werden Heiz- und Warmwasserwärmebedarf sowie die Heizlast für alle Gebäude benötigt. Die Berechnungssoftware von Hottgenroth berechnet diese Werte nachdem die Geometrie der Gebäude und der Aufbau der Bauteile eingegeben wurden (vgl. Kapitel 3.4).

Für den Warmwasserwärmebedarf wird entsprechend der EnEV der Wert $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ gewählt (EnEV, 2009, Anlage 1, Kap. 2.2, Pkt. 2.2). In der Praxis kann man in Mehrfamilienhäusern von einem höheren Warmwasserbedarf je Nutzfläche ausgehen, da dort eine größere Bewohnerdichte herrscht (enercity contracting, 04. April 2014).

In der Summe resultieren folgende Wärme- und Leistungsbedarfe für die gesamte Siedlung (eine Liste, in der Bedarfe und Leistungen je Gebäudetyp aufgeführt sind, ist in Anhang A.3 auf Seite 65 zu finden):

- Jährlicher Heizwärmebedarf: $\sim 464 \text{ MWh}$
- Jährlicher Warmwasserbedarf: $\sim 232 \text{ MWh}$
- Leistungsbedarf für die Wärmebereitstellung: $\sim 544 \text{ kW}$.

Da bei allen Varianten die gleiche Gebäudehülle vorgesehen ist, bilden die oben genannten Bedarfe die Grundlage für alle Wärmeversorgungsvarianten. Bei den dezentralen Varianten werden die folgenden Berechnungen für jede Gebäudekategorie einzeln ausgeführt. Beim BHKW wird mit der Summe der Wärmebedarfe weiter gerechnet. Erst die Kosten-Kalkulationen sind auf die einzelnen Gebäudekategorien bezogen.

Systemverluste

Im ersten Schritt sollen die Wärmeverluste ermittelt werden, die bei der Versorgung des Objekts entstehen. Nach der Eingabe der Anlagentechnik in der Berechnungssoftware Hottgenroth, können die von dem Programm errechneten Verluste herausgelesen werden. Diese werden für beide Bereiche, den Heizungs- sowie Warmwasserbereich, berechnet und in die Punkte Verteilung, Speicherung und Übergabe unterteilt.

Mittels der Verluste werden in einer Excel-Tabelle Umrechnungsfaktoren für den Heiz- und den Warmwasserbedarf ermittelt. Diese werden errechnet, indem die Summe der Verluste mit dem Wär-

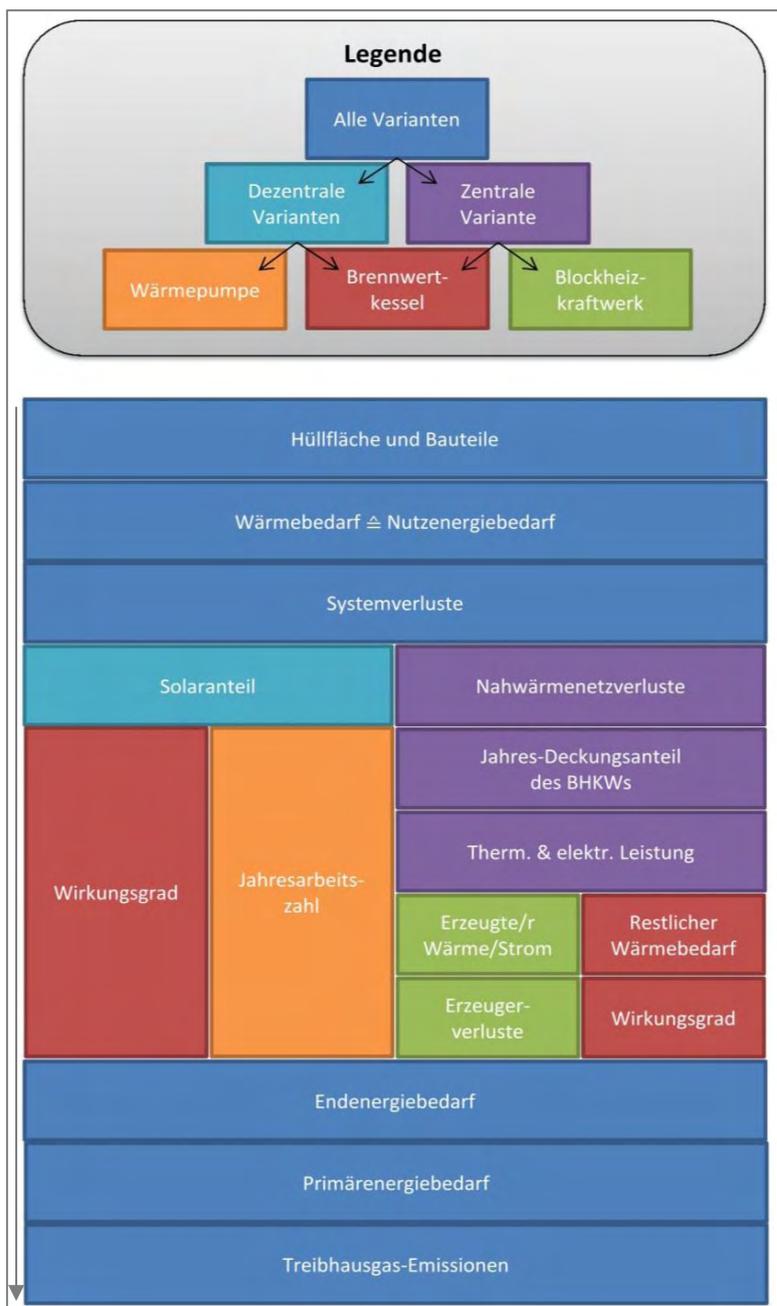


Abbildung 4.1 In diesem Organigramm sieht man, welche Werte in die Ermittlung der Treibhausgas-Emissionen, dem End- und dem Primärenergiebedarf einfließen. Einige Berechnungsschritte (die blauen Kästen) sind bei allen Varianten ähnlich. Die zentrale Variante unterscheidet sich in mehreren Schritten von den dezentralen Varianten (eigene Abbildung)

mebedarf pro Fläche des Gebäudes addiert und durch den Wärmebedarf geteilt werden. Der *Nutzenergiebedarf mit Systemverlusten* wird ermittelt indem die Umrechnungsfaktoren mit ihrem Bedarf multipliziert und dann aufaddiert werden.

Beim BHKW_s werden zusätzlich **Nahwärmenetzverluste** in Höhe von zehn Prozent angenommen. Die Ingenieure von *enercity contracting* schätzen, dass die Verluste des Nahwärmenetzes bei 25 Prozent liegen werden (*enercity contracting*, 04. April 2014). Grund hierfür ist zum einen die offene Bauweise der Siedlung. Es entsteht eine Grundlast von etwa 40 bis 50 kW_{th} (vgl. Abbildung 3.1), die das gesamte Jahr über benötigt wird. Zum anderen ist der Energiebedarf der Siedlung durch den guten Gebäudestandard so gering, dass die Nahwärmenetzverluste prozentual stärker ins Gewicht fallen.

Um abzuschätzen, wie groß der Einfluss dieses Faktors auf die Ergebnisse (sowohl Energiebedarfe und Treibhausgas-Emissionen als auch die Kostenbetrachtungen) ist, wird im Kapitel 5 an einigen Stellen eine Variante „BHKW_s 25%“ betrachtet und bewertet. Hier wurde lediglich der Faktor der Nahwärmenetzverluste an die von enercity contracting angepasst.

Solaranteil

Bei den dezentralen Varianten wird der Anteil des Wärmebedarfes eingerechnet, der durch die solarthermischen Anlagen erzeugt wird. Dazu werden die prozentualen solaren Deckungsanteile mit dem Warmwasserwärmebedarf multipliziert. Bei dem Brennwertkessel wird auf die gleiche Weise ein Anteil von zehn Prozent auf den Heizwärmebedarf gerechnet. Dieser solare Anteil (in kWh/a) wird dem *Nutzenergiebedarf mit Erzeugerverlusten* abgezogen. Das Ergebnis wird als *Nutzenergie mit Erzeugerverlusten und ohne Solaranteil* bezeichnet.

Endenergiebedarf

Der **Wirkungsgrad** der Brennwertkessel wird pauschal auf 95 Prozent gesetzt und die **Jahresarbeitszahl** der Wärmepumpe wird mit 3,80 angenommen. Die *Nutzenergie mit Erzeugerverlusten und ohne Solaranteil* wird durch den Wirkungsgrad beziehungsweise der Jahresarbeitszahl geteilt. Daraus ergibt sich der *Endenergiebedarf*. Bei den Brennwertkesseln und dem BHKW ist der Endenergeträger das Erdgas und bei der Variante mit der Wärmepumpe ist es der Strom.

Um die Vollbenutzungsstunden der BHKW zu berechnen, wird der *Endenergiebedarf mit Systemverlusten* durch den **Jahres-Deckungsanteil** und die **Wärmeleistung** des BHKW geteilt. Die Vollbenutzungsstunden multipliziert mit der thermischen sowie der elektrischen Leistung des BHKW ergeben die produzierten Kilowattstunden Strom und Wärme an. Anschließend werden die Erzeugungsverluste des BHKW hinzugefügt, indem man die Summe von Strom und Wärme durch den Wirkungsgrad, der mit 91% angenommen wird (ASUE, 2011), teilt. Das Ergebnis ist Endenergiebedarf pro Jahr des BHKW.

Die restliche Wärme wird über einen Brennwertkessel mit einem Wirkungsgrad von 98 Prozent erzeugt. Die Summe der Endenergie des BHKW und des Brennwertkessels ergibt den Endenergiebedarf der BHKW-Varianten.

Primärenergiebedarf

Multiplikation der Endenergien mit dem Primärenergiefaktor des Brennstoffes ergibt den Primärenergiebedarf. Bei Erdgas liegt der Primärenergiefaktor bei 1,1 und der Strom der Wärmepumpe hat einen Faktor von 1,8.

Treibhausgas-Emissionen

Die Treibhausgas-Emissionen werden als CO₂-Äquivalente errechnet. Mit der Software GEMIS des IINAS wurde über eine Life-Cycle-Analyse die Emission von Treibhausgasen bei der Förderung und Bereitstellung des jeweiligen Energieträgers ermittelt. Die Treibhausgasemissionen wurden dann in CO₂-Äquivalente umgerechnet (vgl. Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1 Übersicht der CO₂-Äquivalente verschiedener Brennstoffe (kea bw). Die Faktoren für biogene Stoffe soll verdeutlichen, wie viele CO₂-Äquivalente eingespart werden können, bei der Nutzung eines anderen Brennstoffes

Brennstoff	CO ₂ -Äquivalentenfaktor
Erdgas	245 g/kWh
Strom	579 g/kWh
Holz-Pellets	26 g/kWh
Holzhackschnitzel	23 g/kWh

Um nun die Emissionen an CO₂-Äquivalenten der Anlagen zu berechnen, wird jeweils der Endenergiebedarf mit dem dazugehörigen CO₂-Äquivalentenfaktor verrechnet. Biogene Brennstoffe haben dabei vielfach kleinere Werte als fossile Brennstoffe. Dies ist der Grund für den geringen Primärenergiefaktor regenerativ befeuerter KWK-Anlagen.

Energiebedarfe und Emissionen beim BHKW

Die Treibhausgas-Emissionen und die Energiebedarfe der BHKW-Varianten sind deutlich höher als bei den anderen Wärmeversorgungssystemen. Dies liegt daran, dass eine größere Menge an Brennstoff eingesetzt wird, um zum einen den Wärmebedarf der Siedlung zu decken und zum anderen Strom zu erzeugen. Da aber die Varianten nur hinsichtlich der Wärmeerzeugung verglichen werden sollen, muss der erzeugte Strom gegengerechnet werden.

Zu diesem Zweck wird die Menge des erzeugten Stroms mit dem Primärenergiefaktor beziehungsweise dem CO₂-Äquivalentenfaktor für Strom verrechnet. Diese beiden Werte werden von dem Primärenergiebedarf und den CO₂-Äquivalenten der gesamten Anlage abgezogen. Dadurch erhält man eine Aussage, wie viel Energie und Treibhausgas-Emissionen für die Wärmeerzeugung anfallen.

Die beschriebene Methode wird als Gutschrift-Methode bezeichnet (Gailfuß, b). Man kann sie unter dem Gesichtspunkt anwenden, dass der Strom die hochwertigere Energieform ist. Das Ergebnis entspricht dabei jedoch nicht den Emissionen und Energiebedarfen, die bei der alleinigen Erzeugung von Wärme über beispielsweise einen Brennwertkessel entstehen würden. Rechnerisch ist es möglich, dass der Primärenergiebedarf negativ wird. An dieser Stelle stößt die Gutschrift-Methode an ihre Grenzen.

Alternativ könnte die „ASUE-Methode“ benutzt werden. Mit ihr wird errechnet, wie groß der Primärenergiebedarf wäre, würden die im BHKW erzeugte Menge Strom und Wärme im ungekoppelten System produziert werden. Ungekoppeltes System meint dabei, dass der Strom in einem Kondensationskraftwerk und die Wärme in einem Heizkessel erzeugt werden. Die Differenz zwischen Erzeugung im ungekoppelten System (Summe der Primärenergiebedarfe) und dem Primärenergiebedarf des BHKW entspricht der Einsparung (Gailfuß, b). Dabei wird eine Aussage getroffen, wie viel Primärenergie bei der getrennten Produktion von Strom und Wärme benötigt werden würde und wie viel weniger Primärenergie beim BHKW benötigt wird.

Ein Kritikpunkt an der ASUE-Methode ist, dass die alleinige Betrachtung von der Produktion aus Heizkessel und Kondensationskraftwerk nicht die Realität abbildet. Es müssten Werte genutzt werden, in die der deutsche Energiemix einfließt.

4.2 Wirtschaftlichkeit

Für Investoren und Hausbesitzer spielt die Wirtschaftlichkeit eines Projektes eine große Rolle. Ein Projekt lässt sich außerdem leichter bewerben, wenn es einen Beitrag zum Klimaschutz leistet und gleichzeitig kostengünstig ist.

Für die Interessenten, die mit dem Gedanken spielen, ein Eigenheim in diesem Quartier zu erwerben, dürften in erster Linie geringe jährlich anfallende Kosten ein Entscheidungskriterium sein. Gleichzeitig ist es für den Investor von Interesse, wie hoch die zu erwartenden Investitionskosten für das gesamte Projekt sind. Daher werden diese beiden Kostenpunkte im Kapitel *Ergebnisse* genauer untersucht und bewertet.

Während die Vollkosten von den Investitions-, den Energieversorgungs- und den betriebsgebundenen Kosten abhängen, werden die Investitionskosten selber in drei Unterpunkten aufgeteilt. Eine Übersicht, woraus sich die einzelnen Kostenpositionen zusammensetzen, bietet die Abbildung 4.2.

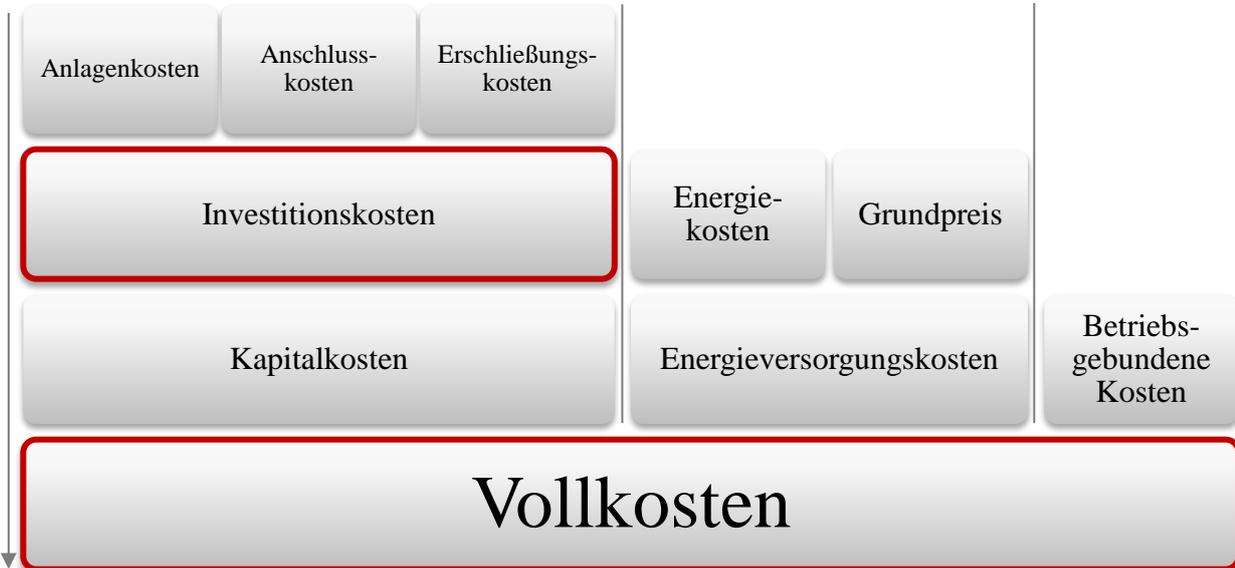


Abbildung 4.2 Zur Bewertung der Wärmeerzeuger werden die Investitionskosten und die Vollkosten miteinander verglichen. Die Höhe der Vollkosten hängen neben anderen Faktoren auch von den Investitionskosten ab (eigene Abbildung)

Bei allen in dieser Arbeit genannten Preisen und Kosten handelt es sich um Netto-Beträge. Das liegt daran, dass der Investor die Steuern zum Endkunden weiterreicht und daher für ihn die Brutto-Preise nicht relevant sind. Da dies bei allen Varianten so gehandhabt wird, wird sich die Aussage der Ergebnisse durch eine Umrechnung in Brutto-Preise nicht verändern, die Tendenz bleibt die Gleiche.

4.2.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten werden in drei Unterpunkte aufgeteilt: Anlagen-, Anschluss- und Erschließungskosten (vgl. Abbildung 4.3).

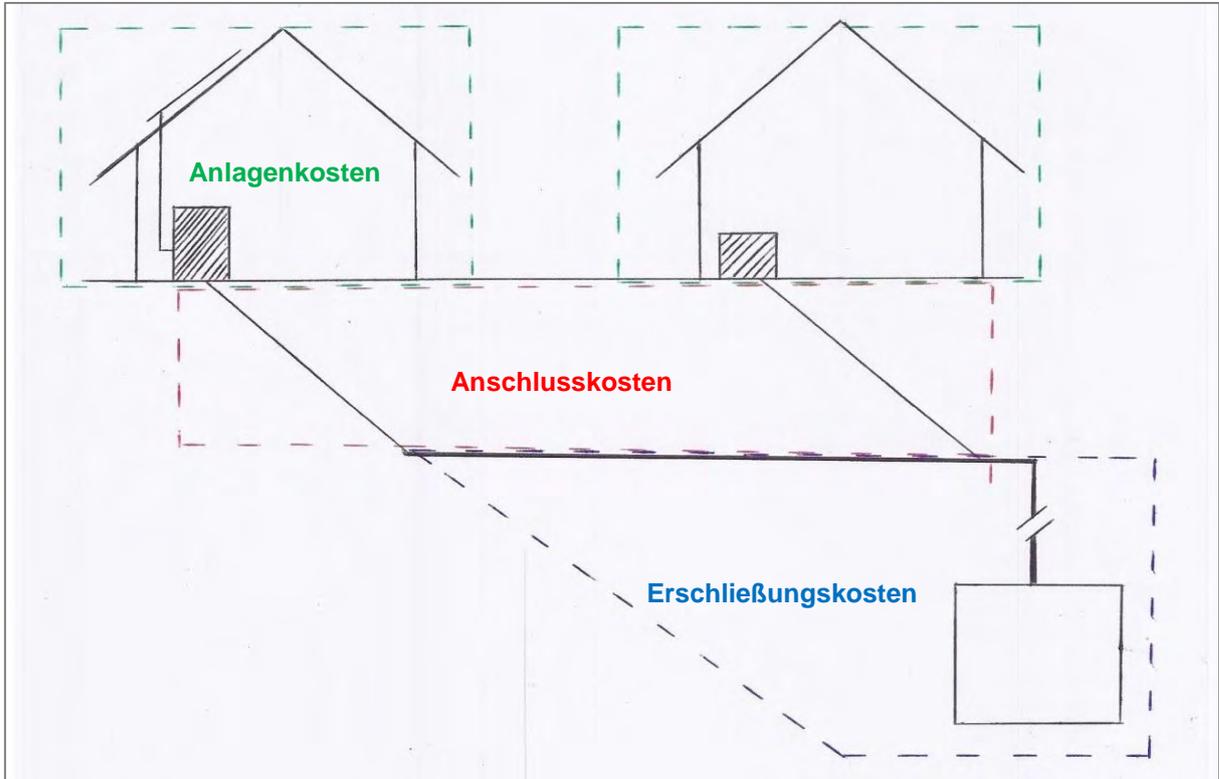


Abbildung 4.3 Die Anlagenkosten beinhalten alle Kosten, die innerhalb der Gebäude anfällt (grüner Bereich), die Anschlusskosten sind die anfallenden Kosten, beim Anschluss an das Netz (rot) und die Erschließungskosten fallen bei dem Bau des Netzes und gegebenenfalls der damit zusammenhängenden Anlagentechnik an (blau; eigene Abbildung)

Nicht in jeder Variante entstehen Kosten aller drei Kategorien (vgl. Tabelle 4.2). Dabei werden lediglich die wichtigsten und für die Variante charakteristischen Kostenpunkte eingerechnet. Die periphere Anlagentechnik wird nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4.2).

Tabelle 4.2 Die Wärmepumpenvariante hat weder Anschluss- noch Erschließungskosten, während sich die Erschließungskosten bei der BHKW- und der Brennwertkessel-Variante aus ganz unterschiedlichen Posten zusammensetzen.

Kostenform	Brennwertkessel & Solarthermie	Sole/Wasser-Wärmepumpe	Gas-Blockheizkraftwerk,
Anlagenkosten	Brennwertkessel & Solarthermie-Paneele	Wärmepumpe & Erdschließung	--
Anschlusskosten	Gasanschluss: Standardpreis für Neuanschluss & Meterpauschalpreis	--	Wärmeübergabegerät für Warmwasser und Heizung
Erschließungskosten	Bau des Gasnetzes	--	BHKW, Spitzenlast-Brennwertkessel, Anschluss an das Gasnetz, Bau des Nahwärmenetzes, Planungskosten

Anlagenkosten

Bei der Wärmepumpe werden die Kosten für Wärmequellenerschließung mit pauschal 3.000 Euro je Gebäude angenommen (GfEM, 2004 S. 202). Für jedes Gebäude werden zudem ein Puffer- und ein Warmwasserspeicher berechnet. Diese werden mit 2.750 Euro je Gebäude berechnet (GfEM, 2004 S. 202). Obwohl es sich dabei um Preise für Einfamilienhäuser handelt, werden diese ebenfalls für Mehrfamilienhäuser angenommen. Es ist damit zurechnen, dass aufgrund größerer Pufferspeicher die Kosten für die Mehrfamilienhäuser in der Praxis etwas höher liegen werden.

Die Anschaffungskosten für Wärmepumpen, Brennwertkessel und Solarpaneele werden individuell an die Wärmebedarfe der Gebäudetypen angepasst. Dabei werden aktuelle durchschnittliche Preise für das Gebiet Hamburg von der Internetseite www.baupreislexikon.de bezogen.

Bei der BHKW_s-Variante werden für die Hausbesitzer keine Anlagenkosten berechnet. Die Kosten für das Wärmeübergabegerät werden unter den Anschlusskosten zusammengefasst.

Anschlusskosten

Bei der Variante Brennwertkessel sind die Kosten für den Anschluss des Gebäudes an das Gas-Netz enthalten. Diese enthalten einen Grundpreis je Gebäude in Höhe von 864 Euro je Anschluss und einen Meterpreis von 21 Euro (Hamburg Netz GmbH, 2013). Es wird abgeschätzt, dass im Schnitt für jedes Gebäude etwa zwölf Meter Gasleitung zu verlegen sind. Dies ergibt einen Anschlusspreis von gerundet 1.200 Euro je Gebäude.

Die Wärmepumpen-Variante hat keine Anschlusskosten, da angenommen wird, dass die Wärmepumpe mit dem Haushalts-Stromanschluss betrieben werden kann.

Die Anschlusskosten für die BHKW-Varianten entstehen durch die Wärmeübergabestation. Die Investitionskosten für diese Anlagen unterscheiden sich je nach Quelle erheblich. So können die Kosten für die kleinste Übergabestation mit einer Leistung von 10 kW 3.579 bis 5.420 Euro betragen (GfEM, 2004 S. 254). Es gibt jedoch auch Anbieter bei denen Wärmeübertragungsstationen für 700 bis 800 Euro angeboten werden (buderus, 2004 S. 14024f). Aus diesem Grund wird mit 2.000 Euro ein mittlerer Preis für das Wärmeübergabegerät und den Anschluss an das Nahwärmenetz gewählt.

Der Anschlusskostenbeitrag, der beim Anschluss an das Netz von enercity contracting gezahlt werden muss, fällt mit 7.500 beziehungsweise 10.500 Euro je nach Gebäudetyp höher aus. Es wird jedoch neben den reinen Kosten für das Wärmeübergabegerät auch ein Teil der Investitionskosten für das BHKW und das Nahwärmenetz mitgetragen (enercity contracting, 04. April 2014).

Erschließungskosten

In der Regel wird das Gasnetz durch die Hamburg Netz GmbH verlegt und lediglich der oben erwähnte Gebäudeanschluss muss vom Hausbesitzer gezahlt werden. Auf Nachfrage bei der Hamburg Netz GmbH wurde ermittelt, dass eine Gesamterschließung des Gebietes für die Gesellschaft nicht wirtschaftlich ist (Hamburg Netz GmbH, 2014). Aus diesem Grund, werden bei der Variante mit Brenn-

wertkesseln die Kosten für den Bau des Gasnetzes auf die Wohneinheiten umgeschlagen und gehen als Erschließungskosten in die Investitionskosten ein. Die Hamburg Netz GmbH schätzt die Kosten für die Erschließung des Gasnetzes auf mindestens 23.380 Euro (Hamburg Netz GmbH, 2014).

Beim BHKW werden die Anlagenkosten für BHKW, Brennwertkessel und Nahwärmenetz sowie Planungskosten und Anschluss des BHKW an das Gasnetz als Erschließungskosten bezeichnet. Die Planungskosten werden in Höhe von fünf Prozent der Investitionskosten angenommen. In Kapitel 4.2.2 wird die Berechnung der Kosten für das Nahwärmenetz erläutert.

Die Anschaffungskosten für das BHKW werden anhand der elektronischen Leistung geschätzt. Es wird angenommen, dass je elektrisches Kilowatt Leistung 1.227 Euro anfallen (GfEM, 2004 S. 117). Des Weiteren fallen Kosten für den Brennwertkessel sowie für vier kleine Pufferspeicher an (GfEM, 2004 S. 202).

Auch das BHKW benötigt einen Anschluss an das Gasnetz. Da an einer Stelle eine größere Leistung abgenommen wird, werden speziell für das Projekt angefertigte Teile benötigt. Für den Anschluss an das Gasnetz werden Kosten von mindestens 10.236 Euro geschätzt, die vom BHKW-Betreiber gezahlt werden müssen (Hamburg Netz GmbH, 2014). Dieser Preis wurde zur weiteren Kalkulation auch an enercity contracting weitergegeben.

4.2.2 Kosten für das Nahwärmenetz

Um die Kosten für den Bau eines Nahwärmenetzes abschätzen zu können, wird zunächst eine Route geplant, entlang der das Netz verlegt werden könnte. Dabei orientiert man sich am Verlauf der Planstraßen des Bauvorhabens. Das Netz wird in Strangabschnitte aufgeteilt, damit der Wärmebedarf ermittelt werden kann, der an dieser Stelle benötigt wird. Daraufhin kann der Durchmesser des Rohres bestimmt werden.

Unter der Annahme, dass die Temperaturspreizung 20 Kelvin beträgt, wird der nötige Wasservolumenstrom berechnet. Daraus lässt sich der Mindestdurchmesser des Rohres ableiten und damit die Kosten je Meter verlegtem Rohr.

Ein Strangabschnitt nahe der Heizungszentrale muss einen größeren Durchmesser haben als am Ende des Netzes und mit zunehmender Dicke steigen die Kosten je verlegtem Meter. Die Summe der Kosten stellen die Investitionskosten für das Nahwärmenetz dar. Diese werden als Erschließungskosten für die BHKW-Variante berechnet.

Im Gespräch mit enercity contracting zeigte sich, dass die Ingenieure die Rohre des Nahwärmenetzes detaillierter „verlegt“ haben. Dabei wurde genauer auf den Wunsch des Investors eingegangen, dass jedes Reihenhaus einen eigenen Anschluss bekommen soll und nicht pro Reihenhaus-Block eine Wärmeübergabestation gebaut wird. Daher wurde bei enercity contracting das Nahwärmenetz beispielsweise bei Reihenhäusern entlang des gesamten Baufeldes verlegt und für jede Wohneinheit im

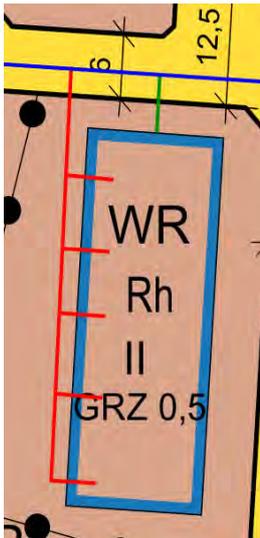


Abbildung 4.4 Unterschiede im Anschluss von Reihenhäusern an das Nahwärmenetz: rot: *enercity contracting* (nachgebildet), grün: *sumbi*

Reihenhaus-Block wurde ein Anschluss berechnet. Für sumbi wurde das Netz vereinfacht und nur ein Anschluss pro Baufeld angenommen (vgl. Abbildung 4.4). Das Nahwärmenetz des BHKW_e ist mit 2.178 Trassenmetern knapp doppelt so lang, wie das für sumbi kalkulierte, welches 1.131 Meter umfasst.

Um die Auswirkungen dieses Längenunterschiedes zu ermitteln, wird in Kapitel 5.5.4 abgeschätzt, um wie viel teurer die spezifische Wärmeerzeugungskosten bei einem BHKW_s 25% ohne Gewinn sind, indem die Größe des Nahwärmenetzes an das Netz von *enercity contracting* angepasst wird.

Dafür wird zunächst die Differenz der Nahwärmenetzlänge ermittelt. Für diese 1.047 Trassenmeter wird pauschal ein Durchmesser von DN 20 angenommen, da es sich um den Teil des Nahwärmenetzes handelt, der am nächsten an den Gebäuden liegt und damit den geringsten Wärmebedarf transportieren muss. Die dadurch entstehenden Mehrkosten werden in die Investitionskosten miteinkalkuliert und die daraus entstehenden spezifischen Wärmeerzeugungskosten mit denen der anderen Varianten verglichen.

Es ist jedoch nicht bekannt, welche Kosten *enercity contracting* je Meter Trasse angenommen hat, sowie welcher Durchmesser für Rohre ermittelt wurden.

4.2.3 Fördermittel

Durch das Marktanzreizprogramm, das KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramm, Steuererleichterungen und Technologieförderungen werden viele finanzielle Anreize für die Sanierung von Bestandsgebäuden erzeugt (Kohler, 2012 S. 11).

Die Förderungen für Neubauten sind etwas rarer gesät. Die IFB fördert beispielsweise einen festen Betrag je Quadratmeter Wohnfläche abhängig vom erreichten Gebäudestandard (IFB, 2014 S. 5). Bei der Errichtung eines Effizienzhaus-40 kann man sich auf diese Weise durch IFB und KfW fördern und finanzieren lassen. Da aber der Gebäudestandard bei allen betrachteten Varianten gleich ist, sind die Auswirkungen auf die Ergebnisse gleich und daher werden diese Zuschüsse nicht weiter betrachtet.

Bei einem Neubau werden weder Brennwertkessel, noch Wärmepumpen oder solarthermische Anlagen gefördert. Lediglich große solarthermische Anlagen oder die Wärmepumpe für die Kindertagesstätte könnte gegebenenfalls gefördert werden (KfW, 2014). Darüber hinaus kann das Nahwärmenetz finanzielle Boni erhalten.

Über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) kann ein Zuschlag in Höhe von 100 Euro je laufenden Meter beantragt werden, da für das Nahwärmenetz ein maximaler Rohrdurchmesser von DN100 ausreichen wird (vgl. Kapitel 3.1.4). Im Rahmen der Untersuchung wurde eine mögliche Fördersumme von 151.800 Euro ermittelt. Rechnet man diese Summe auf die erzeugte Kilowattstunde

Wärme herunter, ergibt sich eine Preissenkung von 0,5 Cent. Da die Förderung keine Auswirkungen auf die Tendenz hat und man sich nicht sicher sein kann, ob der Investor die Fördermittel abrufen wird, wird ohne Einbezug der Fördermittel ein Worst-Case-Szenario ermittelt. Des Weiteren ist nicht bekannt, ob enercity contracting die Fördermittel einkalkuliert hat.

4.2.4 Vollkosten

Die Kosten, die jährlich durch den Betrieb der Anlage sowie der Abzahlung der Investitionskosten anfallen, werden als Vollkosten zusammengefasst. Sie setzen sich aus den drei folgenden Kostenpunkten zusammen:

Kapitalkosten

Die Kapitalkosten werden mit dem Annuitätenverfahren aus den Investitionskosten errechnet. Durch diese Methode lässt sich gewährleisten, dass die Investitionskosten samt den anfallenden Zinsen über den Kreditzeitraum in gleichbleibenden Raten abbezahlt werden.

Die Investitionskosten werden mit dem Annuitätenfaktor multipliziert, der von Zinssatz und Kreditlaufzeit abhängig ist. Mit einem angenommenen Zinssatz von vier Prozent und einer Laufzeit von 15 Jahren beträgt der Annuitätenfaktor 0,0899.

Betriebsgebundene Kosten

Dieser Punkt enthält die für die Wartung und gegebenenfalls Versicherung anfallenden Kosten. Bei den Varianten Brennwertkessel und Wärmepumpe werden pauschal drei Prozent der Investitionskosten angesetzt. Die BHKW-Variante enthält an zwei Stellen betriebsgebundene Kosten. Zum einen werden drei Prozent der Investitionskosten der Erschließungskosten berechnet. Zum anderen fallen bei den Wärmeübergabestationen betriebsgebundene Kosten in Höhe von einem Prozent der Investitionskosten an.

Energieversorgungskosten

Beim Bezug von Gas und Strom fallen ein jährlich zu zahlender Grundpreis sowie einen Arbeitspreis je kWh an.

Bei der Recherche im Internet ist festzustellen, dass sich Grund- und der Arbeitspreis von Gas kaum bei der Abnahme durch den Privatkunden (bei den Einfamilienhaustypen) oder den Gewerbekunden (beim Mehrfamilienhaus) unterscheiden (e.on, 2014). Aus diesem Grund werden pauschal für alle Wohneinheiten die gleichen Gas- und Strompreise angenommen. Es ist jedoch möglich, dass durch abgeschlossene Verträge günstigere Preise insbesondere für die Mehrfamilienhäuser entstehen.

Die Firma enercity contracting hat ebenfalls Grund- und Arbeitspreis für die Wärme ermittelt. Dabei unterscheidet sich der Grundpreis je nach Gebäudetyp (vgl. Tabelle 3.5).

Um Grund- und Arbeitspreis für die BHKW_s-Varianten zu ermitteln, müssen einige Berechnungen und Annahmen getroffen werden. Die Kapitalkosten, die durch die Erschließung der BHKW_s-Variante anfallen, werden dabei auf die Haushalte in Form des Grundpreises umgeschlagen. Dabei wird angenommen, dass jede Wohneinheit und auch die Kindertagesstätte den gleichen Grundpreis zahlen wird.

Die restlichen anfallenden Vollkosten des BHKW_s werden in Form des Arbeitspreises vom Wärmeabnehmer gezahlt. Die Vollkosten bestehen, wie auch bei den anderen Varianten, aus betriebsgebundenen Kosten sowie den Energieversorgungskosten, die beim Gas-Anbieter anfallen. Anschließend werden die Erlöse aus der Einspeisung des Stromes in das öffentliche Netz gutgeschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass der gesamte erzeugte Strom eingespeist wird. Die Ermittlung der Gelderstattungen werden in Kapitel 4.2.5 erläutert. Die Vollkosten abzüglich der Einspeisevergütung des BHKW_s werden durch den ermittelten Wärmebedarf der Siedlung geteilt. Daraus ergibt sich der Arbeitspreis. Eine Gegenüberstellung der Grund- und Arbeitspreise ist im Kapitel 5.5.1 auf Seite 38 graphisch dargestellt.

Für das BHKW_s werden die Grund- und Arbeitspreise auf zwei Varianten berechnet: In einer werden die reinen Energieversorgungskosten einkalkuliert, während in einer weiteren ein Gewinn von pauschal 20 Prozent auf Grund- und Arbeitspreis aufgeschlagen wird.

4.2.5 Ermittlung der Einspeisevergütung

Es wird angenommen, dass der vom BHKW erzeugte Strom nicht von den Anwohnern genutzt wird und in das Stromnetz eingespeist wird. Der eingespeiste Strom kann durch zwei Mechanismen vergütet werden. Zum einen über das KWKG und zum anderen nach dem EEG. Um jedoch nach dem EEG vergütet werden zu können, muss das BHKW mit Biomasse betrieben werden (vz-nrw, 2013).

Einspeisevergütung

Hier wird in der Regel der übliche Preis an der Leipziger Strombörse angerechnet. Dieser wird aus dem durchschnittlichen Preis aus dem vorhergegangenen Quartal ermittelt. Im Folgenden wird mit dem Wert 0,0326 €/kWh_{el} aus dem zweiten Quartal von 2013 gerechnet (vz-nrw, 2013).

KWK-Zuschlag

Die Höhe wird im KWKG (vgl. Kapitel 3.1.4) festgelegt. Bei dem betrachteten Neubaugebiet wird ein BHKW_s mit 120 kW_{el} vorgesehen. Damit werden vier Cent je erzeugter elektrischer Kilowattstunde vergütet.

Bei enercity contracting wurde das BHKW bewusst so ausgelegt, dass es eine elektrische Leistung von maximal 50 kW_{el} hat, damit hier ein KWK-Zuschlag von 5,41 Cent/kWh_{el} gewährt wird.

Vermiedene Netznutzungsentgelte

Da der Strom dezentral eingespeist wird und direkt verbraucht werden kann, wird dem Netzbetreiber das Heruntertransformieren aus einer nächsthöheren Spannungsebene erspart. Die Kosteneinsparungen

müssen in Form der vermiedenen Netznutzungsentgelte an den KWK-Betreiber weitergegeben werden und wird mit zwei Cent je Kilowattstunde elektrisch angenommen (Wärme Strom Gemeinschaft eG).

In der Summe ergeben sich somit 9,26 Cent je Kilowattstunde Strom, die vergütet und den Vollkosten angerechnet werden. Bei einer berechneten Stromerzeugung von 446.985 kWh_e/a bei der BHKW_s-Variante ergeben sich 41.391 Euro jährlich.

4.2.6 Szenarien

Um die Wirtschaftlichkeit über einen längeren Zeitraum hinweg bewerten zu können, werden zwei Szenarien berechnet.

Es wird ein prozentualer Anstieg der Brennstoffkosten angenommen. Dabei steigen sowohl die Preise für den Strom der Wärmepumpe als auch der für das Gas der anderen Varianten im gleichen Maße. Angelehnt an das tatsächliche Verhalten der Marktpreise, fällt die Preissteigerung der BHKW_e-Variante geringer aus. Bei Erdgas sind die Energiepreise in den letzten Jahren stärker gestiegen als bei der Fernwärme. Die für diese Szenarien gewählten Preissteigerungen sind moderate Annahmen. Die Preise können durchaus stärker steigen als hier berechnet (Kraft, et al., 2013 S. 3f).

Die Höhe der Preissteigerungen variiert dabei in den beiden betrachteten Szenarien (vgl. Tabelle 4.3). Darüber hinaus steigen die betriebsgebundenen Kosten um ein Prozent pro Jahr.

Tabelle 4.3 Die Szenarien unterscheiden sich in Höhe der Brennstoffpreissteigerung

	Laufzeit	Brennstoffpreisanstieg	Steigerung Einspeisevergütung	Preissteigerung Fernwärme (enercity)
Szenario I	15 Jahre	4 %	2 %	2,5 %
Szenario II	15 Jahre	6 %	3 %	3,5 %

Die Steigerung der Brennstoffpreise betrifft die gesamten Energieversorgungskosten jeder Variante.

Bei der BHKW_s-Variante werden alle in Bezug auf das BHKW anfallenden Kosten aufgetrennt. Es wird angenommen, dass die Kosten für den Brennstoff um die oben genannten Prozente steigen. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass der Strompreis an der Börse ebenfalls steigt, jedoch nicht in gleichem Maß wie die Brennstoffkosten. Daher steigt die Einspeisevergütung im Vergleich zu den Brennstoffkosten nur halb so stark.

Wie schon bei der Ermittlung der Vollkosten werden eine Variante ohne und eine mit einem Gewinnaufschlag von 20 Prozent gerechnet.

Die Investitionen werden auf 15 Jahren mit vier Prozent Kapitalzins verrechnet. Nach diesem Zeitraum fallen keine Kapitalkosten mehr an. Beim BHKW wird angenommen, dass der Grundpreis nach den 15 Jahren sinkt. Ab dem 16. Jahr wird ein Grundpreis von 50 Euro je Wohneinheit berechnet.

Die durch den KWK-Zuschlag geförderten 30.000 Vollbenutzungsstunden sind unter den getroffenen Annahmen nach ca. acht Jahren erreicht. Beim BHKW_e wird davon ausgegangen, dass der Entfall des KWK-Zuschlags bereits so einkalkuliert wurde, dass dieser sich nicht als eine Änderung im Arbeitspreis widerspiegelt, wie es beim BHKW_s der Fall ist.

Die Kostenentwicklung wird auf einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass spätestens nach diesem Zeitraum Investitionen in die Wärmeversorgung erfolgen müssen.

4.3 Strombedarf

Obwohl angenommen wird, dass der gesamte Strom ins Netz eingespeist wird, wird an dieser Stelle überschlagen, ob sich der Eigenverbrauch des Stroms in der Siedlung lohnen könnte. Dazu wird der anfallende Strombedarf abgeschätzt.

Zum einen wird der Energiebedarf der Lüftungsanlage überschlagen. Es wird angenommen, dass die Lüftungsanlage das gesamte Jahr läuft und vom Bewohner nicht ausgeschaltet werden kann. Zur Berechnung werden die Werte aus der Tabelle 4.4 genommen.

Tabelle 4.4 Getroffene Annahmen bezüglich des Strombedarfes der raumluftechnischen Anlage (IFB, 2014 S. 12)

Gebäudetyp	Lüftungsleistung	Luftwechsel je Wohnung
EFH, DH, RH	0,4 Wh/m ³	140 m ³ /h
MFH	0,5 Wh/m ³	120 m ³ /h

Zum anderen wird abgeschätzt, wie groß der Bedarf an Haushaltsstrom in dem Quartier sein könnte. Dazu wird das IFB-Effizienzhaus-Plus zurate gezogen (vgl. Kapitel 3.2.2). Danach wird pauschal ein Strombedarf von 37 kWh/(m²·a) Wohnfläche angesetzt. Es wird weiterhin angenommen, dass die Wohnfläche in etwa 80 Prozent der Nutzfläche entspricht.

Diese Rechnungen entsprechen einer Minimum-Rechnung, da es nicht Ziel ist, IFB-Effizienz-Plus-Häuser zu bauen und es ist daher anzunehmen, dass der tatsächliche Strombedarf der Siedlung höher ausfallen wird. Zudem wird durch die Kindertagesstätte der Stromverbrauch deutlich gesteigert, dieser wird hier nicht eingerechnet.

Da die Kindertagesstätte abweichende Lüftungsbedingungen hat als der normale Wohnungsbau, welche aufgrund der noch nicht festgelegten Zonierung zu diesem Zeitpunkt nur schlecht abzuschätzen sind, wird bei der überschlägigen Betrachtung des Stromes für die Lüftungsanlagen die Kindertagesstätte ebenfalls nicht berücksichtigt.

5 Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der eingangs beschriebenen Berechnungen vorgestellt werden. Bei dem Vergleich der Varianten wird die Brennwert-Technik als Referenzvariante genutzt, auf deren Basis alle weiteren Wärmeversorgungen bewertet werden.

Die Ergebnisse der BHKW-Variante auf Basis der Zahlen von enercity contracting werden ebenfalls in den Abbildungen und Tabellen dargestellt. Wie in Kapitel 3.4.2.4 erwähnt, muss beachtet werden, dass die Kosten von enercity contracting nur bedingt mit denen der anderen Varianten verglichen werden können, da sich die Grundlagen und Berechnungen, die zu den Arbeits- und Grundpreisen führen, unterscheiden. Um die Vergleichbarkeit der BHKW-Varianten zu erhöhen, wird an einigen Stellen eine BHKW_s 25%-Variante eingeführt, welche die höheren Wärmenetzverluste von enercity contracting übernimmt. Des Weiteren wird bei den spezifischen Wärmeerzeugungskosten eine BHKW_s-Variante betrachtet, deren Wärmenetz in der Größe an enercity contracting angepasst wird.

5.1 Erreichter Effizienzhaus-Standard

Die Gebäudehülle wurde bereits so gewählt, dass sie die Anforderungen an das Effizienzhaus-40 erfüllt. Demnach hängt es von der Anlagentechnik ab, ob der Jahres-Primärenergiebedarf des Effizienzhaus-Standards eingehalten wird. Es zeigt sich, dass nicht alle Wärmeversorgungsvarianten mit den getroffenen Annahmen den Effizienzhaus-Standard-40 erreichen. (vgl. Abbildung 5.1).

Tabelle 5.1 Übersicht, welche Versorgungsvariante den Grenzwert des Jahres-Primärenergiebedarfes der Effizienzhaus-Standards einhalten. Beim BHKW werden drei Varianten mit unterschiedlichem Primärenergiefaktor betrachtet

	Effizienzhaus-70 ₁₄	Effizienzhaus-55 ₁₄	Effizienzhaus-40 ₁₄
Brennwert	✓	✓	✗
Wärmepumpe	✓	✓	✓
Blockheizkraftwerk PEF=0,5	✓	✓	✗
Blockheizkraftwerk PEF=0,7	✓	✗	✗
Blockheizkraftwerk PEF=0,95	✗	✗	✗

Bei der Wärmepumpen-Variante erreichen 18 von 20 Gebäuden den Effizienzhaus-Standard-40. Zwei Gebäude überschreiten die Grenzwerte leicht. Durch beispielsweise Verbesserungen an der Gebäudehülle oder Korrekturen an der Anlagentechnik sollte es ohne wesentliche Mehrkosten möglich sein, bei dieser Variante die Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf ohne Ausreißer zu erfüllen.

Die Varianten Brennwert und BHKW_s erreichen unter den angenommenen Rahmenbedingungen den Effizienzhaus-Standard-55. Bei der Brennwertkessel-Variante wird der Grenzwert für das Effizienzhaus-40 im Schnitt mit sechs kWh/(m²·a) und beim BHKW_s mit drei kWh/(m²·a) überschritten.

Das BHKW_s erreicht den Effizienzhaus-Standard-55, wenn ein Primärenergiefaktor von 0,5 angenommen wird. Wählt man den pauschalen Primärenergiefaktor von 0,7, erreichen die Gebäude mit einer Versorgung über das BHKW_s den Effizienzhaus-Standard-70. Der Jahres-Primärenergiebedarf müsste im Schnitt um etwa zwei kWh/(m²·a) gesenkt werden, um den Effizienzhaus-Standard-55 zu erreichen. Dementsprechend erreicht das BHKW_e mit einem Primärenergiefaktor von 0,95 nicht den Effizienzhaus-Standard-70. Hier ist der Jahres-Primärenergiebedarf ebenfalls um ca. zwei kWh/(m²·a) zu hoch, um den Anforderungen an das Effizienzhaus-70 zu entsprechen.

5.1.1 Vergleich der Anforderungen

Durch die neue EnEV verschärfen sich die Grenzwerte für den Jahres-Primärenergiebedarf eines Gebäudes, was wiederum Einfluss auf die Grenzwerte der Effizienzhäuser hat.

Betrachtet man die gemittelten Jahres-Primärenergiebedarfe der gesamten Siedlung unter der EnEV 2009, so erreicht neben der Wärmepumpe auch das BHKW_s mit einem Primärenergiefaktor von 0,5 den Effizienzhaus-Standard-40. Drei Gebäude der beiden Varianten liegen knapp über dem Grenzwert und es müssten noch Verbesserungen an der Gebäudehülle und/oder der Anlagentechnik vorgenommen werden. Bei der Brennwert-Variante fehlt etwa eine kWh/(m²·a), um ebenfalls den Effizienzhaus-Standard-40 zu erreichen. Fast jede Variante erreicht mit unveränderter Anlagentechnik den nächstbesseren Effizienzhaus-Standard als unter EnEV 2014 (vgl. Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2 Vergleich der gemittelten Grenzwerte für den Jahres-Primärenergiefaktor der Effizienzhäuser unter EnEV 2009 mit den gemittelten erreichten Werten der Gebäude der Siedlung

	Gemittelter Q_p der Siedlung unter EnEV 2009 [kWh/(m²·a)]	EH-70₀₉	EH-55₀₉	EH-40₀₉
Gemittelte Grenzwerte [kWh/(m²·a)]	--	51	40	29
Brennwert	30	✓	✓	✗
Wärmepumpe	28	✓	✓	✓
BHKW PEF=0,5	27	✓	✓	✓
BHKW PEF=0,7	34	✓	✓	✗
BHKW PEF=0,95	42	✓	✗	✗

Unter EnEV 2014 wird der gemittelte Grenzwert für den Jahres-Primärenergiebedarf der Gebäude im Schnitt um 17 kWh/(m²·a) gegenüber der EnEV 2009 gesenkt. Mit dem Effizienzhaus-Standard-55₁₄

wird der Grenzwert im Mittel um weitere 24 kWh/(m²·a) gegenüber dem Referenzgebäude der EnEV 2014 verschärft. Eine Verbesserung auf den Standard-40₁₄ senkt den Grenzwert um weitere sieben kWh/(m²·a). Bei der gesamten Siedlung können mit dem Effizienzhaus-Standard-40 129 MWh/a gegenüber dem Effizienzhaus-55 eingespart werden. Beim Schritt von der EnEV 2014 zum Effizienzhaus-55 wird der Jahres-Primärenergiebedarf um 386 MWh/a gesenkt. (vgl. Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3 Vergleich der Jahres-Primärenergiebedarfe der Wohngebäude der gesamten Siedlung (ohne Kindertagesstätte) anhand der erlaubten Grenzwerten nach den verschiedenen EnEV und dem Effizienzhaus-Standards

	Grenzwert für den maximalen Q_p der gesamten Siedlung [MWh/a]	Mittlerer Q_p-Grenzwert [kWh/(m²·a)]
EnEV 2009	1.196	72
EnEV 2014	858	52
EH-55₁₄	472	28
EH-40₁₄	343	21

Bei den Effizienzhaus-Standards ist der maximale Jahres-Primärenergiebedarf, den die Gebäude haben dürfen geringer als der ermittelte Wärmebedarf von 655 MWh pro Jahr (ohne Berücksichtigung der Kindertagesstätte). Ohne einen Anteil an regenerativen Energien ist das Erreichen der Effizienzhaus-Standards primärenergetisch nicht möglich.

5.2 Energiebedarf

Primärenergiebedarf

Obwohl die Wärmepumpe mit Strom betrieben wird, der wiederum einen höheren Primärenergiefaktor besitzt, hat sie im Vergleich zu den anderen Varianten den niedrigsten Primärenergiebedarf. Durch die gute Jahresarbeitszahl von 3,8 ist die Wärmepumpen-Variante um 56 Prozent primärenergieärmer als die Gas-Brennwert-Variante. Alle BHKW-Varianten sind primärenergetisch schlechter als die Brennwert-Variante (vgl. Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4 Vergleich der Varianten mit der Referenzvariante Brennwertkessel bezüglich des Primärenergiebedarfes

Wärmeversorgung	Primärenergiebedarf pro Jahr [MWh/a]	Abweichung zur Referenzvariante - absolut [MWh/a]	Abweichung zur Referenzvariante - relativ [%]
Gas-Brennwert	815	0	100
Sole/Wasser WP	355	-460	44
BHKW _s mit Strom-Gutschrift	878	+62	108
BHKW _s 25% mit Strom-Gutschrift	997	+182	122
BHKW _e mit Strom-Gutschrift	1.072	+257	132

Betrachtet man den gesamten Primärenergiebedarf der Blockheizkraftwerke, ist dieser mehr als doppelt so groß, im Vergleich zur Brennwertvariante. Rechnet man den Stromertrag gegen, beträgt der Mehrbedarf beim BHKW_s lediglich acht Prozent gegenüber dem Referenzwert.

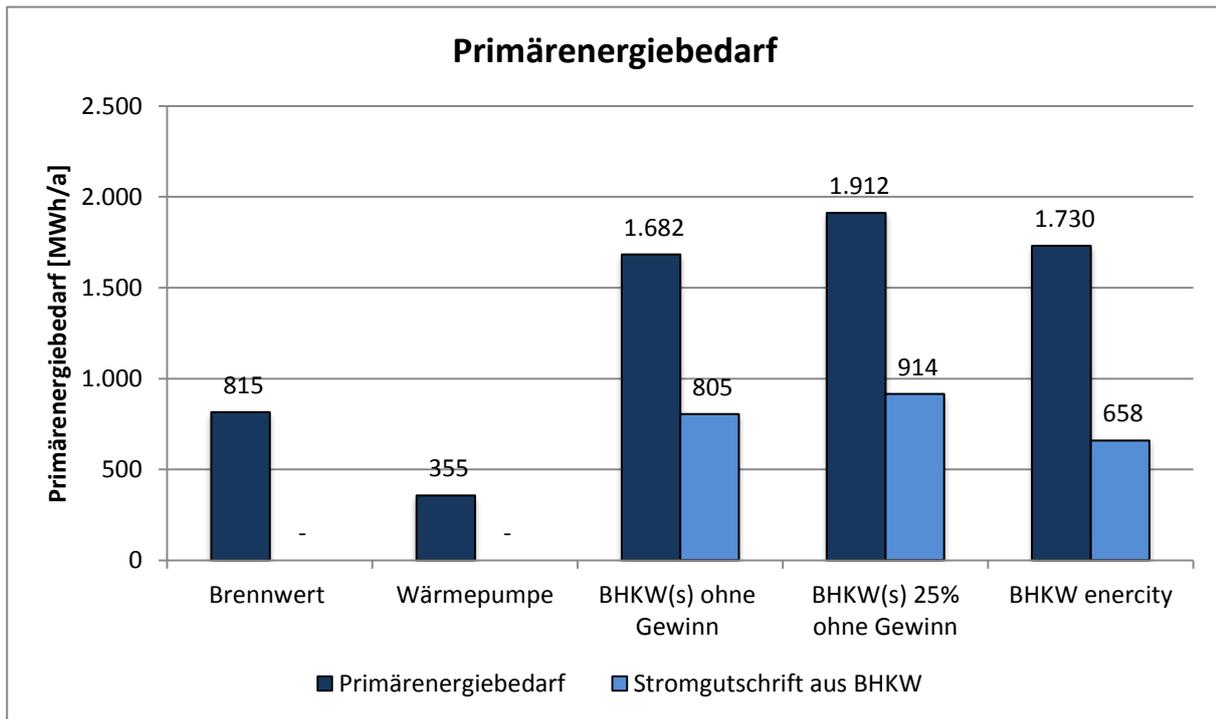


Abbildung 5.1 Vergleich des Primärenergiebedarfs, bei den BHKW-Varianten kann man den produzierten Strom gegenrechnen

Beim gesamten Primärenergiebedarf, der für die Erzeugung von Wärme und Strom benötigt wird, unterscheiden sich die BHKW_s- und die BHKW_e-Variante um lediglich 48 MWh/a. Bei der BHKW_s 25%-Variante hingegen liegt der Bedarf um 182 MWh/a über dem Bedarf des BHKW_e. Grund hierfür ist, dass der Deckungsgrad des BHKW_s größer als beim BHKW_e ist und somit mehr Wärme und Strom erzeugt werden. Hieraus ergibt sich im Vergleich zu den anderen Varianten ein erhöhter Brennstoffbedarf. Die Produktion einer größeren Menge Strom wirkt sich nach der Gutschrift aus. Das

BHKW_s 25% braucht 22 Prozent mehr Primärenergie als die Brennwert-Variante, während das BHKW_e einen Mehrbedarf von 32 Prozent hat (vgl. Abbildung 5.1).

Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf geht direkt in die Energieversorgungskosten ein. Die Tendenz unterscheidet sich dabei nicht von der der Primärenergiebedarfe ohne Stromgutschrift.

Die Endenergie der BHKW-Varianten enthält neben der Wärme auch den produzierten Strom. Hier kann die Gutschrift-Methode nicht angewandt werden, da Strom und Wärme Energieformen unterschiedlicher Güte sind und nicht miteinander verrechnet werden können.

Wie schon beim Primärenergiebedarf erkennt man bei den BHKW-Varianten den Effekt durch die unterschiedlich großen Blockheizkraftwerke (vgl. Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5 Vergleich der Endenergiebedarfe der einzelnen Varianten mit der Brennwert-Variante

Variante	Endenergiebedarf [MWh/a]	Abweichung zur Referenzvariante - absolut [MWh/a]	Abweichung zur Referenzvariante - relativ [%]
Brennwert	741	0	100
Wärmepumpe	197	-544	27
BHKW(s) ohne Gewinn	1.529	+788	206
BHKW(s) 25% ohne Gewinn	1.738	+997	235
BHKW enercity	1.573	+832	212

5.3 Treibhausgas-Emissionen

Die Wärmepumpenvariante hat die geringsten Treibhausgas-Emissionen. Es werden 37 Prozent weniger CO₂-Äquivalente freigesetzt als bei der Referenzvariante. Wird beim BHKW_s der produzierte Strom gutgeschrieben, werden 36 Prozent Treibhausgas-Emissionen gegenüber der Brennwert-Variante eingespart (vgl. Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6 Vergleich der Emissionen in Bezug auf die Brennwertkessel-Variante

Wärmeversorgung	Treibhausgas-Emissionen [t/a]	Abweichung zur Referenzvariante - absolut [t/a]	Abweichung zur Referenzvariante - relativ [%]
Gas-Brennwert	182	0	100
Sole/Wasser WP	114	-67	63
BHKW _s mit Strom-Gutschrift	116	-66	64
BHKW _s 25% mit Strom-Gutschrift	132	-50	73
BHKW _e mit Strom-Gutschrift	174	-8	96

Absolut betrachtet sind die Treibhausgas-Emissionen bei den BHKW-Varianten am größten, wie man auch bei den Energiebedarfen erkennen kann. Die Variante BHKW_s 25% senkt die Treibhausgas-Emissionen um 27 Prozent gegenüber der Referenzvariante, während die Einsparung des kleineren BHKW_e lediglich vier Prozent beträgt (vgl. Abbildung 4.3).

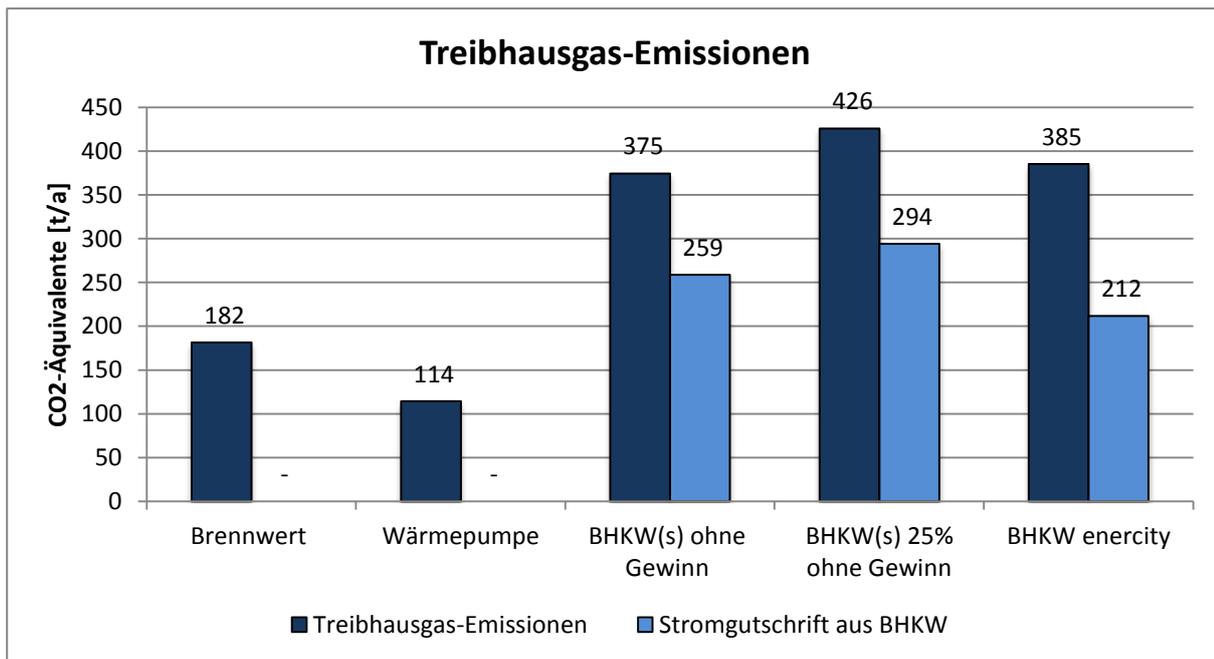


Abbildung 5.2 Graphische Darstellung der Treibhausgas-Emissionen. Beim BHKW wird die Gutschrift der Stromproduktion als hellblaue Säule dargestellt.

5.4 Investitionskosten

In der Anschaffung ist die Wärmepumpe mit Abstand am teuersten, sie ist fast doppelt so teuer wie die Brennwertkessel-Variante. Die Investitionskosten für das BHKW_s sind 12 Prozent kostenintensiver als die für die Brennwertkessel (vgl. Abbildung 5.3).

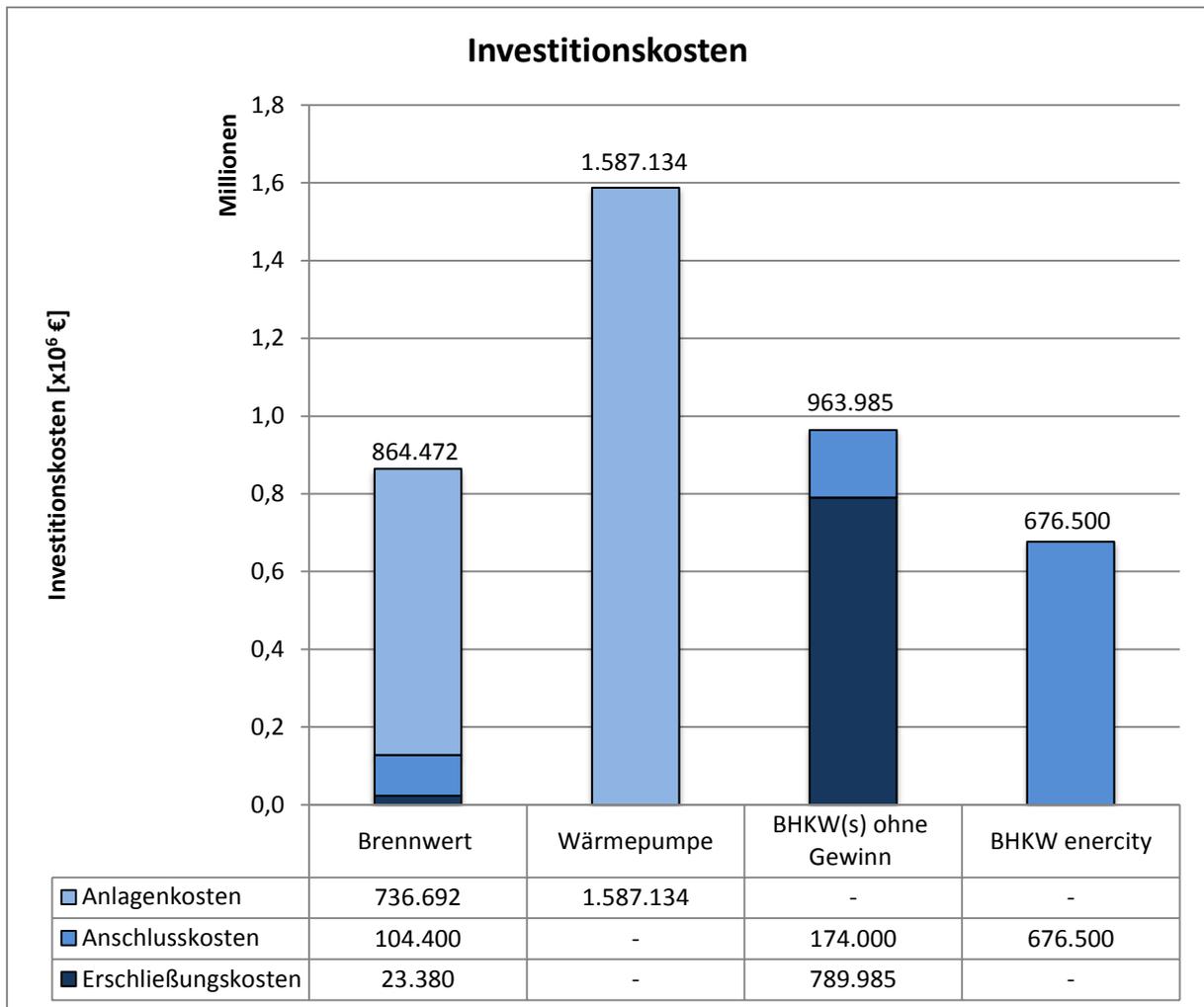


Abbildung 5.3 Darstellung der Investitionskosten unterteilt in die Kostentypen Anlagen-, Anschluss- und Erschließungskosten

Beim BHKW_s werden die Anschlusskosten direkt vom Hausbesitzer gezahlt, während die Erschließungskosten indirekt über den Wärmegrundpreis auf sie umgeschlagen werden (vgl. Kapitel 4.2.4). Ein ähnliches Verfahren wendet enercity contracting an. Die Kosten für die Erschließung sind nicht bekannt und daher nicht in dem Diagramm dargestellt. So liegen die Investitionskosten 22 Prozent unter den Kosten der Brennwert-Variante und das BHKW_e erscheint als die günstigste Variante. Die Anschlusskosten des BHKW_e sind jedoch fast viermal so hoch wie beim BHKW_s.

5.5 Vollkosten

Im Folgenden werden die Vollkosten in verschiedenen Zusammenhängen dargestellt. Dabei sollen zunächst die Grund- und Arbeitspreise der einzelnen Varianten miteinander verglichen werden. Daraufhin wird die Zusammensetzung der Vollkosten genauer untersucht und abgeschätzt, welche jährlichen Kosten je Wohneinheit zu erwarten sind. Zum Schluss werden die spezifischen Wärmekosten je Wärmeerzeugungsvariante einander gegenüber gestellt und bewertet.

Beim BHKW_s wird unterschieden, ob allein die anfallenden Vollkosten berechnet werden oder ob auf den Wärme- und Grundpreis der Wärmeabnehmer ein Gewinn von 20 Prozent beaufschlagt wird.

5.5.1 Grund- und Arbeitspreis

Beim Vergleich der Arbeits- und Grundpreise muss man berücksichtigen, dass unterschiedliche Energieformen bezogen werden. Bei den Brennwertkesseln und den Wärmepumpen müssen Gas und Strom zuerst zur nutzbaren Wärme umgewandelt werden, während die Blockheizkraftwerke bereits Wärme liefern. Aus diesem Grund werden in Kapitel 5.5.4 die spezifischen Wärmekosten verglichen, welche alle anfallenden Kosten bis zur Kilowattstunde Wärme beinhalten. Dennoch sieht der Hausbesitzer auf seiner Abrechnung die hier betrachteten Grund- und Arbeitspreise und wird diese unter Umständen mit den Kosten anderer Wärmeversorgungsvarianten verglichen. Daher soll ein Blick in diese Kosten geworfen werden. Beim BHKW_e wird ein Grundpreis aus dem mittleren Preissegment gewählt, da dieser bei *enercity contracting* je nach Gebäudetypen variiert (vgl. Tabelle 3.5).

Tabelle 5.7 Vergleich des Grundpreises je Wohneinheit mit der Referenzvariante (e.on, 2014; Vattenfall, 2014, sumbi, 2014; enercity contracting, 2014)

Wärmeversorgung	Grundpreis [€/a]	Abweichung zur Referenzvariante - absolut [Ct/kWh]	Abweichung zur Referenzvariante - relativ [%]
Gas-Brennwert	132	0	100
Sole/Wasser WP	71	-61	54
BHKW _s ohne Gewinn	587	455	445
BHKW _s mit Gewinn	704	572	534
BHKW <i>enercity</i>	440	308	333

Beim Vergleich der Grundpreise ist festzustellen, dass der Wärmepumpenstrom mit 71 Euro je Wohneinheit und Jahr am günstigsten ist, während bei allen BHKW-Varianten ein Vielfaches mehr gezahlt werden muss als bei der Brennwert-Variante (vgl. Tabelle 5.7 und Abbildung 5.4).

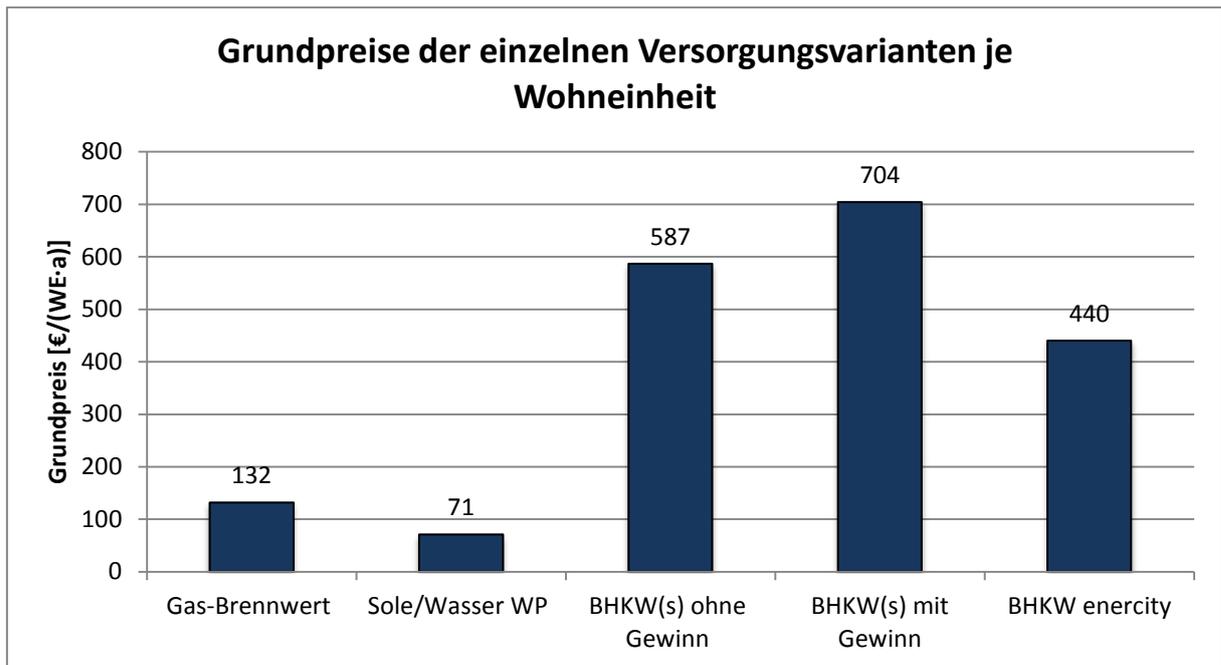


Abbildung 5.4 Übersicht der von den einzelnen Wohnungen zu zahlenden Grundpreise

Durch den hohen Grundpreis bei den Blockheizkraftwerken ist es möglich, niedrige Arbeitspreise anzubieten. Der Arbeitspreis der BHKW_s-Variante mit Gewinn ist um 0,5 Cent je kWh günstiger als bei der BHKW_e-Variante, die in diesem Fall das teuerste BHKW ist. Absolut betrachtet ist es knapp drei Cent teurer als die Brennwert-Variante. Ohne Gewinnzuschlag betragen die Mehrkosten der BHKW-Variante lediglich 31 Prozent, dies entspricht ca. 1,5 Cent/kWh (vgl. Tabelle 5.8).

Tabelle 5.8 Vergleich der Arbeitspreise je Kilowattstunde mit der Brennwertkessel-Variante

Wärmeversorgung	Arbeitspreis [Ct/kWh]	Abweichung zur Referenzvariante - absolut [Ct/kWh]	Abweichung zur Referenzvariante - relativ [%]
Gas-Brennwert	4,63	0	100
Sole/Wasser WP	22,37	17,74	483
BHKW, <u>ohne</u> Gewinn	6,07	1,44	131
BHKW, <u>mit</u> Gewinn	7,28	2,65	157
BHKW enercity	7,70	3,07	166

Die Kilowattstunde des Naturstroms für den Betrieb der Wärmepumpen ist fast um ein Fünffaches teurer als das Gas der Referenzvariante (vgl. Abbildung 5.5).

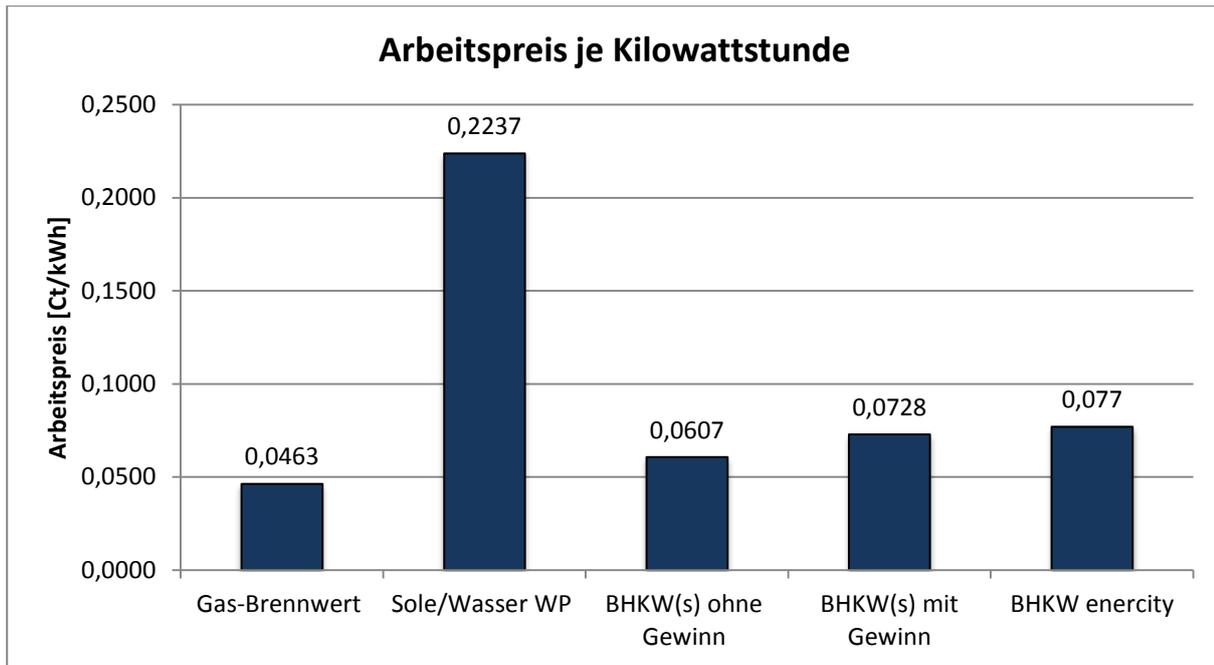


Abbildung 5.5 Darstellung der Preise, die die Kilowattstunde Strom, Gas oder Wärme den Verbraucher kostet (e.on, 2014; Vattenfall, 2014, sumbi, 2014; enercity contracting, 2014)

5.5.2 Zusammensetzung der Vollkosten

In der Summe der Vollkosten ist die Variante BHKW_s ohne Gewinnzuschlag die günstigste. Sie ist fünf Prozent günstiger als die Brennwert-Variante. Die BHKW-Variante mit Gewinn ist elf Prozent teurer als die Referenzvariante (vgl. Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9 Relativer Vergleich der einzelnen Bestandteile der Vollkosten zur Referenzvariante Brennwertkessel. Es werden die Summen der für die gesamte Siedlung anfallenden Kosten verglichen

Wärmeversorgung	Kapitalk. [%]	Arbeitsk. [%]	Grundk. [%]	Betriebsgebundene K. [%]	Vollk. [%]
Gas-Brennwert	100	100	100	100	100
Sole/Wasser WP	184	129	54	184	161
BHKW _s ohne Gewinn	20	155	618	7	95
BHKW _s mit Gewinn	20	186	742	7	111
BHKW enercity	78	197	455	26	125

Die Vollkosten setzen sich bei den Varianten unterschiedlich zusammen. Die Wärmepumpen-Variante hat bereits die größten Investitionskosten. Da die Kapital- und betriebsgebundenen Kosten direkt von den Investitionskosten abhängen, sind auch diese bei der Wärmepumpe am teuersten. Die Kapitalkosten der Wärmepumpe sind 84 Prozent größer als bei der Referenzvariante, bei der Summe der Vollkosten sind es 61 Prozent. Obwohl die Wärmepumpen den geringsten Endenergiebedarf haben, ist deren Betrieb um 29 Prozent teurer, was für die gesamte Siedlung Mehrkosten von ca. 10.000 Euro im

Jahr gegenüber der Brennwertkessel-Variante bedeutet (vgl. Abbildung 5.6). Grund hierfür ist der hohe Arbeitspreis (vgl. vorheriges Kapitel).

Bei der BHKW_e-Variante sind die gesamten Vollkosten um 13 Prozent höher als die BHKW_s-Variante mit Gewinn und sie ist um 25 Prozent teurer als die Brennwert-Variante.

Die BHKW-Varianten sind in den Punkten Kapital- und betriebsgebundene Kosten erheblich günstiger als die Brennwert-Variante (vgl. Abbildung 5.6). Dies liegt daran, dass die eigentliche Anlagentechnik, die für die Wärmeerzeugung benötigt wird, über die Grundkosten abgerechnet wird. Diese sind wiederum bei den BHKW fünf bis sieben Mal so groß wie bei der Brennwert-Variante.

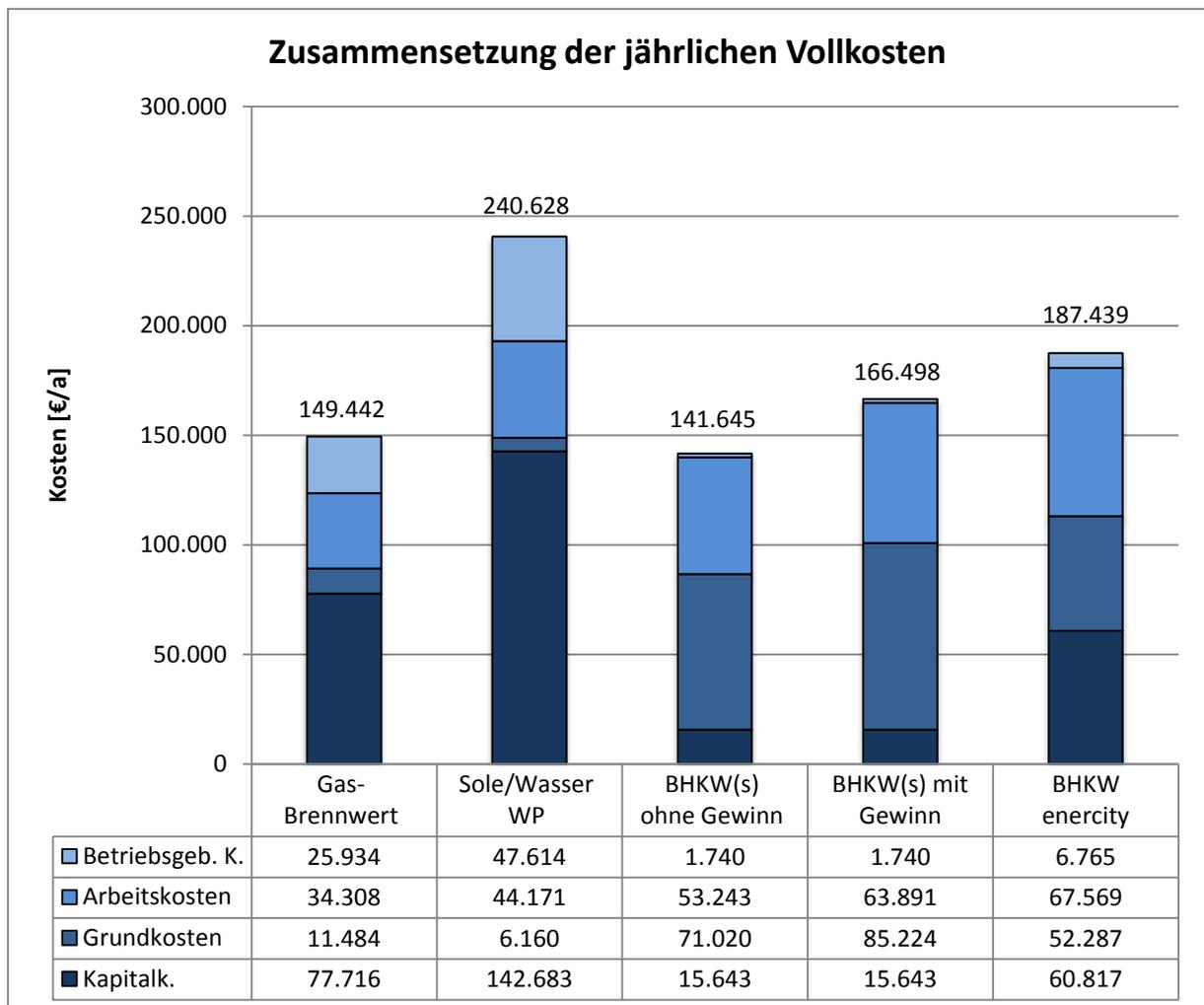


Abbildung 5.6 Vergleich der Vollkosten aufgegliedert in ihre Bestandteile. Die Energieversorgungskosten werden in Wärme- und Grundkosten aufgeteilt

5.5.3 Vollkosten je Wohneinheit

Um Interessenten das Bauvorhaben vorzustellen, eignen sich geschätzte Kosten pro Jahr je Wohneinheit. Die Vollkosten werden durch die 120 Wohneinheiten und der Kindertagesstätte geteilt, wobei hier die Gebäudetypen, sowie die Größen der Wohnungen nicht berücksichtigt werden.

Pro Jahr ist die BHKW_s-Variante ohne Gewinn 64 Euro je Wohneinheit günstiger als die Brennwert-Variante. Bei den BHKW_s mit Gewinn entstehen für jede Wohneinheit Mehrkosten in Höhe von 141 Euro im Jahr gegenüber der Referenzvariante, während der Unterschied zum BHKW_s ohne Gewinn 205 Euro pro Jahr beträgt. Das BHKW_e kostet 314 Euro/(a·WE) mehr als die Brennwert-Variante (vgl. Abbildung 5.7).

Während das BHKW_s deutliche Einsparungen bei den Treibhausgas-Emissionen gegenüber der Brennwert-Variante erzielt, mit denen die Mehrkosten gerechtfertigt werden können, ist dies beim kleinen BHKW von enercity contracting in der aktuellen Version nicht der Fall.

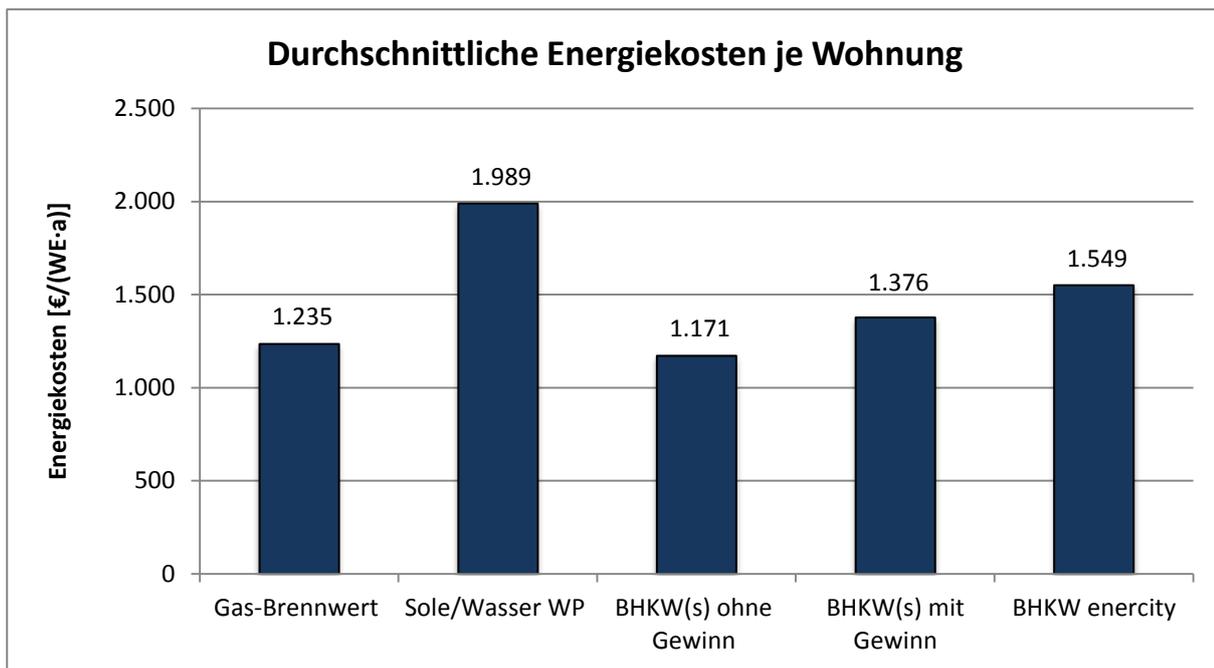


Abbildung 5.7 Die jährlich anfallenden Energiekosten je Wohnung wurden pauschal auf alle Wohnungen gerechnet, unabhängig vom Gebäudetyp oder Wohnungsgröße. Die Kindertagesstätte gilt hier ebenfalls als Wohnung

5.5.4 Spezifische Wärmeerzeugungskosten

Die spezifischen Wärmeerzeugungskosten beinhalten alle Kosten, die bis zur Erzeugung einer Kilowattstunde Wärme anfallen.

Die Kilowattstunde Wärme ist beim BHKW ohne Gewinn 0,89 Cent günstiger als bei der Referenzvariante. Werden die Verluste beim Nahwärmenetz berücksichtigt, verringert sich die Einsparung gegenüber der Referenzvariante um etwa die Hälfte. Die BHKW_s-Variante mit Gewinn ist knapp zwei Cent beziehungsweise etwa 11 Prozent teurer als die Referenz-Variante (vgl. Tabelle 5.10)

Tabelle 5.10 Vergleich der Wärmeerzeugungskosten mit der Referenzvariante

Wärmeerzeugung	spezifische Wärmeerzeugungskosten [Ct/kWh]	Abweichung zur Referenzvariante - absolut [Ct/kWh]	Abweichung zur Referenzvariante - relativ [Ct/kWh]
Gas-Brennwert	17,03	--	--
Sole/Wasser WP	27,42	+10,39	161
BHKW _s ohne Gewinn	16,14	-0,89	95
BHKW _s 25% ohne Gewinn	16,60	-0,43	97
BHKW _s mit Gewinn	18,97	+1,94	111
BHKW _s 25% mit Gewinn	19,52	+2,49	115
BHKW enercity	21,36	+4,33	125

Die spezifischen Wärmeerzeugungskosten liegen beim BHKW_s 25% ohne Gewinn bei 16,60 Cent/kWh. Dies liegt 22 Prozent unter den Kosten, die auf Basis der Werte von enercity contracting ermittelt wurden. Dieser Unterschied rührt vermutlich von den Kosten für die periphere Anlagentechnik und abweichenden betriebsgebundenen Kosten, die enercity contracting miteinkalkuliert hat. Das BHKW_s 25% mit Gewinn nähert sich den spezifischen Wärmekosten von enercity contracting an, ist jedoch nach wie vor 1,84 Cent/kWh beziehungsweise neun Prozent günstiger (vgl. Abbildung 5.8).

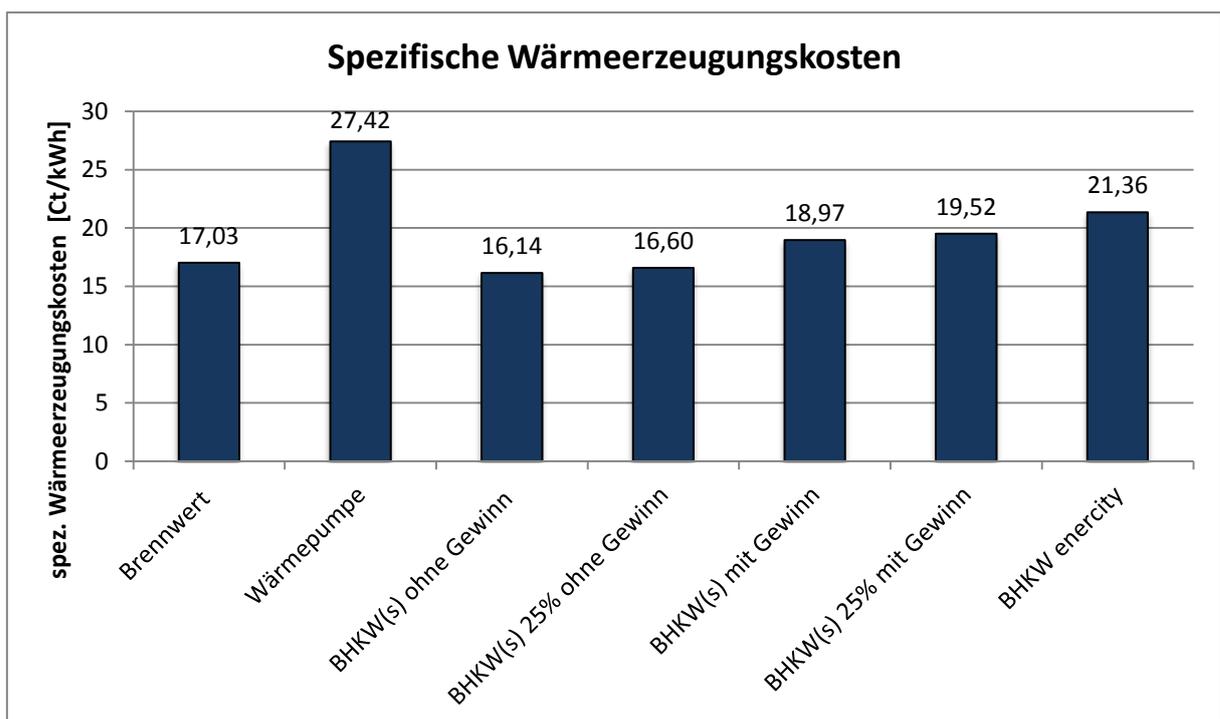


Abbildung 5.8 In den spezifischen Wärmeerzeugungskosten werden alle jährlich anfallenden Kosten (inklusive Kapitalkosten, ungleich dem Arbeitspreis aus Kapitel 4.2.4) durch die benötigte Wärme geteilt

Die Kilowattstunde aus der Wärmepumpe ist mehr als zehn Cent teurer als die aus dem Brennwertkessel. Dies entspricht Mehrkosten in Höhe von 61 Prozent. Obwohl sie energetisch und bezüglich der Emissionen am besten abschneidet, ist diese Variante verhältnismäßig teuer.

Anpassung des Nahwärmenetzes

Abschließend wird betrachtet, welchen Effekt eine Anpassung des Nahwärmenetzes des BHKW_s an das von enercity contracting kalkulierte Netz hat. Es wird das Nahwärmenetz der Variante BHKW_s 25% angepasst (vgl. Kapitel 4.2.2). Somit stammen die Zahlen der Tabelle 5.11 aus BHKW-Varianten, deren Nahwärmenetze energetisch und finanziell bestmöglich aneinander angepasst sind.

Tabelle 5.11 Vergleich spezifischen Wärmeerzeugungskosten der BHKW(s)-25%-Varianten vor und nach der Anpassung der Trassenlänge des Nahwärmenetzes (der Gewinn beim BHKW(s) beträgt 20%)

Varianten	„sumbi“-Trassen [Ct/kWh]	„enercity“- Trassen [Ct/kWh]	Relative Änderung inner- halb der Variante[%]	Relative Abweichung zum BHKW(e) [%]
BHKW _e	--	21,36	--	--
BHKW _s 25% <u>ohne</u> Gewinn	16,60	19,60	118	92
BHKW _s 25% <u>mit</u> Gewinn	19,52	22,09	113	103

Durch die angepasste Kalkulation der Größe des Nahwärmenetzes nähern sich die Werte für das BHKW_s 25% an die von dem BHKW_e an. Die BHKW_s-Variante ohne Gewinn ist etwa 1,76 Cent/kWh günstiger als das BHKW_e, während das BHKW_s 25% mit Gewinn 0,73 Cent/kWh teurer als das BHKW_e ist. Senkt man den Gewinnanteil von zwanzig auf zehn Prozent, erhält man die gleichen spezifischen Wärmeerzeugungskosten wie sie auf Basis der Zahlen von enercity contracting ermittelt wurden.

Die BHKW_s 25%-Variante ohne Gewinn bleibt damit weiterhin günstiger als das BHKW_e. Diese Aussage ändert sich trotz Anpassung des Nahwärmenetzes nicht. Das BHKW_s 25% ohne Gewinn ist nun 2,57 Cent teurer als die Referenzvariante. Obwohl auch das BHKW_s 25% mit Gewinn deutlich teurer geworden ist, bleibt die Wärmepumpen-Variante nach wie vor mit einem Abstand von 5,33 Cent/kWh die teuerste Variante.

Durch die annähernde Verdopplung der Trassenlänge ergibt sich eine Kostenerhöhung von 18 Prozent bei der Variante ohne Gewinn beziehungsweise 13 Prozent bei der Variante mit Gewinnzuschlag.

5.6 Szenarien

5.6.1 Szenario I

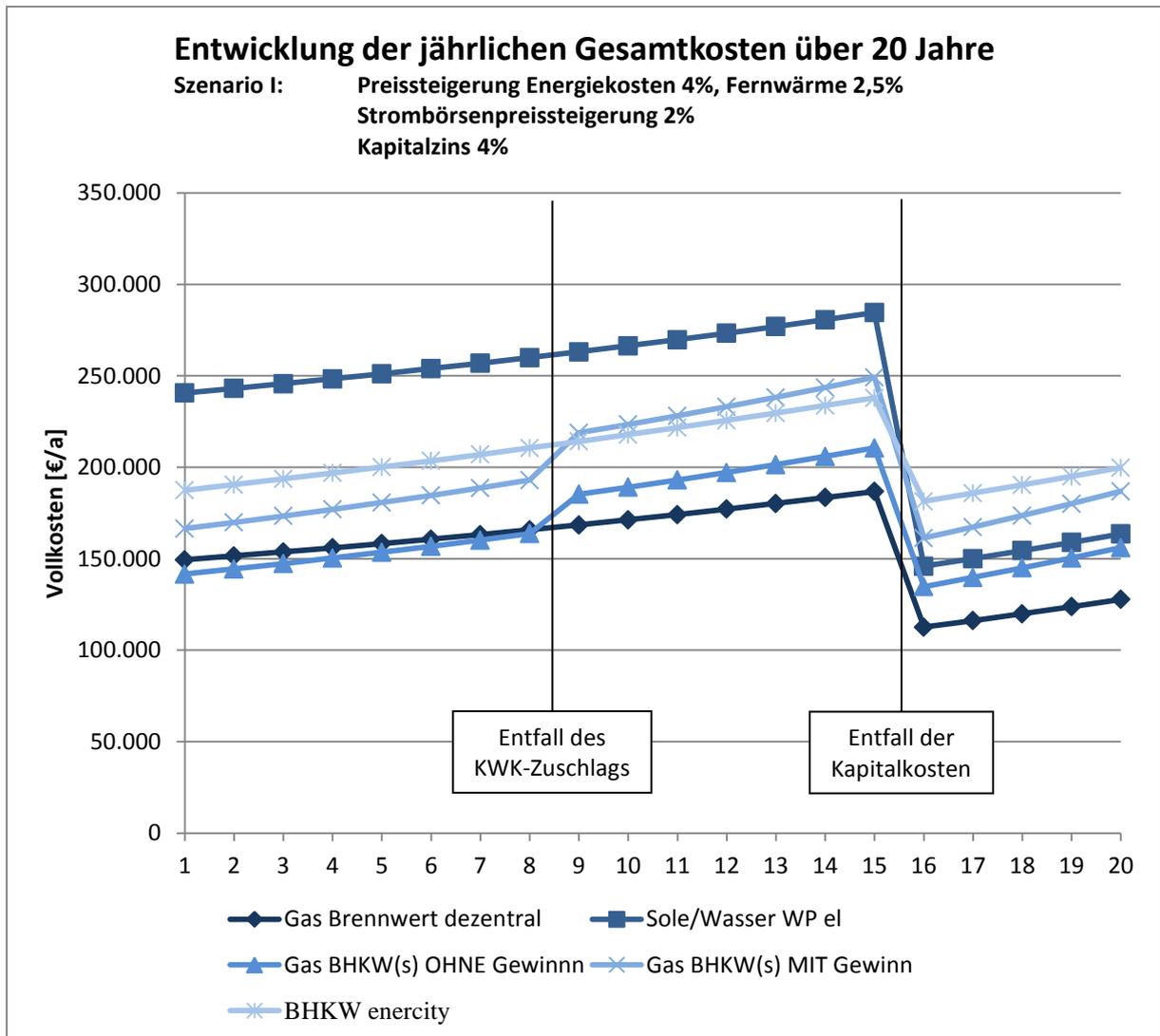


Abbildung 5.9 Im ersten Szenario steigen die Brennstoffkosten um vier Prozent je Jahr

Zunächst ist das BHKW_s ohne Gewinn die günstigste Variante. Sobald der KWK-Zuschlag entfällt, ist die Brennwert-Variante am günstigsten. Das bleibt sie über den gesamten betrachteten Zeitraum hinweg.

Nachdem die Investitionskosten abgezahlt sind, wird die Wärmepumpe günstiger als das BHKW_s mit Gewinn.

Da die BHKW-Varianten generell verhältnismäßig hohe Energieversorgungskosten haben, werden sie stärker durch den Anstieg der Brennstoffkosten beeinflusst. Man sieht in Abbildung 5.9, dass das BHKW_s ohne Gewinn nach einigen Jahren teurer als die Brennwert-Variante geworden wäre, selbst wenn der KWK-Zuschlag nicht entfallen würde.

Da beim BHKW_e ein geringer Kostenanstieg angesetzt wurde als bei den anderen Varianten, hat die Kurve eine ähnliche Steigung, obwohl sie bei den Vollkosten die teuerste BHKW-Variante ist. Sobald beim BHKW_s mit Gewinn der KWK-Zuschlag entfällt, ist das BHKW_e günstiger. Jedoch sinken die Vollkosten beim BHKW_s mehr, sobald die Kapitalkosten entfallen. Ab diesem Zeitpunkt ist das BHKW_s günstiger. Die Kurven nähern sich aber sichtbar einander an.

5.6.2 Szenario II

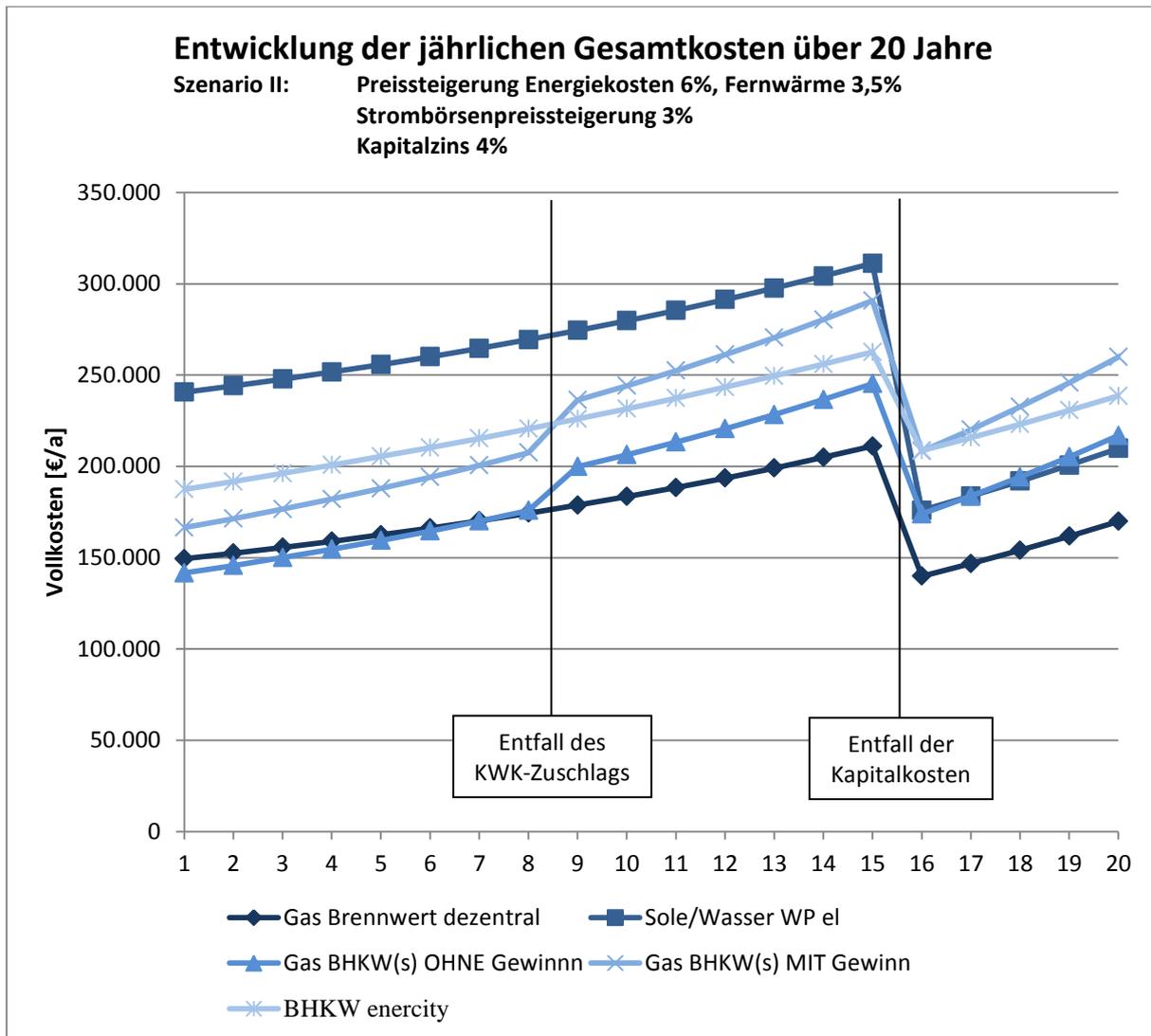


Abbildung 5.10 Die Brennstoffkosten werden im zweiten Szenario jedes Jahr um sechs Prozent teurer

Wie in Abbildung 5.10 zu sehen ist, verlaufen die Kurven um einiges steiler als beim ersten Szenario. Man erkennt, dass bereits im achten Jahr - vor dem Entfall des KWK-Zuschlags - das BHKW_s ohne Gewinn ein wenig teurer als die Brennwert-Variante ist. Der Entfall des KWK-Zuschlags verstärkt den Kostenunterschied.

Nach etwa 18 Jahren sind die Vollkosten bei der Wärmepumpen-Variante und der BHKW_s-Variante ohne Gewinn ähnlich groß und im darauf folgenden Jahr ist der Betrieb der Wärmepumpe günstiger.

Durch die getroffenen Annahmen bezüglich der Preissteigerung steigen die Kosten für die BHKW_s-Varianten steiler an, als die BHKW_e-Variante. Dadurch wird das BHKW_e bis zum 15. Jahr deutlich günstiger als die BHKW_s-Variante mit Gewinn. Nachdem die Kapitalkosten entfallen, sind die beiden Varianten zunächst gleich teuer, wobei in den darauf folgenden Jahren das BHKW_e wieder günstiger wird.

5.7 Bewertung des Strombedarfes

Mit den getroffenen Annahmen wird das BHKW_s 447 MWh Strom pro Jahr produzieren. Gleichzeitig wird das kleinere BHKW_e mit 366 MWh/a rund 18 Prozent weniger Strom erzeugen (vgl. Abbildung 5.11). Die RLT-Anlagen benötigen nur etwas mehr als ein Zehntel des produzierten BHKW_s-Stroms. Besonders unvorteilhaft ist, dass die RLT-Anlagen das gesamte Jahr durchlaufen, während das BHKW gerade einmal 3.634 Vollbenutzungsstunden hat. Die Nutzung des BHKW-Stroms für die RLT-Anlagen alleine würde sich demnach bei beiden BHKW-Varianten nicht lohnen.

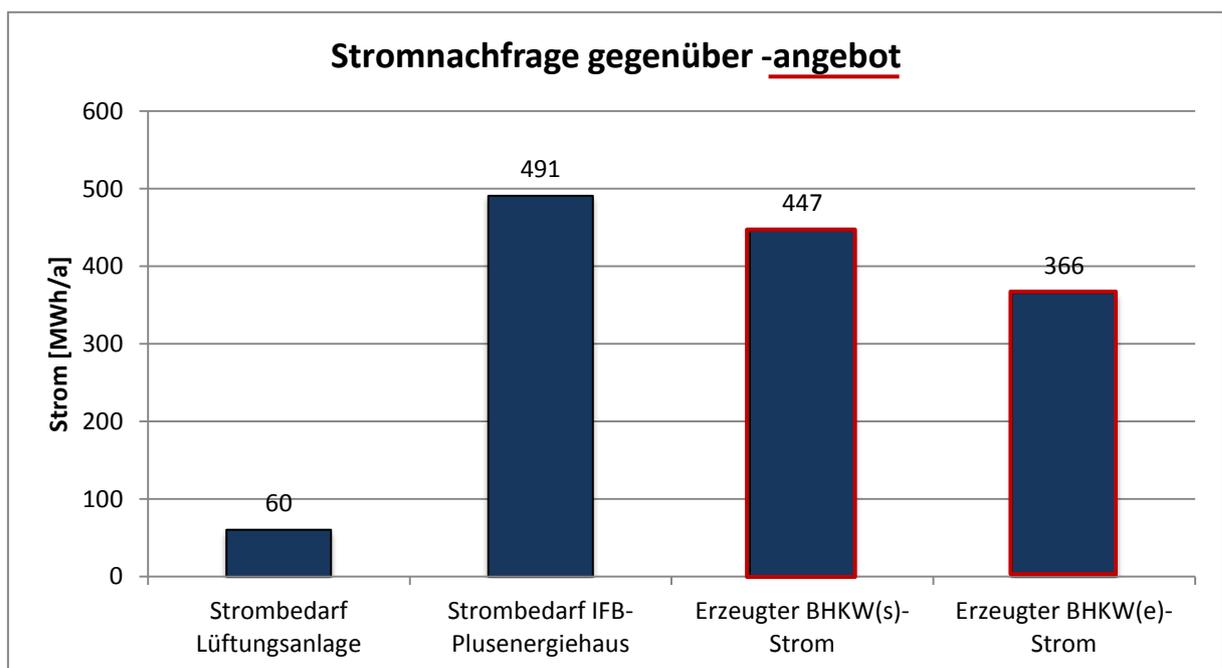


Abbildung 5.11 Gegenüberstellung der abgeschätzten Stromnachfrage und der durch die BHKW produzierten Strommengen (die Säulen des produzierten Stroms sind durch die rote Umrandung hervorgehoben)

Der geschätzte Mindest-Strombedarf der Siedlung ließe sich zu 91 Prozent mit dem BHKW_s und zu 75 Prozent vom BHKW_e decken. Da es sich bei der Abschätzung des Strombedarfes der Siedlung um eine Minimum-Rechnung handelt, ist davon auszugehen, dass der reale Deckungsgrad kleiner als der berechnete sein wird.

Problem bei einem BHKW ist, dass die Nachfrage nach Strom und nach Wärme nicht immer zeitlich erfolgen. Zwar kann man durch die Nutzung von Warmwasserspeichern die Wärmeproduktion vom

Wärmebedarf zeitlich entkoppeln, doch ist anzunehmen, dass im Sommer der produzierte Strom nicht der Nachfrage entsprechen wird, während im Winter ein Überangebot herrschen könnte.

5.8 Zusammenfassung

Tabelle 5.12 Übersicht, welche Variante in welcher Kategorie gut beziehungsweise nicht so gut abgeschnitten hat (das BHKW wird nur mit Stromgutschrift betrachtet, die Variante enercity wird hier nicht bewertet)

Kategorie	Beste Variante	Schlechteste Variante
Effizienzhaus-Standard	Wärmepumpe	Brennwert
Primärenergiebedarf	Wärmepumpe	BHKW
Treibhausgas-Emissionen	BHKW	Brennwert
Investitionskosten	Brennwert	Wärmepumpe
Vollkosten	BHKW ohne Gewinn	Wärmepumpe
Szenario	Brennwert	BHKW/Wärmepumpe

Die Wärmepumpe erreicht unter den getroffenen Annahmen den Effizienzhaus-Standard-40. Darüber hinaus sind der Primärenergiebedarf und die Treibhausgas-Emissionen bei dieser Variante am niedrigsten. Die Investitions- und Vollkosten sind im Vergleich dazu die teuersten.

Die Brennwert-Variante ist auf lange Sicht am günstigsten. Der energetische Abstand zu Effizienzhaus-40 sowie die Treibhausgas-Emissionen sind mit etwa sechs kWh/(m²·a) relativ groß.

Das BHKW_s stößt die wenigsten CO₂-Äquivalente aus, hat aber den höchsten Primärenergiebedarf, wobei es im letzten Punkt nur minimal schlechter abschneidet als der Brennwertkessel. Das BHKW_s ohne Gewinn ist zunächst etwas günstiger als die Referenzvariante. Werden jedoch jährliche Preissteigerungen bei den Brennstoffen angenommen und fällt der BHKW-Zuschlag weg, wird diese Variante auf lange Sicht teurer als die Brennwert-Variante.

Beim BHKW_e sind die Investitionskosten für den Hausbesitzer gering, dennoch sind die Vollkosten größer als bei den anderen Varianten. Dadurch, dass das BHKW kleiner dimensioniert wird, ist der Energiebedarf in dieser Variante im Vergleich am größten und gegenüber der Brennwert-Variante werden nur wenige CO₂-Äquivalente weniger ausgestoßen. Dem Investor wird nahe gelegt, dass er sich von enercity contracting eine Variante mit einer elektrischen Wärmepumpe für die Mittellast erstellen lassen soll. Es wird damit gerechnet, dass es hier zu erheblich geringeren Energiebedarfen und Treibhausemissionen kommen wird. Vermutlich werden der Arbeits- und Grundpreis steigen und es ist zu prüfen, ob die Kosten für die Siedlung noch attraktiv sind.

6 Uhlenhorst 12

Bereits im Jahr 2010 erarbeitete sumbi ein ähnliches Gutachten für das Quartier Uhlenhorst 12. Dabei wurden, abweichend zu den hier dargestellten Berechnungen, neben vier unterschiedlichen Wärmeerzeugern (Brennwert-Kessel & Solar, Wärmepumpe dezentral, Fernwärme, Nahwärme über Abwasser-siel-Wärmepumpe) auch drei Energiestandards (EnEV 2009, Effizienzhaus 70, Passivhaus) abgebildet und verglichen (sumbi, 2010 S. 7f).

Die Ergebnisse aus dem Gutachten sind in die Begründung für das Bauvorhaben Uhlenhorst 12 eingegangen. Man ist zu dem Schluss gekommen, dass ein totaler Anschlusszwang planungsrechtlich nicht umsetzbar ist und aus diesem Grund wird ein zentrales Nahwärmenetz abgelehnt. Des Weiteren gibt es keinen gesetzlichen Rahmen für eine Regelung, mit der man den Passivhausstandard für ein Bauvorhaben festlegen kann. Daher wird geplant, mit den zukünftigen Eigentümern den Passivhausstandard zu vereinbaren und so dafür zu sorgen, dass die ersten 25 Prozent der geplanten Stadthäuser diesen Gebäudestandard umsetzen (Begründung U, 2013 S. 47f).

Im Folgenden soll das Bauvorhaben Uhlenhorst mit der hier betrachteten Neubausiedlung verglichen werden. Wenn möglich wird zur Unterscheidung der beiden Bauvorhaben das Projekt Uhlenhorst beim Namen genannt. Ist dies nicht möglich, wird zur Abgrenzung die in dieser Bachelor-Arbeit berechnete Neubausiedlung als „aktuelle Neubausiedlung“ oder ähnliches bezeichnet.

6.1 Das Bauvorhaben Uhlenhorst 12

Im Rahmen der Nachverdichtung des Stadtteils Uhlenhorst entstand das Bauvorhaben „Uhlenhorst 12“. Im Gegensatz zu den vielen Einfamilienhaustypen, die in der aktuellen Siedlung geplant werden, werden im Bauvorhaben Uhlenhorst 12 ausschließlich Reihenhäuser und große Mehrfamilienhäuser mit zum Teil bis zu 80 Wohneinheiten je Gebäude vorgesehen (entnommen aus der Hottgenroth-Datei auf der das Gutachten beruht). Dabei besitzen die Reihenhäuser bis zu drei Geschosse, während die Mehrfamilienhäuser bis zu fünf Stockwerke haben (Hamburg, 2013). Insgesamt sollen etwa 650 Wohneinheiten entstehen (Begründung U, 2013 S. 8).

Das Gutachten von sumbi besagt, dass ein höher energetischer Standard den größten Effekt durch die Senkung des Energiebedarfes und der Treibhausgasemissionen hat. Wenn man den Passivhausstandard vorschreiben kann, dann ist es möglich den Bauherren die Wahl der Wärmeversorgung zu überlassen. Sollte eine Vorschrift für den Gebäudestandard nicht möglich sein, sollte man eine zentrale Versorgung wählen (Begründung U, 2013 S. 47).

6.2 Vergleich der beiden Bauvorhaben

Bei dem Vergleich des hier betrachteten Bauvorhabens mit dem Bauvorhaben Uhlenhorst zeigt sich, dass die Art der Bebauung erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse und Aussagen der Berechnungen hat.

Anhand des mittleren Heizwärmebedarfes der Reihen- und Mehrfamilienhäuser sollen die drei Gebäudestandards aus dem Gutachten des Bauvorhabens Uhlenhorst mit den Effizienzhäusern-40₁₄ aus dem aktuellen Bauvorhaben verglichen werden. Zunächst erwartet man, dass der mittlere Heizwärmebedarf je Quadratmeter Nutzfläche beim Passivhaus am geringsten ist, direkt gefolgt von den Effizienzhäusern-40₁₄, schließlich sind die Anforderungen des Effizienzhauses-40₁₄ weitaus strenger als beim Effizienzhaus-70₀₉. Während bei den Reihenhäusern dieser Erwartung entsprochen wird, zeigt sich bei den Mehrfamilienhäusern, dass der mittlere Heizwärmebedarf im aktuellen Projekt schlechter als beim Effizienzhaus-70₀₉ ist (vgl. Abbildung 6.1).

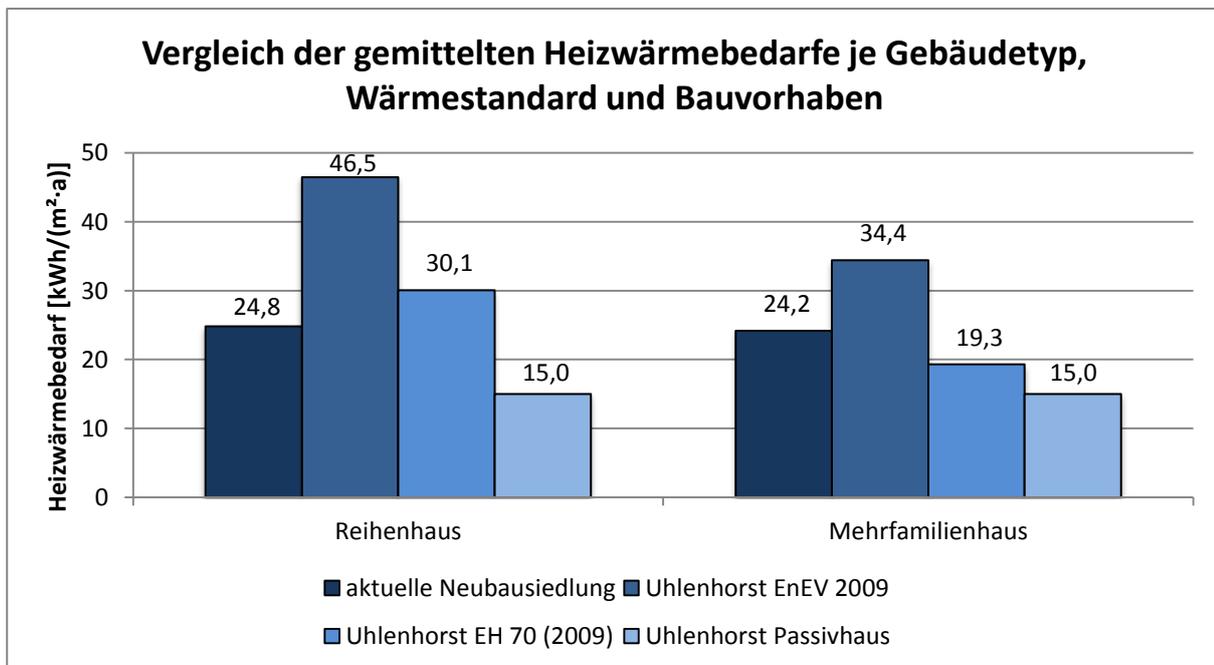


Abbildung 6.1 Vergleich der Heizwärmebedarfe von Reihen- und Mehrfamilienhäusern der beiden Bauvorhaben. Die Werte wurden je Gebäudetyp gemittelt

Dies liegt daran, dass die Mehrfamilienhäuser im aktuellen Projekt bedeutend kleiner sind als die Gebäude im Bauvorhaben Uhlenhorst. Dies bedingt ein deutlich besseres Verhältnis von Oberfläche zum umschlossenen Volumen (A/V-Verhältnis) der Mehrfamilienhäuser im Uhlenhorst. Bei den Mehrfamilienhäusern im aktuellen Projekt liegt das A/V-Verhältnis im Mittel bei 0,50, während im Uhlenhorst ein Verhältnis von 0,35 erreicht wird. Ein kleines A/V-Verhältnis bedeutet geringere Verluste über die Gebäudehülle.

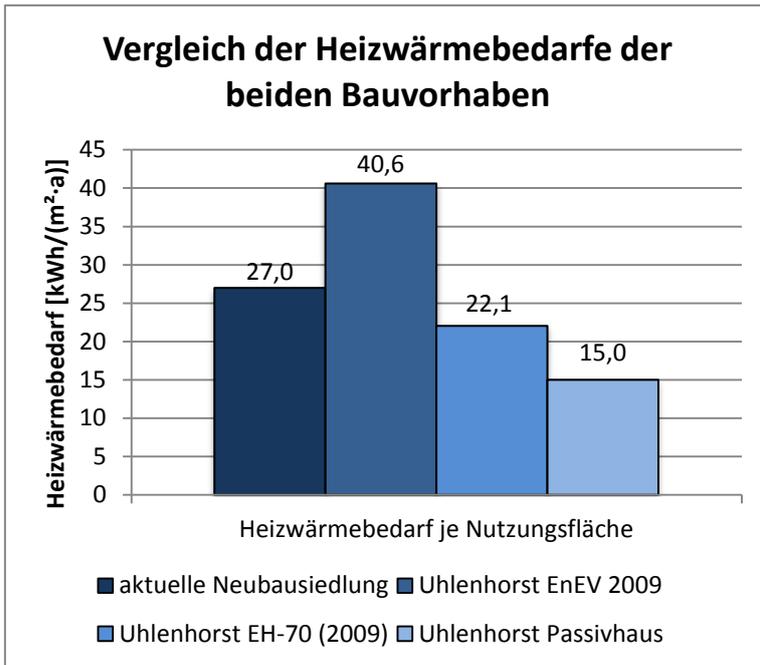


Abbildung 6.2 Vergleich der beiden Bauvorhaben anhand der gemittelten Heizwärmebedarfe der gesamten Siedlung je Quadratmeter Nutzfläche

Vergleicht man nun die gemittelten Heizwärmebedarfe bezogen auf die Nutzfläche der gesamten Siedlung, zeigt sich, dass die Effizienzhäuser-70₀₉ einen geringeren Bedarf haben als die Effizienzhäuser-40₁₄ (vgl. Abbildung 6.2).

Dieses Ergebnis hängt direkt mit der Zusammensetzung der Gebäudetypen innerhalb eines Quartiers zusammen. Dies kann man sehr gut mit dem aktuellen Bauvorhaben zeigen, da hier vier verschiedene Gebäudetypen geplant werden. Je mehr sich der Gebäudetyp von

einem Einfamilienhaus zu einem Mehrfamilienhaus bewegt, desto geringer ist der Heizwärmebedarf je Quadratmeter Nutzfläche. So ist dieser Bedarf beim Mehrfamilienhaus im aktuellen Neubaugebiet um 21 Prozent geringer als bei einem Einfamilienhaus (vgl. Abbildung 6.3). Da in der aktuellen Siedlung vergleichsweise wenige Wohneinheiten in Mehrfamilienhäusern entstehen, ist der Einfluss des größeren Heizwärmebedarfs der Einfamilienhaustypen deutlich am mittleren Heizwärmebedarf zu erkennen.

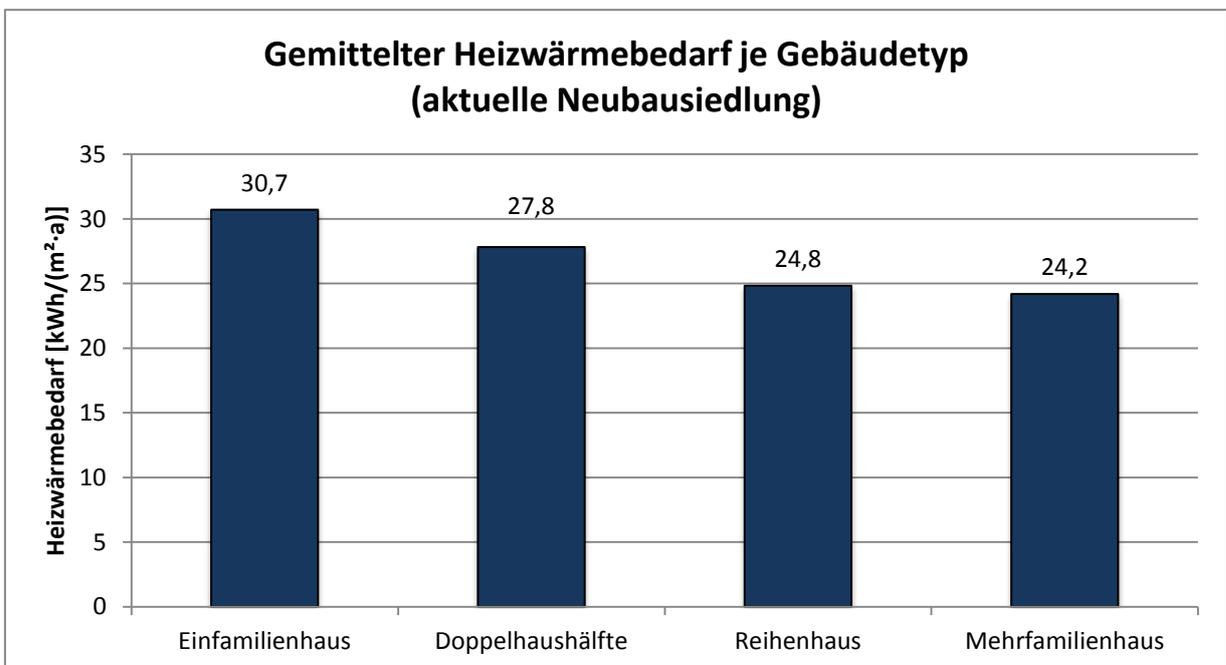


Abbildung 6.3 Vergleich der gemittelten Heizwärmebedarfe je m² Nutzfläche der verschiedenen Gebäudetypen anhand der in dieser Bachelor-Arbeit betrachteten Neubauesiedlung

Für das Quartier im Stadtteil Uhlenhorst werden fast fünfmal so viele Wohneinheiten vorgesehen wie für das aktuelle Projekt. Des Weiteren kommt beim Bauvorhaben Uhlenhorst hinzu, dass es im nahe-
liegenden Bestand Bürogebäude gibt, deren Wärmebedarf mit betrachtet werden sollte. Insbesondere bei einer zentralen Wärmeversorgung haben die Nichtwohngebäude einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Denn durch sie erhöht sich die Grundlast zumindest in der Heizperiode. Bei Büroräumen und Kindertagesstätten ist oftmals die Warmwasserversorgung über eine zentrale Heizungsanlage nicht sinnvoll. Daher werden diese meistens über dezentrale elektrische Warmwassergeräte versorgt. Dadurch entsteht in der Summe ein größerer Wärmebedarf, deren Deckung über beispielsweise ein BHKW wirtschaftlich vorteilhafter sein kann (vgl. Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Übersicht über die Wärmebedarfe und die Heizlast der beiden betrachteten Siedlungen samt Nichtwohngebäude

	Uhlenhorst EH 70 (EnEV 2009)	Uhlenhorst Passivhaus	Aktuelle Siedlung EH 40 (EnEV 2014)
Heizwärmebedarf [MWh]	1.234	845	464
Warmwasserbedarf [MWh]	631	631	232
Heizlast [kW]	1.597	560	544

Aus finanzieller Sicht sind Mehrfamilienhäuser den Einfamilienhäusern ebenfalls im Vorteil. Zwar werden größere Anlagen benötigt und je nach Versorgungsvariante ist die Installation aufwändiger, jedoch sind die Investitionskosten je Kilowatt Leistung günstiger.

Im Gegensatz zu der in dieser Arbeit berechneten Siedlung wurden beim Bauvorhaben Uhlenhorst die Kosten für den Bau einer effizienteren Gebäudehülle bei der Ermittlung der spezifischen Wärmeerzeugungskosten berücksichtigt. Die spezifischen Wärmeerzeugungskosten der Variante dezentrale Luft/Wasser-Wärmepumpen sind bei den Gebäudestandards EnEV 2009 und Effizienzhaus-70₀₉ am günstigsten. Lediglich beim Passivhaus ist die Brennwertvariante günstiger (vgl. Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite).

Selbst wenn bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe im aktuellen Projekt die Kosten für die Erschließung des Erdreichs und die Pufferspeicher nicht miteinkalkuliert werden, bleiben die spezifischen Wärmeerzeugungskosten mit 20,59 Cent/kWh sehr hoch. Gründe hierfür sind vermutlich, dass zum einen die Investitionskosten für die Wärmepumpen im Projekt Uhlenhorst günstiger sind. Zum anderen sinken die Preise je Kilowattstunde bei größeren Anlagen erheblich. Da in den großen Mehrfamilienhäusern höhere Leistungen benötigt werden, sind die Investitionskosten je Kilowattstunde thermischer Leistung geringer. Auf diese Weise können die spezifischen Wärmeerzeugungskosten der Wärmepumpen im Uhlenhorst geringer sein, obwohl der zu deckende Wärmebedarf deutlich größer als in dem aktuellen Projekt ist.

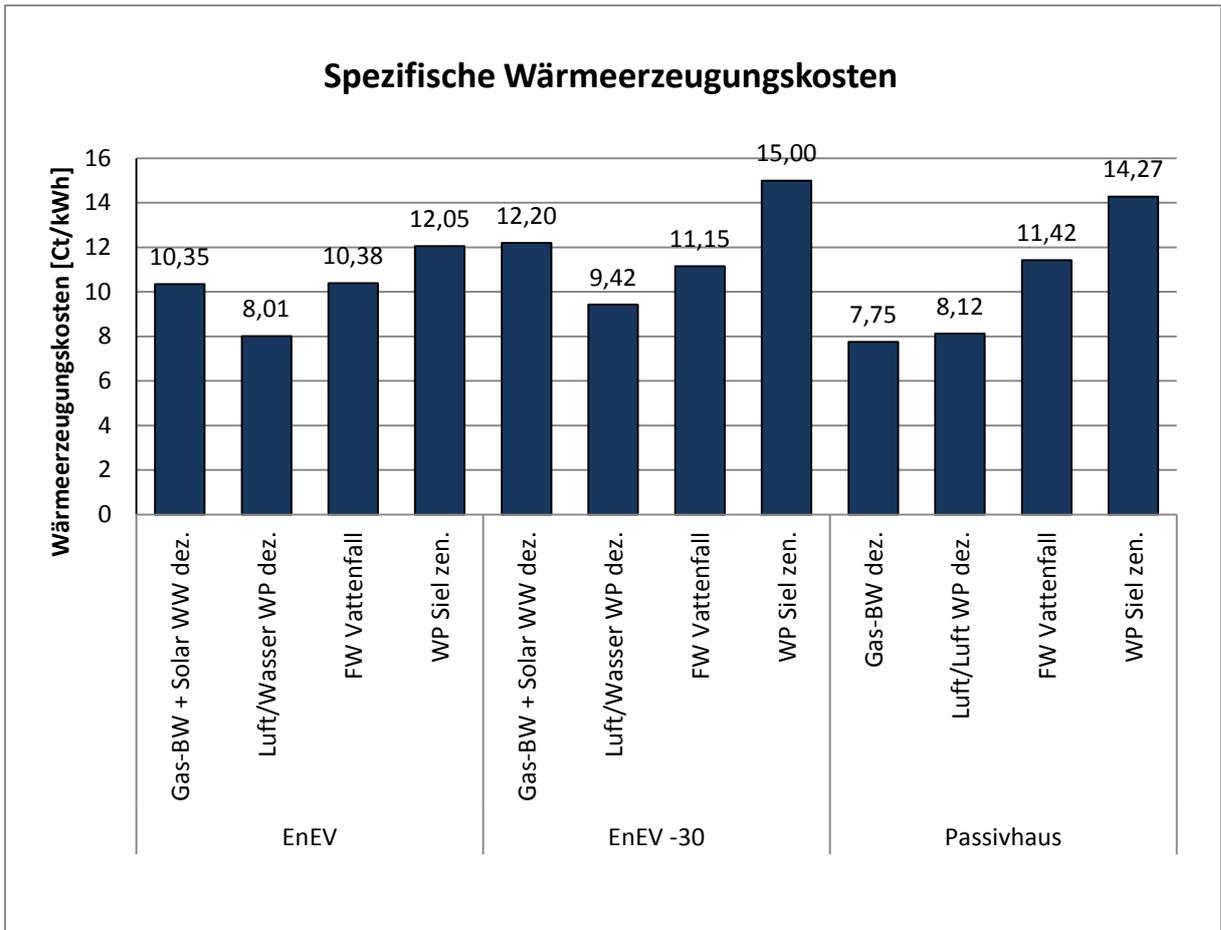


Abbildung 6.4 Graphische Darstellung der spezifischen Wärmeerzeugungskosten aus dem Projekt Uhlenhorst (sumbi, 2010)

Die Brennwertkessel verhalten sich ähnlich wie die Wärmepumpen. Je größer die Kesselleistung desto geringer ist der Preis je Kilowatt. Dieser Preisvorteil wird auch nicht durch die Annahme eines günstigeren Preises der Solarthermie im aktuellen Projekt ausgeglichen. So sind die spezifischen Wärmeerzeugungskosten der Brennwertvariante in der aktuellen Neubausiedlung höher als die Kosten aller anderen Varianten, die für das Bauvorhaben Uhlenhorst erstellt wurden.

7 Fazit

Energetisch betrachtet ist die Wärmepumpen-Variante für das hier untersuchte Bauvorhaben die beste Wahl, während aus finanzieller Sicht die Brennwert-Variante mit vergleichsweise geringen Investitionskosten und recht stabilen Vollkosten zu bevorzugen ist. Die BHKW-Varianten verbinden die Möglichkeit Treibhausgase einzusparen mit moderaten Preisen. Unter den getroffenen Annahmen und Rahmenbedingungen erreichen die BHKW-Varianten jedoch nicht den Effizienzhaus-Standard-40.

Im Gegensatz zu den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen ergab das Gutachten beim Bauvorhaben Uhlenhorst, dass die Luft/Wasser-Wärmepumpe sowohl energetisch als auch finanziell besser als die Brennwert-Variante abschneidet. Die abweichenden Ergebnisse bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe lassen sich auf die unterschiedlichen Gebäudetypen und deren Größe zurückführen. Die großen Mehrfamilienhäuser im Bauvorhaben Uhlenhorst sorgen dafür, dass wenige Anlagen mit einer großen Leistung benötigt werden, wodurch die Kosten je Kilowatt Leistung sinken. Es zeigt sich, dass sowohl aus energetischer als auch finanzieller Sicht der Bau von großen Mehrfamilienhäusern zu bevorzugen ist.

Generell gilt, je besser der Gebäudestandard ist, desto mehr fallen die Kosten für die Anlagentechnik ins Gewicht. Der Betrieb von Brennwertkesseln in energieeffizienten Gebäuden ist, wie man am Passivhaus im Uhlenhorst und bei den Ergebnissen in Kapitel 5 erkennen kann, die kostengünstigste Variante. Dieser Effekt wird sich in Zukunft verstärken, da im Rahmen des Klimaschutzes die Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden stetig steigen und somit der Wärmebedarf sinken wird.

Durch die Verschärfung der Grenzwerte für den erlaubten Jahres-Primärenergiebedarf mit der neuen EnEV erreichen die Gebäude meist einen schlechteren Effizienzhaus-Standard als es unter der EnEV 2009 der Fall gewesen wäre. Da die angenommene Anlagentechnik am üblich verwendeten Standard orientiert ist, zeigt sich, dass die neue EnEV direkten Einfluss auf die Bewertung der Anlagentechnik hat und sich bereits bei den Effizienzhausstandards eine Wärmeversorgung eingebaut werden muss, die zunehmend in Richtung des Nullenergiehauses geht.

Mit dem Niedrigstenergiegebäude nach EnEG müssten die in dieser Arbeit betrachteten Gebäude des Effizienzhaus-Standards-40 im Durchschnitt weitere 21 kWh/(m²·a) einsparen, beziehungsweise diese durch andere Methoden wie beispielsweise den Betrieb einer Photovoltaik-Anlage kompensieren. Durch die Senkung des Primärenergiefaktors für Strom sinkt auch der Jahres-Primärenergiebedarf der elektrisch betriebenen Wärmepumpe um 31 Prozent gegenüber der EnEV 2009. Daher könnte die Wärmepumpe in Kombination mit einer Photovoltaikanlage und entsprechender Regelungstechnik eine Variante sein, um das Niedrigstenergiegebäude zu erreichen.

Die Möglichkeit den von der Photovoltaik-Anlage erzeugten Strom in der Bilanzierung des Gebäudes gutzuschreiben, wird in Zukunft zu einem Nutzungskonflikt bei der Dachfläche führen. Durch Solarthermie erzeugte Wärme kann direkt einen Beitrag zum Anteil erneuerbarer Energien am Wärmebe-

reich leisten, während Strom eher selten zur Wärmeerzeugung genutzt wird, mit Ausnahme der Wärmepumpen und den Nachtspeicherheizungen im Gebäudebestand. Da Strom jedoch nach wie vor einen hohen Primärenergiefaktor hat, wird die Gutschrift des Stroms einen größeren Effekt auf den Jahres-Primärenergiebedarf haben als die solarthermische Wärme. Vermutlich wird daher der Bau einer Photovoltaikanlage bevorzugt werden und es ist daher anzunehmen, dass im Neubau die Nutzung von Solarthermie abnimmt.

Im Neubau wird spätestens ab dem Jahr 2021 der Primärenergiebedarf soweit sinken, dass die Auswirkungen auf den Anteil erneuerbarer Energien am Wärmebedarf sehr gering sind. Bei den Niedrigstenergiegebäuden ist es in erster Linie wichtig, dass der Gebäudestandard an sich erreicht wird. Der Anteil der erzeugten erneuerbaren Energien, unabhängig von der Energieform, wird mit der Verschärfung zunehmen. Dabei ist es zweitrangig, wie die verbleibende Wärmeenergie erzeugt wird. Der größere Effekt ist bei der Sanierung im Gebäudebestand durch Erhöhung der Energieeffizienz und Erzeugung des verbleibenden Wärmebedarfs über regenerative Energien zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- AGEB. 2014.** AG Energiebilanzen e.V. - Daten und Fakten - Primärenergieverbrauch - Jahr 2013 aktualisiert am 18. März 2014. *Witterung treibt Energieverbrauch.* [Online] 18. März 2014. [Zitat vom: 18. März 2014.] <http://www.ag-energiebilanzen.de/DE/daten-und-fakten/primaerenergieverbrauch/primaerenergieverbrauch.html>.
- , **2013.** AG Energiebilanzen e.V. - Presse - Berichte. *Energieverbrauch in Deutschland - Daten für das 1. bis 4. Quartal 2013.* [Online] 18. Dezember 2013. [Zitat vom: 18. März 2014.] <http://www.ag-energiebilanzen.de/DE/presse/berichte/berichte.html>.
- Agentur für Erneuerbare Energie e.V. 2013.** unendlich-viel-energie.de. *Erneuerbare Wärme ist dank staatlicher Förderung günstiger den je.* [Online] 09. August 2013. [Zitat vom: 28. April 2014.] <http://www.unendlich-viel-energie.de/themen/politik/deutschland/alte-heizungsanlagen-verschlechtern-deutschlands-klimabilanz2>.
- AGFW.** Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. *Liste der fP-Bescheinigungen - Häufig gestellte Fragen.* [Online] [Zitat vom: 15. April 2014.] <https://www.agfw.de/service/primaerenergiefaktoren/>.
- ASUE. 2011.** ASUE - Themen - Blockheizkraftwerke - BHKW-Tools . *Kenndaten aus den BHKW-Kenndaten 2011.* [Online] 2011. [Zitat vom: 25. März 2014.] <http://asue.de/themen/blockheizkraftwerke/bhkw-tools/bhkw-kenndaten-anbieter-2011-kopie.html>.
- BAFA.** bafa.de - Energie - Kraft-Wärme-Kopplung - Wärme- und Kältenetze - KWK-Zuschlag. *Wärme- und Kältenetze - KWK-Zuschlag.* [Online] [Zitat vom: 04. März 2014.] http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/waerme_und_kaeltenetze/kwk-zuschlag/index.html.
- Begründung L. 2013.** *Begründung zum Bebauungsplan Lemsahl-Mellingstedt 20 Verfahrensstand: Entwurf zur TöB-Verschickung.* 10. Juli 2013.
- Begründung U. 2013.** hamburg.de. *Begründung zum Bebauungsplan Uhlenhorst 12.* [Online] Mai 2013. [Zitat vom: 09. April 2014.] <http://www.hamburg.de/contentblob/3345716/data/uh-12-begrueundung-auslegungsfassung%29.pdf>.
- Bezirksamt.** Hamburg.de - Bezirksamt Wandsbek. *Bebauungsplan-Entwurf Lemsahl-Mellingstedt 20.* [Online] [Zitat vom: 04. März 2014.] <http://www.hamburg.de/wandsbek/bebauungsplaene/3683948/bebauungsplanentwurf-lemsahl-mellingstedt-20.html>.

- BMUB. 2013.** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. *Kyoto-Protokoll*. [Online] 26. April 2013. [Zitat vom: 04. April 2014.]
<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/kyoto-protokoll/>.
- buderus. 2004.** buderus.de. *Fernwärme-Übergabestationen - Kompaktstationen*. [Online] 2004. [Zitat vom: 23. April 2014.] <http://www.buderus.de/sixcms/media.php/1086/Kompaktstation.pdf>.
- Bundesregierung. 2014.** Die Bundesregierung. *Anteil Erneuerbarer Energien wächst weiter*. [Online] 14. Januar 2014. [Zitat vom: 22. April 2014.]
<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2014/01/2014-01-13-bdew-energiebilanz-2013.html>.
- dena. zukunft haus. EnEV 2014.** [Online] [Zitat vom: 08. Januar 2014.] <http://www.zukunft-haus.info/gesetze-studien-verordnungen/enev-enev-historie/enev-2014.html>.
- e.on. 2014.** eon.de. *Privatkunden - Tarife & Angebote - Erdgastarife*. [Online] 2014. [Zitat vom: 03. März 2014.]
https://www.eon.de/de/eonde/pk/produkteUndPreise/Erdgas/E.ON_DirektErdgas/index.htm.
- EEG. 2012.** juris.de. *EEG - Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien - Aktuelle Gesamtausgabe*. [Online] 20. Dezember 2012. [Zitat vom: 08. März 2014.]
<http://www.juris.de/jportal/portal/page/homerl.psml?cmsuri=%2Fjuris%2Fde%2Fkostenfreieinhalte%2Ffinfokostenfreieinhalte.jsp&fcstate=5&showdoccase=1&doc.part=X&doc.id=BJNR207410008#BJNR207410008>.
- EEWärmeG. 2011.** Gesetze im Internet. *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)*. [Online] 22. Dezember 2011. [Zitat vom: 26. Februar 2014.] http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ew_rmeg/gesamt.pdf.
- EnEG. 2013.** Gesetze im Internet. *Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz - EnEG)*. [Online] 04. Juli 2013. [Zitat vom: 26. April 2014.]
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eneg/gesamt.pdf>.
- energycity contracting. 04. April 2014.** Gespräch und Unterlagen . *Indikative Konditionen und Wärmekosten für Nahwärmeversorgung Spechtort, Hamburg*. 04. April 2014.
- EnEV. 2009.** *EnEV kompakt. Textsammlung zur EnEV 2009 und den Wärmeschutzverordnungen*. s.l. : Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2009.
- enev-online. 2002.** enev-online.de. *EU Gebäuderichtlinie 2002 - energieeffiziente Gebäuden*. [Online] 2002. [Zitat vom: 26. April 2014.] http://www.enev-online.de/epbd/epbd_2002_eu_richtlinie_gesamtenergieeffizienz_gebaeude.htm.

- FAZ. 2014.** faz.net. *Klima retten funktioniert mit Wind, Sonne und Atomkraft.* [Online] 13. April 2014. [Zitat vom: 28. April 2014.] <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/ipcc-bericht-klima-retten-funktioniert-mit-wind-sonne-und-atomkraft-12893642.html>.
- Gailfuß, Markus. b.** BHKW-Infozentrum. *Vergleich: ASUE-/Gutschrift-Methode.* [Online] b. [Zitat vom: 01. April 2014.] http://www.bhkw-infozentrum.de/erlaeuter/bsp_methode.html.
- **a.** BHKW-Infozentrum. *Grundlagen der BHKW-Planung.* [Online] a. [Zitat vom: 27. Februar 2014.] http://www.bhkw-infozentrum.de/erlaeuter/planung_kwk.html.
- geea. 2014.** Die Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz - Pressemitteilungen. *Die Energiewende beginnt in den eigenen vier Wänden.* [Online] 11. März 2014. [Zitat vom: 26. März 2014.] <https://www.geea.info/presse/pressemitteilungen/>.
- GfEM. 2004.** *Kennziffernkatalog - Investitionsvorbereitungen in der Energiewirtschaft.* 12. Neuenhagen / Berlin : s.n., 2004.
- Großklos, Marc. 2011.** iwu.de. *Power-Point-Präsentation: Fast-Nullenergiegebäude am konkreten Beispiel.* [Online] 31. Mai 2011. [Zitat vom: 26. April 2014.] http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/neh_ph/03_Marc_Grossklos_Fast-Nullenergiegebäude_am_konkreten_Beiispiel.pdf.
- Hamburg. 2013.** hamburg.de. *Bebauungsplan Uhlenhorst 12.* [Online] 23. Juni 2013. [Zitat vom: 24. April 2014.] <http://www.hamburg.de/hamburg-nord/planen-bauen-wohnen/38874/uhlenhorst-12.html>.
- Hamburg Netz GmbH. 2014.** *Lemsahl-Mellingstedt 20 / Netzanschluss Gas - BHKW.* [E-Mail von Karsten Schulze an Ev Barckhan] Hamburg : s.n., 2014.
- **2013.** Preisübersicht- Vollständiges Preisblatt. *Ergänzende Bedingungen Gas der Hamburg Netz GmbH zu der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Gasversorgung in Niederdruck.* [Online] 01. Januar 2013. [Zitat vom: 13. März 2014.] http://hh-netz.com/fileadmin/user_upload/PDF/vertraege/HHNG_Ergaenzenden_Bedingungen_Gas_2013-01-01.pdf.
- HBauO. 2014.** Hamburg.de. *Hamburgische Bauordnung (HBauO).* [Online] 28. Januar 2014. [Zitat vom: 27. Februar 2014.] [http://www.hamburg.de/contentblob/3259016/data/hamburgische-bauordnung-hbauo-01-04-2012\).pdf](http://www.hamburg.de/contentblob/3259016/data/hamburgische-bauordnung-hbauo-01-04-2012).pdf).
- Heup, Jürgen. 2014.** Artikel: Sonnige Winter für die Solarwärme. *neue energie - magazin für erneuerbare energien.* 2014, 04 .

- IFB. 2014.** ifbhh.de - Downloads Förderrichtlinien. *Energiesparendes Bauen*. [Online] 01. Januar 2014. [Zitat vom: 03. März 2014.]
http://www.ifbhh.de/fileadmin/pdf/IFB_Download/IFB_Foerderrichtlinien/FoeRi_Energiesparendes_Bauen.pdf.
- IRENA. 2011.** IRENA - International Renewable Energy Agency. *IRENA Renewable Energy Country Profiles - Region: Europa and Eurasia*. [Online] 2011. [Zitat vom: 22. April 2014.]
<http://www.irena.org/REmaps/EuropeandEurasia.aspx>.
- kea bw.** Klimaschutz- und Energieagentur Badenwürttemberg GmbH. *CO2-Emissionsfaktoren*. [Online] [Zitat vom: 24. März 2014.] <http://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/>.
- KfW. 2013.** Kreditanstalt für Wiederaufbau. *Anlage zum Merkblatt: Programm Energieeffizient Bauen (153)*. [Online] März 2013. [Zitat vom: 25. Februar 2014.]
[https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/6000002646-M-Anlage-153.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/6000002646-M-Anlage-153.pdf).
- . **2014.** Kreditanstalt für Wiederaufbau. *Merkblatt - Erneuerbare Energien - KfW-Programm Erneuerbare Energien "Premium"*. [Online] April 2014. [Zitat vom: 02. April 2014.]
<https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-%28Inlandsf%C3%B6rderung%29/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf>. 600 000 2410.
- Kohler, Stephan. 2012.** geea.info. *Powerpoint-Präsentation: 2. dena-Bundesländer-Workshop Energieeffiziente Gebäude*. [Online] 30. Mai 2012. [Zitat vom: 11. April 2014.]
https://www.geea.info/fileadmin/media/workshop/Workshop_2/2012-04-30_Kohler_EnEV_Workshop.pdf.
- Kraft, Manfred und Schmitz, Karin. 2013.** agfw.de. *Fernwärme-Preisübersicht - Webexemplar*. [Online] November 2013. [Zitat vom: 23. April 2014.]
https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menu/wirtschaft_und_markt/markt_und_preise/Preisbildung-_Anpassung/AGFW-Preisuebersicht_2013_Versand_Internetexemplar.pdf&t=1398346668&hash=56427686f430a776e2ece421f6.
- Krämer, Holger. 2014.** Gespräche mit Holger Krämer . 2014.
- KWKG. 2013.** Gesetze im Internet. *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbauder Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz)*. [Online] 07. August 2013. [Zitat vom: 25. Februar 2014.] http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/kwkg_2002/gesamt.pdf.
- Quaschnig, Volker. 2010.** *Mülltrenner, Müsliesser & Klimaschützer*. München : Carl Hanser Verlag, 2010. 978-3-446-42261-2.

- Richtlinie 2009/28/EG. 2009.** EUR-Lex - Der Zugang zum EU-Recht. *Richtlinie 2009/28/EG.*
[Online] 05. Juni 2009. [Zitat vom: 19. März 2014.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:de:PDF>.
- Richtlinie 2010/31/EU. 2010.** eur-lex.europa.eu. *Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung).*
[Online] 19. Mai 2010. [Zitat vom: 25. April 2014.] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:DE:PDF>.
- sumbi. 2014.** *Energiewirtschaftliches Gutachten für das B-Plangebiet Lemsahl-Mellingstedt 20.*
Hamburg : s.n., 2014.
- . **2010.** *Energiewirtschaftliches Gutachten für das B-Plangebiet Uhlenhorst 12.* Hamburg : s.n., 2010.
- target GmbH. 2009.** Passivhaus-Planer Zertifikatslehrgang. [Hrsg.] target GmbH. *Qualifizierung für Architekten, Ingenieure und BAFA-Gebäudeenergieberater.* Hannover : s.n., 2009.
- TU Dresden. 2012.** Vattenfall.de. *Fernwärme für Hamburg und Berlin.* [Online] 24. Juli 2012. [Zitat vom: 31. Januar 2014.]
http://www.vattenfall.de/de/file/Zertifikat_FW309_Verbundnetz_Hamburg_26133046.pdf_38215345.pdf.
- Vattenfall. 2014.** Vattenfall.de. *Privatkunden / Wärme / Wärmetarife / Wärmepumpe Natur.* [Online] 2014. [Zitat vom: 03. März 2014.] <http://www.vattenfall.de/de/privatkunden-hamburg-waermepumpe-natur.htm?WT=post-code-sent>.
- vz-nrw. 2013.** Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen - Blockheizkraftwerke. *Vergütung des erzeugten Stroms.* [Online] 2013. [Zitat vom: 02. April 2014.] <http://www.vz-nrw.de/BHKW-Verguetung>.
- Wärme Strom Gemeinschaft eG. Förderungen und Vergütung.** [Online] [Zitat vom: 04. März 2014.]
<http://www.waerme-strom-gemeinschaft.de/foerderungen-und-verguetungen/vermiedene-netznutzungsentgelte>.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung A.1 Ausschnitt aus dem B-Plan aus dem hervorgeht, welches Gebäude zu welcher Gebäudekategorie (abgekürzt) gehört (Quelle Bezirksamt, bearbeitet durch Barckhan, kein Maßstab)	65
Abbildung B.1 Graphische Darstellung des Dachaufbaus, der für alle Gebäude in allen Varianten gewählt wurde mit Auflistung der verwendeten Materialien und Eigenschaften, entnommen aus Hottgenroth	71
Abbildung B.2 Graphische Darstellung des Aufbaus der Sole, der für alle Gebäude in allen Varianten gewählt wurde mit Auflistung der verwendeten Materialien und Eigenschaften, entnommen aus Hottgenroth	72
Abbildung B.3 Graphische Darstellung des Aufbaus der Wand, der für alle Gebäude in allen Varianten gewählt wurde mit Auflistung der verwendeten Materialien und Eigenschaften, entnommen aus Hottgenroth	72
Abbildung C.1 Die Lage der Heizungszentrale ist mit dem grünen Rechteck bei Strangabschnitt 33 eingezeichnet. Von dort zweigt das Nahwärmenetz ab (Quelle Bezirksamt, bearbeitet durch Barckhan, kein Maßstab)	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle A.1 Übersicht der Gebäudeeigenschaften jedes Gebäudetyps	64
Tabelle A.2 Übersicht der Wärme- und Leistungsbedarfe je Gebäudetyp. Die Wärmebedarfe entsprechen dem Nutzenergiebedarf der Siedlung	66
Tabelle A.3 Darstellung der Grenzwerte nach EnEV 2014 und Effizienzhaus-Standard-40 sowie den von den Gebäudetypen erreichten spezifischen Transmissionswärmeverlust	67
Tabelle A.4 Grenzwerte für Q_P für die Variante Brennwertkessel mit Solarthermie.....	68
Tabelle A.5 Grenzwerte für Q_P für die Variante Wärmepumpe.....	69
Tabelle A.6 Grenzwerte für Q_P für die Variante BHKW _s mit einem angenommenen Primärenergiefaktor von 0,5	70
Tabelle C.1 Liste der Strangabschnitte des Nahwärmenetzes und deren Eigenschaften	73
Tabelle C.2 Länge der Hausanschlüsse.....	74

A Gebäudetypen

Tabelle A.1 Übersicht der Gebäudeeigenschaften jedes Gebäudetyps

Gebäudekategorie	Bezeichnung	Anzahl	Volumen [m³]	A _N [m²]	A/V [1/m]	Fensterflächen						Dachflächenfenster						A _{TG} [m²]	Hüllfläche A [m²]
						A _{Wand} [m²]	A _{Nord} [m²]	A _{West/Ost} [m²]	A _{Süd} [m²]	A _{West} [m²]	A _{Ost} [m²]	A _{Süd} [m²]	A _{West/Ost} [m²]	A _{Süd} [m²]	A _{Umbekleid} [m²]	A _{Bodempl.} [m²]	A _{TG} [m²]		
Einfamilienhaus	EFH	37	549,60	175,90	0,77	115,20	14,04	22,84	14,04	151,20	-	-	-	-	-	108,00	-	425,10	
Doppelhaus Hälfte Nord	DHHN	3	491,30	157,20	0,62	105,00	20,55	26,56	-	88,60	-	-	-	-	-	63,80	-	305,90	
Doppelhaus Hälfte Ost/West	DHHOW	10	491,30	157,20	0,62	105,00	13,28	20,55	13,28	88,60	0,80	-	0,80	-	-	63,80	-	305,90	
Doppelhaus Hälfte Süd	DHHS	3	491,30	157,20	0,62	105,00	-	26,56	2,55	88,60	-	-	-	-	-	63,80	-	305,90	
Reihenendhaus Nord Var. I	REH_N	3	403,00	129,00	0,69	96,10	17,24	23,94	-	-	-	-	-	-	70,70	-	278,80		
Reihenmittelhaus Var. I	RMH_LNS	6	403,00	129,00	0,55	55,80	-	23,94	-	-	-	-	-	-	70,70	-	221,20		
Reihenendhaus Süd Var. I	REH_LS	3	403,00	129,00	0,69	96,10	-	23,94	17,24	-	-	-	-	-	70,70	-	278,80		
Reihenendhaus Var. II	REH_IL_WO	2	501,60	160,50	0,68	114,90	17,10	15,10	17,10	-	-	-	-	-	88,00	-	340,20		
Reihenmittelhaus Var. II	RMH_IL_WO	2	501,60	160,50	0,58	79,80	17,10	-	17,10	-	-	-	-	-	88,00	-	290,00		
Reihenendhaus Var. III	REH_III_WO	6	401,30	128,40	0,70	98,90	13,68	15,09	13,68	-	-	-	-	-	70,40	-	282,20		
Reihenmittelhaus Var. III	RMH_III_WO	4	401,30	128,40	0,58	63,80	13,68	-	13,68	-	-	-	-	-	70,40	-	232,00		
Reihenendhaus Nord Var. IV	REH_IV_N	2	403,80	129,20	0,69	96,40	18,57	22,24	-	-	-	-	-	-	70,90	-	277,90		
Reihenmittelhaus Var. IV	RMH_IV_NS	2	403,80	129,20	0,53	51,80	-	22,24	-	-	-	-	-	-	70,90	-	215,80		
Reihenendhaus Süd Var. IV	REH_IV_S	2	403,80	129,20	0,69	96,40	-	22,24	18,57	-	-	-	-	-	70,90	-	277,90		
Geschossbau 15x12 WO	Gesch_BF1_WO	2	1.551,00	496,30	0,53	266,00	25,65	62,64	25,65	251,40	1,60	-	-	-	180,00	-	814,40		
Geschossbau 18x12 SN	Gesch_BF2_SN	1	1.861,20	595,60	0,50	289,80	31,32	61,56	31,32	302,20	-	-	-	-	216,00	-	935,50		
Geschossbau 18x12 SN Tiefgarage	Gesch_BF2_SN_TG	1	1.861,20	595,60	0,50	289,80	31,32	61,56	31,32	302,20	-	-	-	-	216,00	-	935,50		
Geschossbau 18x12 WO Tiefgarage	Gesch_BF2_WO_TG	1	1.861,20	595,60	0,50	289,80	30,78	62,64	30,78	302,20	1,60	-	-	-	216,00	-	935,50		
Geschossbau 24x12 SN	Gesch_BF3_SN	1	2.481,60	794,10	0,47	337,80	31,32	82,08	31,32	404,20	-	-	-	-	288,00	-	1.177,70		
Geschossbau 24x12 WO Tiefgarage	Gesch_BF3_WO_TG	1	2.481,60	794,10	0,47	337,80	41,04	62,64	41,04	404,20	1,60	-	-	-	288,00	-	1.177,70		
KiTa	KiTa	1	4.104,00	1.313,28	0,51	410,40	34,20	159,60	34,20	720,00	-	-	-	-	720,00	-	2.078,40		

A.1 Heizwärme- & Warmwasserwärmebedarf

Tabelle A.2 Übersicht der Wärme- und Leistungsbedarfe je Gebäudetyp. Die Wärmebedarfe entsprechen dem Nutzenergiebedarf der Siedlung

Gebäudekategorie	Anzahl	Heizwärmebedarf [kWh/a]	WW-Wärmebedarf [kWh/a]	Leistungsbedarf [kW]
Einfamilienhaus	31	167.404	68.161	151,9
Doppelhaushälfte N	3	14.478	5.895	12,6
Doppelhaushälfte O/W	10	43.387	19.650	42
Doppelhaushälfte S	3	11.884	5.895	12,6
Reihenendhaus N Var. I	3	11.571	4.838	10,2
Reihenmittelhaus Var. I	6	17.492	9.675	16,8
Reihenendhaus S Var. I	3	9.404	4.838	10,2
Reihenendhaus Var. II	2	8.314	4.013	8,4
Reihenmittelhaus Var. II	2	7.062	4.013	7,2
Reihenendhaus Var. III	6	20.724	9.630	20,4
Reihenmittelhaus Var. III	4	11.299	6.420	11,6
Reihenendhaus N Var. IV	2	7.726	3.230	6,8
Reihenmittelhaus Var. IV	2	5.685	3.230	5,4
Reihenendhaus S Var. IV	2	5.892	3.230	6,8
Geschossbau 15x12 WO	2	24.319	12.408	23,8
Geschossbau 18x12 SN	1	14.116	7.445	13,7
Geschossbau 18x12 SN Tiefgarage	1	14.950	7.445	14,1
Geschossbau 18x12 WO Tiefgarage	1	14.950	7.445	14,1
Geschossbau 24x12 SN	1	18.105	9.926	17,6
Geschossbau 24x12 WO Tiefgarage	1	18.979	9.926	18
Kindertagesstätte	1	16.105	24.480	120
Summe	87	527.904	256.271	627,2

A.2 Spezifischer Transmissionswärmeverlust

Tabelle A.3 Darstellung der Grenzwerte nach EnEV 2014 und Effizienzhaus-Standard-40 sowie den von den Gebäudetypen erreichten spezifischen Transmissionswärmeverlust

Gebäudekategorie	Bezeichnung	Referenz-Gebäude H_T	Grenzwerte EH40 ₂₀₁₄ H_T	Erreichter H_T -Wert
Einfamilienhaus	EFH	0,40	0,22	0,20
Doppelhaushälfte Nord	DHH N	0,46	0,25	0,24
Doppelhaushälfte West/Ost	DHH WO	0,46	0,25	0,24
Doppelhaushälfte Süd	DHH S	0,46	0,25	0,24
Reihenendhaus Var. I Nord	REH_I_N	0,43	0,24	0,21
Reihenmittelhaus Var. I	RMH_I_N/S	0,38	0,21	0,17
Reihenendhaus Var. I Süd	REH_I_S	0,43	0,24	0,21
Reihenendhaus Var. II	REH_II_W/O	0,43	0,24	0,21
Reihenmittelhaus Var. II	RMH_II_W/O	0,39	0,21	0,18
Reihenendhaus Var. III	REH_III_W/O	0,44	0,24	0,21
Reihenmittelhaus Var. III	RMH_III_W/O	0,39	0,21	0,18
Reihenendhaus Var. IV Nord	REH_IV_N	0,43	0,24	0,21
Reihenmittelhaus Var. IV	RMH_IV_N/S	0,37	0,20	0,17
Reihenendhaus Var. IV Süd	REH_IV_S	0,43	0,24	0,21
Geschossbau 15x12 WO	Gesch_BF1_WO	0,43	0,24	0,22
Geschossbau 18x12 SN	Gesch_BF2_SN	0,42	0,23	0,22
Geschossbau 18x12 SN Tiefgarage	Gesch_BF2_SN_TG	0,44	0,24	0,23
Geschossbau 18x12 WO Tiefgarage	Gesch_BF2_WO_TG	0,44	0,24	0,23
Geschossbau 24x12 SN	Gesch_BF3_SN	0,41	0,23	0,21
Geschossbau 24x12 WO Tiefgarage	Gesch_BF3_WO_TG	0,43	0,24	0,22

A.3 Jahres-Primärenergiebedarf

Der Jahres-Primärenergiebedarf wurde für alle Varianten berechnet. Es werden die Grenzwerte für die Effizienzhaus-Standards-40 und -50 gezeigt. Diese wurden grün eingefärbt, wenn das Gebäude den Grenzwert einhält und rot, wenn er überschritten wird.

Tabelle A.4 Grenzwerte für Q_P für die Variante Brennwertkessel mit Solarthermie

Bezeichnung	Referenz-Gebäude Q_P	EnEV 2014 Q_P	Erreichter Q_P -Wert	Grenzwerte EH 55 ₂₀₁₄ Q_P	Grenzwerte EH 40 ₂₀₁₄ Q_P
EFH	78,52	58,89	29,24	32,39	23,56
DHH N	76,90	57,68	29,49	31,72	23,07
DHH WO	72,51	54,38	28,20	29,91	21,75
DHH S	69,16	51,87	25,89	28,53	20,75
REH_I_N	81,24	60,93	31,07	33,51	24,37
RMH_I_N/S	65,81	49,36	25,08	27,15	19,74
REH_I_S	73,19	54,89	27,11	30,19	21,96
REH_II_W/O	73,94	55,46	26,83	30,50	22,18
RMH_II_W/O	65,20	48,90	21,77	26,90	19,56
REH_III_W/O	77,41	58,06	28,56	31,93	23,22
RMH_III_W/O	66,46	49,85	24,48	27,41	19,94
REH_IV_N	81,14	60,86	31,05	33,47	24,34
RMH_IV_N/S	64,51	48,38	24,60	26,61	19,35
REH_IV_S	72,48	54,36	26,22	29,90	21,74
Gesch_BF1_WO	62,94	47,21	25,33	25,96	18,88
Gesch_BF2_SN	59,18	44,39	24,40	24,41	17,75
Gesch_BF2_SN_TG	61,86	46,40	25,46	25,52	18,56
Gesch_BF2_WO_TG	61,84	46,38	25,46	25,51	18,55
Gesch_BF3_SN	56,67	42,50	22,97	23,38	17,00
Gesch_BF3_WO_TG	59,11	44,33	23,59	24,38	17,73

Tabelle A.5 Grenzwerte für Q_P für die Variante Wärmepumpe

Bezeichnung	Referenz-Gebäude Q_P	EnEV 2014 Q_P	Erreichter Q_P -Wert	Grenzwerte EH 55 ₂₀₁₄ Q_P	Grenzwerte EH 40 ₂₀₁₄ Q_P
EFH	78,52	58,89	20,64	32,39	23,56
DHH N	76,90	57,68	21,13	31,72	23,07
DHH WO	72,51	54,38	20,49	29,91	21,75
DHH S	69,16	51,87	19,37	28,53	20,75
REH_I_N	81,24	60,93	22,55	33,51	24,37
RMH_I_N/S	65,81	49,36	19,90	27,15	19,74
REH_I_S	73,19	54,89	20,80	30,19	21,96
REH_II_W/O	73,94	55,46	19,81	30,50	22,18
RMH_II_W/O	65,20	48,90	18,37	26,90	19,56
REH_III_W/O	77,41	58,06	21,40	31,93	23,22
RMH_III_W/O	66,46	49,85	19,60	27,41	19,94
REH_IV_N	81,14	60,86	22,54	33,47	24,34
RMH_IV_N/S	64,51	48,38	19,68	26,61	19,35
REH_IV_S	72,48	54,36	18,96	29,90	21,74
Gesch_BF1_WO	62,94	47,21	16,39	25,96	18,88
Gesch_BF2_SN	59,18	44,39	15,85	24,41	17,75
Gesch_BF2_SN_TG	61,86	46,40	17,41	25,52	18,56
Gesch_BF2_WO_TG	61,84	46,38	16,32	25,51	18,55
Gesch_BF3_SN	56,67	42,50	15,06	23,38	17,00
Gesch_BF3_WO_TG	59,11	44,33	15,29	24,38	17,73

Kapitel A: Gebäudetypen

Tabelle A.6 Grenzwerte für Q_P für die Variante BHKW₃ mit einem angenommenen Primärenergiefaktor von 0,5

Bezeichnung	Referenz-Gebäude Q_P	EnEV 2014 Q_P	Erreichter Q_P -Wert	Grenzwerte EH 55 ₂₀₁₄ Q_P	Grenzwerte EH 40 ₂₀₁₄ Q_P
EFH	78,52	58,89	26,24	32,39	23,56
DHH N	76,90	57,68	26,84	31,72	23,07
DHH WO	72,51	54,38	25,59	29,91	21,75
DHH S	69,16	51,87	24,72	28,53	20,75
REH_I_N	81,24	60,93	27,78	33,51	24,37
RMH_I_N/S	65,81	49,36	24,59	27,15	19,74
REH_I_S	73,19	54,89	25,67	30,19	21,96
REH_II_W/O	73,94	55,46	24,77	30,50	22,18
RMH_II_W/O	65,20	48,90	23,04	26,90	19,56
REH_III_W/O	77,41	58,06	26,66	31,93	23,22
RMH_III_W/O	66,46	49,85	24,49	27,41	19,94
REH_IV_N	81,14	60,86	27,75	33,47	24,34
RMH_IV_N/S	64,51	48,38	24,32	26,61	19,35
REH_IV_S	72,48	54,36	25,18	29,90	21,74
Gesch_BF1_WO	62,94	47,21	20,76	25,96	18,88
Gesch_BF2_SN	59,18	44,39	20,00	24,41	17,75
Gesch_BF2_SN_TG	61,86	46,40	20,55	25,52	18,56
Gesch_BF2_WO_TG	61,84	46,38	20,55	25,51	18,55
Gesch_BF3_SN	56,67	42,50	19,11	23,38	17,00
Gesch_BF3_WO_TG	59,11	44,33	19,5	24,38	17,73

B Bauteilaufbauten

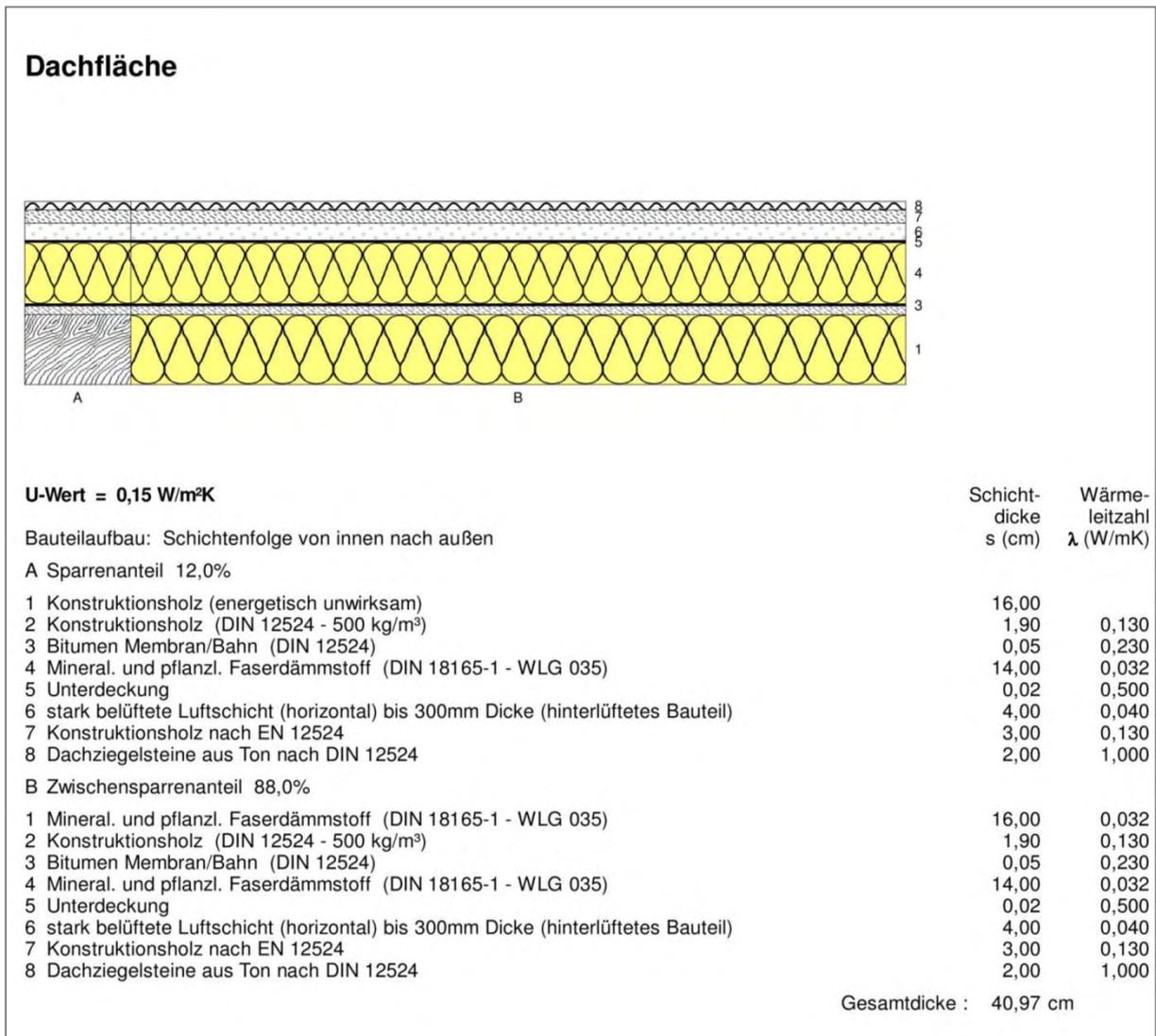


Abbildung B.1 Graphische Darstellung des Dachaufbaus, der für alle Gebäude in allen Varianten gewählt wurde mit Auflistung der verwendeten Materialien und Eigenschaften, entnommen aus Hottgenroth

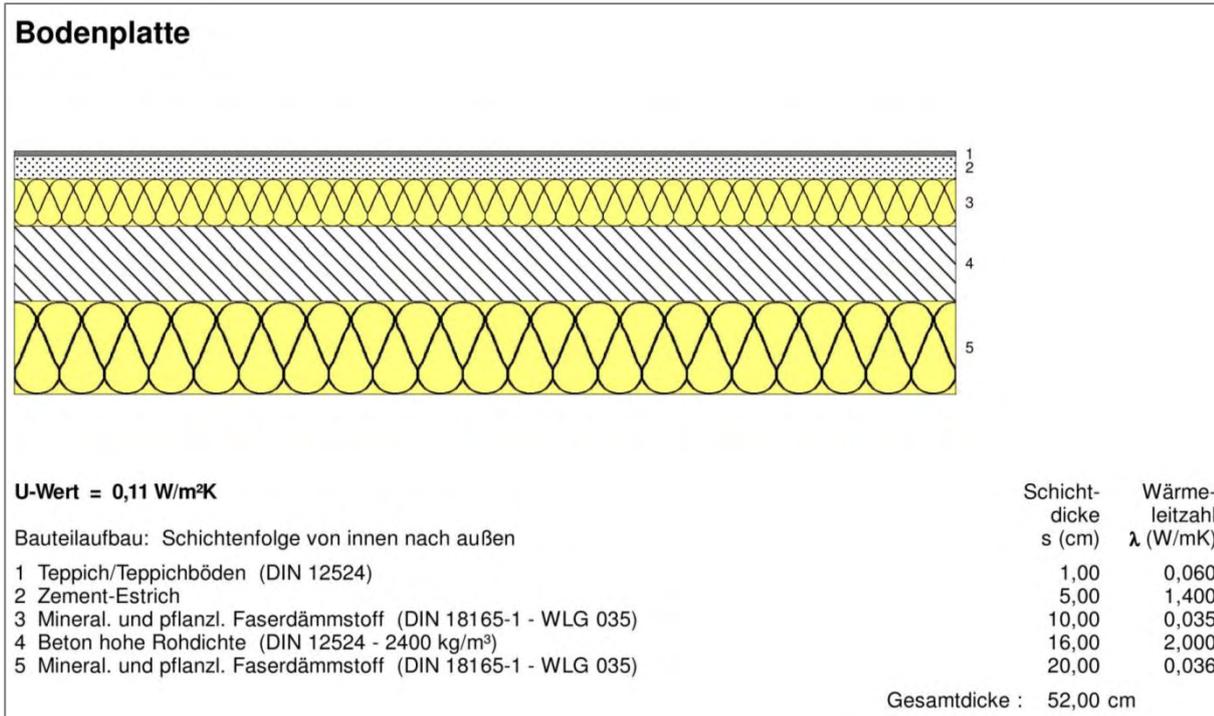


Abbildung B.2 Graphische Darstellung des Aufbaus der Sole, der für alle Gebäude in allen Varianten gewählt wurde mit Auflistung der verwendeten Materialien und Eigenschaften, entnommen aus Hottgenroth

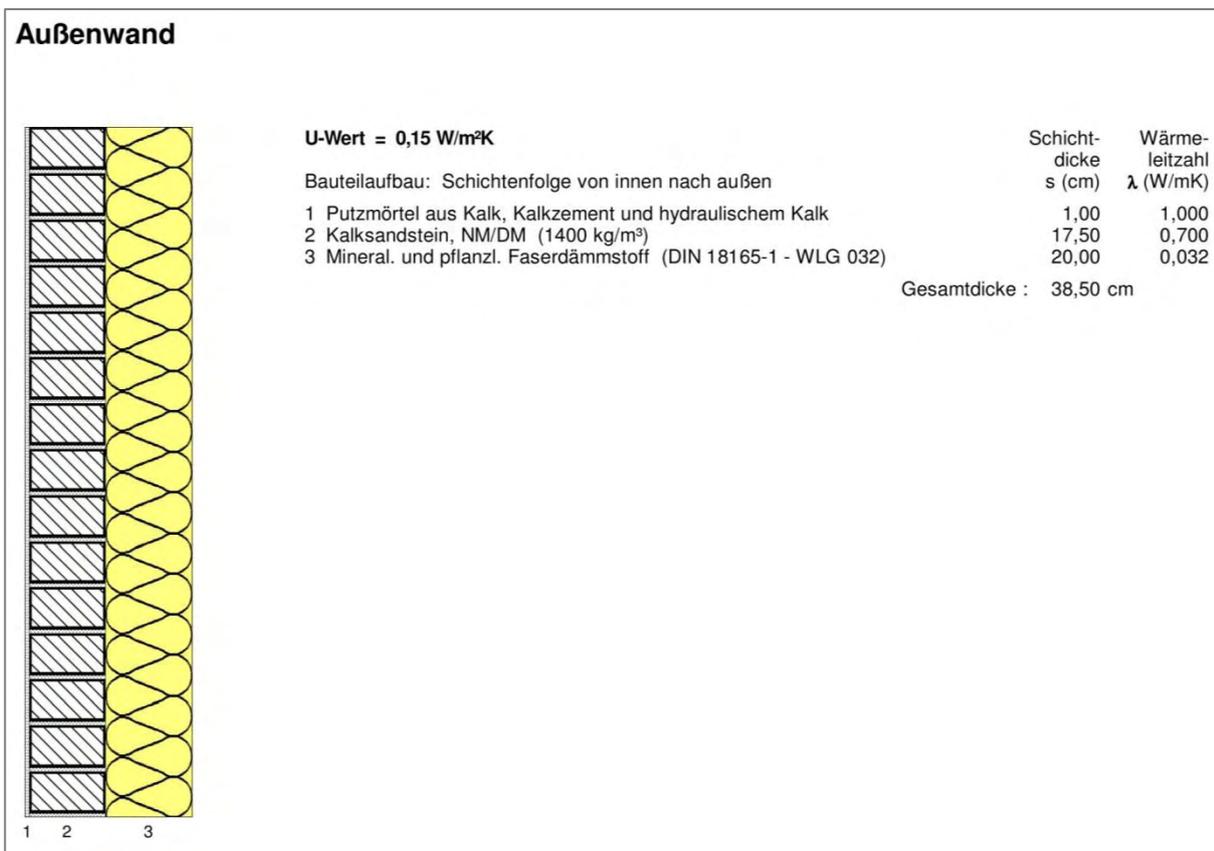


Abbildung B.3 Graphische Darstellung des Aufbaus der Wand, der für alle Gebäude in allen Varianten gewählt wurde mit Auflistung der verwendeten Materialien und Eigenschaften, entnommen aus Hottgenroth

C Auslegung des Nahwärmenetzes

Tabelle C.1 Liste der Strangabschnitte des Nahwärmenetzes und deren Eigenschaften

Strang- abschnitt	Leistungs- bedarf [kW]	Wasserstrom [kg/h]	di [mm]	Stahlrohr - DN	Länge [m]	Kosten [€/m] (GfEM, 2004 S. 225)	Verlegekosten [€]
1	180,3	7727	62,5	65	36	268	19.260
2	166,2	7123	60,0	65	25	268	13.375
3	153	6553	57,5	65	19	268	10.165
4	138,4	5931	54,7	65	40	268	21.400
5	120	5151	51,0	65	39	268	20.865
6	98	4200	46,1	50	22	240	10.560
7	88,2	3780	43,7	50	20	240	9.600
8	68,1	2919	38,4	40	27	223	12.015
9	47,6	2040	32,1	40	28	223	12.460
10	37,8	1620	28,6	32	30	210	12.600
11	28	1200	24,6	25	30	200	12.000
12	4,9	210	10,3	25	18	200	7.200
13	13,3	570	17,0	25	32	200	12.800
14	203	8700	66,3	80	32	278	17.760
15	214,9	9210	68,2	80	45	278	24.975
16	231,7	9930	70,8	80	26	278	14.430
17	244,3	10470	72,7	80	25	278	13.875
18	17,9	767	19,7	25	22	200	8.800
19	27,7	1187	24,5	25	40	200	16.000
20	272	11657	76,7	80	4	278	2.220
21	9,8	420	14,6	25	38	200	15.200
22	286,7	12287	78,8	80	16	278	8.880
23	304,8	13063	81,2	100	34	305	20.740
24	310	13273	81,9	100	10	305	6.100

Kapitel C: Auslegung des Nahwärmenetzes

25	24	1037	22,9	25	65	200	26.000
26	353,4	15146	87,5	100	45	305	27.450
27	358,3	15356	88,1	100	41	305	25.010
28	14	604	17,5	25	18	200	7.200
29	26	1114	23,7	25	10	200	4.000
30	34	1474	27,3	32	10	210	4.200
31	53	2289	34,0	40	22	223	9.790
32	71	3060	39,3	40	23	223	10.235
33	429,7	18416	96,5	100	11	305	6.710
"34"	17,6	754	19,5	25	0	0	0,
				Summe	903		417.140

Tabelle C.2 Länge der Hausanschlüsse

	Länge [m]	Preis [€/m]	Verlegekosten [€]
EFH, DHH, RH	531	200	106.200
Mehrfamilienhäuser	74	210	15.540
KiTa	10	278	2775
		Summe:	124.515

Die Summe der Kosten für das Nahwärmenetz beträgt 541.655 Euro.

In diesem Ausschnitt vom B-Plan wurde das Nahwärmenetz „verlegt“ (Abbildung B.1). Das Nahwärmenetz von energycity contracting wird sehr ähnlich verlegt. Es wurde jedoch mehr ins Detail bei den Hausanschlüssen gegangen (energycity contracting, 04. April 2014).

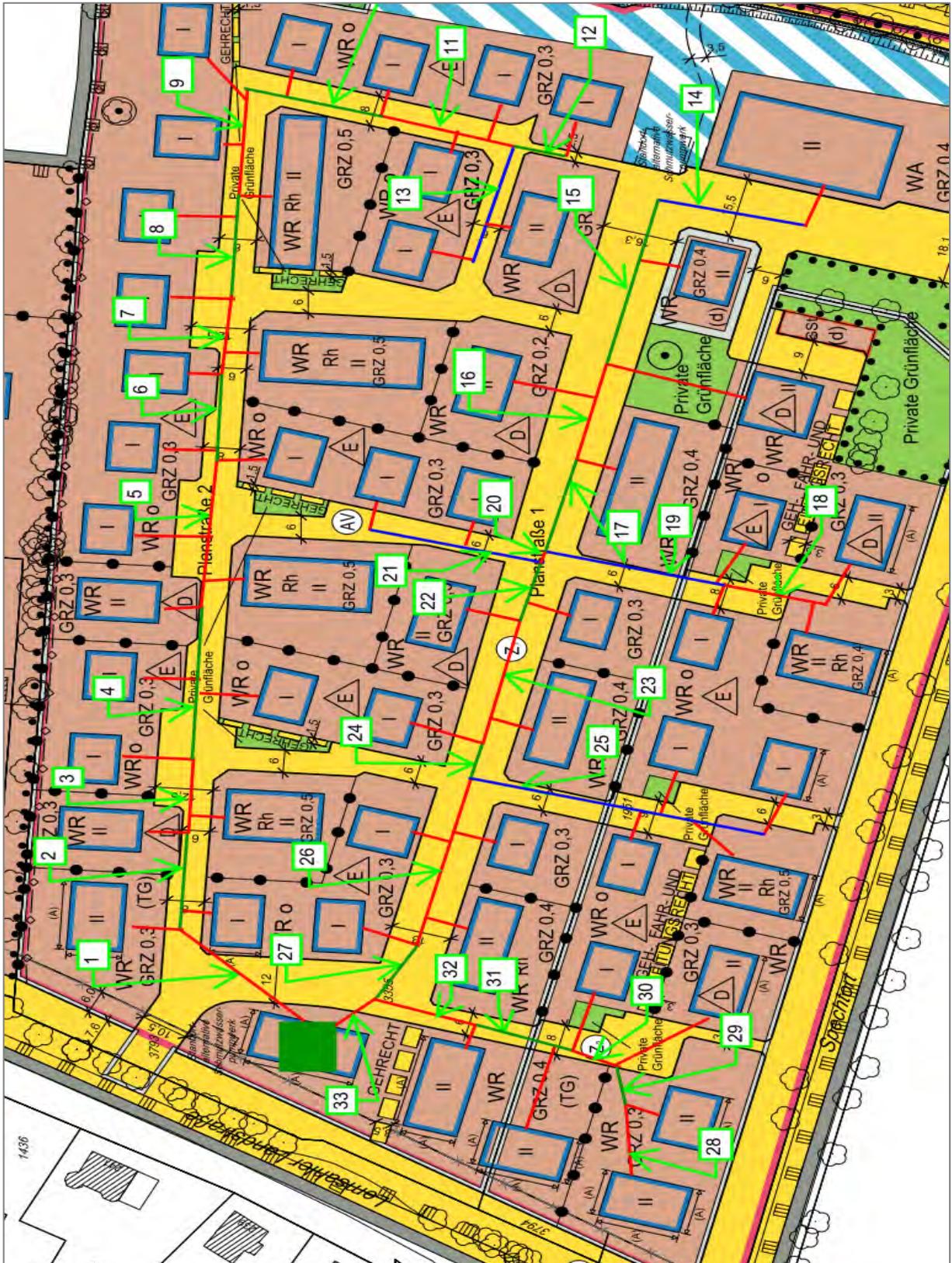


Abbildung C.1 Die Lage der Heizungszentrale ist mit dem grünen Rechteck bei Strangabschnitt 33 eingezeichnet. Von dort zweigt das Nahwärmenetz ab (Quelle Bezirksamt, bearbeitet durch Barckhan, kein Maßstab)

D Hottgenroth-Berechnung

In Hottgenroth wurden alle zwanzig Gebäudetypen simuliert. Als Beispiel werden auf den nachfolgenden Seiten die Berechnungen für das Einfamilienhaus mit Brennwerttechnik dargestellt. Auf der beiliegenden CD sind die Berechnungsunterlagen aller Gebäudemodelle abgelegt