



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



**AKADEMIE
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN**

Akademie für erneuerbare Energien Lüchow-Dannenberg

Masterthesis

Ökonomischer und ökologischer Vergleich moderner Heizungskonzepte für Niedrigenergiehäuser

Eingereicht von: Andreas Schlüter (Matrikelnummer: 2087876)

Abgabedatum: 14.04.2015

Erstprüferin: Frau Professor Dr. Heike Frischgesell

Zweitprüfer: Herr Dipl.-Ing. Jörg Martini

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Einheitenverzeichnis.....	X
1 Einführung in das Thema.....	1
1.1 Zielformulierung	2
1.2 Abgrenzung des Themas und Gang der Untersuchung	2
1.3 Geschichte und Entwicklung der Gebäudetechnik	3
2 Grundlagen	5
2.1 Grundlagen der Wärmeübertragung / Begriffsdefinitionen	5
2.1.1 Arten von Wärmeübertragung.....	5
2.1.2 Begriffsdefinitionen	6
2.2 Einführung in die Energieeinsparverordnung (EnEV).....	7
2.2.1 Entwicklung der EnEV	8
2.2.2 EV 2009 – Aufbau und Inhalt	9
2.2.3 Anforderungen an Neubauten.....	10
3 Planungsbeispiel Einfamilienhaus	11
3.1 Vorstellung der Hausplanung.....	11
3.1.1 Lage des Grundstücks	11
3.1.2 Größe des Hauses.....	11
3.1.3 Planungsgrundlagen.....	13

3.1.4	Verwendete Baustoffe	14
3.2	Ermittlung des Energiebedarfes.....	15
3.2.1	Ermittlung des Endenergie- / Primärenergiebedarfs nach EnEV	15
3.2.2	Heizlastberechnung nach DIN 12831.....	17
4	Aktuelle Heizungskonzepte.....	20
4.1	Erdgasheizung.....	21
4.1.1	Funktionsprinzip	22
4.1.2	Brennstoff Erdgas	22
4.1.3	Marktentwicklung	23
4.2	Holzpellettheizung	24
4.2.1	Funktionsprinzip	24
4.2.2	Brennstoff Holzpellets	25
4.2.3	Marktentwicklung	25
4.3	Wärmepumpe	27
4.3.1	Funktionsprinzip	28
4.3.2	Arten von Wärmepumpen / Wärmequellen	31
4.3.2.1	Betriebsweisen von Wärmepumpen	31
4.3.2.2	Wärmequellen	31
4.3.2.3	Untersuchung von Jahresarbeitszahlen	35
4.3.3	Marktentwicklung	37
4.3.4	Dimensionierung der Wärmequelle	38
4.4	Solarthermie	38
4.4.1	Funktionsprinzip	39
4.4.2	Marktentwicklung	39
4.4.3	Dimensionierung.....	40

4.5	Photovoltaik	41
4.5.1	Funktionsprinzip	41
4.5.2	Marktentwicklung	42
4.5.3	Dimensionierung der PV-Anlage / Ertragsberechnung	43
4.6	Kombinationsmöglichkeiten	46
4.6.1	Erdgas und Solarthermie	46
4.6.2	Pellets und Solarthermie	47
4.6.3	Wärmepumpe + Photovoltaik	47
4.6.4	Gas & Adsorptionswärmepumpe	48
4.7	Speicher	49
5	Vergleich der Heizungssysteme	51
5.1	Definition der Vergleichskriterien	52
5.1.1	Kriterien wirtschaftlicher Vergleich	52
5.1.2	Kriterien ökologischer Vergleich	54
5.2	Ökonomischer Vergleich	55
5.2.1	Kostenaufstellung der Heizsysteme	55
5.2.1.1	Erdgasheizung	56
5.2.1.2	Pelletheizung	57
5.2.1.3	Wärmepumpen	58
5.2.1.4	Erdgas und Solarthermie	61
5.2.1.5	Pellets und Solarthermie	63
5.2.1.6	Wärmepumpen + PV	64
5.2.1.7	Erdgas-Adsorptionswärmepumpe	67
5.2.2	Versorgungssicherheit	70
5.2.3	Ergebnis ökonomischer Vergleich	73
5.3	Ökologischer Vergleich	75

Inhaltsverzeichnis

5.3.1	Treibhausgase und sonstige Schadstoffe	75
5.3.2	Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung.....	77
5.3.2.1	Erdgas	78
5.3.2.2	Pellets	78
5.3.2.3	Strom (Mix)	79
5.3.2.4	Ergebnis der Nachhaltigkeitsbetrachtung	81
5.3.3	Ergebnis ökologischer Vergleich.....	82
5.4	Gesamtergebnis	82
5.5	Sensitivitätsanalysen	85
5.5.1	Untersuchte Szenarien	85
5.5.2	Ergebnisse.....	86
6	Fazit und Ausblick	91
6.1	Kritische Würdigung und Gesamtfazit der Untersuchung	91
6.2	Ausblick	92
	Quellenverzeichnis.....	94
	Anhangsverzeichnis.....	CII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung des geplanten Einfamilienhauses.....	12
Abbildung 2: Ergebnis der Heizlastberechnung	19
Abbildung 3: Marktanteile Heizsysteme an Neubauten.....	20
Abbildung 4: Heizenergiesysteme in Neubauten 2013.....	21
Abbildung 5: Funktionsprinzip Gas-Brennwerttherme	22
Abbildung 6: Bestand Pelletheizungen in Deutschland	26
Abbildung 7: Preisentwicklung Pellets	27
Abbildung 8: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe.....	28
Abbildung 9: Jahresgang der Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	33
Abbildung 10: Ergebnisse Fraunhofer ISE Projekt Wärmepumpen-Effizienz	35
Abbildung 11: Ergebnisse Fraunhofer ISE Projekt „WP-Monitor“	36
Abbildung 12: Absatz von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2007-2013.....	37
Abbildung 13: Zubau Solarthermie in Deutschland von 1992 bis 2014	40
Abbildung 14: Zubau PV 2000-2014, eigene Darstellung	43
Abbildung 15: Festlegung und Gewichtung der ökologischen Kriterien.....	54
Abbildung 16: Versorgungsstörungen Strom 2006-2013	72
Abbildung 17: Gesamtergebnis Heizungsvergleich - grafische Darstellung	83
Abbildung 18: Szenarien Hausgröße / Dämmung.....	89
Abbildung 19: Auswirkungen der Inflationsszenarien.....	90
Abbildung 20: Stromerzeugung Deutschland 1990-2014.....	CIII
Abbildung 21: Ausführung des Referenzgebäudes gemäß EnEV 2009	CIV
Abbildung 22: Höchstwerte Transmissionswärmeverlust gemäß EnEV 2009	CV
Abbildung 23: Höhenplan Grundstück Hochkamp	CVI
Abbildung 24: Übersicht Anlagentechnik Erdgas-Heizung	CVIII
Abbildung 25: Übersicht Endenergiebedarf / Primärenergiebedarf Erdgasheizung.....	CVIII
Abbildung 26: Energieflussbild Erdgas + Solarthermie	CIX
Abbildung 27: Pelletheizung + Solarthermie - Erfüllung KfW-Kriterien	CIX
Abbildung 28: Heizlastberechnung Seite G1 - Gebäudedaten	CXII
Abbildung 29: Heizlastberechnung Seite G2 - Vereinbarungen	CXIII
Abbildung 30: Heizlastberechnung Berechnung der Raum-Heizlast	CXIV
Abbildung 31: Pelletproduktion und Verbrauch in Deutschland.....	CXVI
Abbildung 32: Preisentwicklung Pellets	CXVI
Abbildung 33: Beurteilung Bodennutzung für Erdwärme.....	CXVII
Abbildung 34: Verteilung Erdgasvorräte	CXVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern und Anwendungsbereichen	1
Tabelle 2: Primärenergiefaktoren ausgewählter Energieträger.	9
Tabelle 3: KfW-Förderbedingungen.....	10
Tabelle 4: Übersicht Hausdaten	13
Tabelle 5: Berechnung U-Wert Außenwand	14
Tabelle 6: Erfüllung EnEV-Anforderungen	16
Tabelle 7: Ergebnis der Primärenergie- / Endenergiebedarfsberechnung	17
Tabelle 8: Qualitätsanforderungen an Holzpellets	25
Tabelle 9: Dimensionierung Wärmequelle Erdkollektor.....	38
Tabelle 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung PV.....	45
Tabelle 11: Investitionskosten Erdgasheizung	56
Tabelle 12: Berechnung Gaspreis	56
Tabelle 13: Laufende Kosten Erdgasheizung	57
Tabelle 14: Gesamtkosten Erdgasheizung	57
Tabelle 15: Investitionskosten Pelletheizung	57
Tabelle 16: Laufende Kosten Pelletheizung.....	58
Tabelle 17: Gesamtkosten Pelletheizung.....	58
Tabelle 18: Investitionskosten Wärmepumpen	59
Tabelle 19: Kostenermittlung Wärmequellen	59
Tabelle 20: Vergleich Stromtarife	60
Tabelle 21: Laufende Kosten Wärmepumpen.....	60
Tabelle 22: Gesamtkosten Wärmepumpen.....	61
Tabelle 23: Investitionskosten Erdgasheizung + Solarthermie	62
Tabelle 24: Laufende Kosten Erdgas + Solarthermie.....	62
Tabelle 25: Gesamtkosten Erdgas + Solarthermie / Vergleich mit Erdgasheizung.....	62
Tabelle 26: Investitionskosten Pelletheizung und Solarthermie	63
Tabelle 27: Laufende Kosten Pellets + Solarthermie	63
Tabelle 28: Gesamtkosten Pellet + Solarthermie / Vergleich mit Pelletheizung	63
Tabelle 29: Gesamtkostenrechnung mit/ohne Aufnahme PV in Investitionskosten	64
Tabelle 30: Investitionskosten Wärmepumpe + PV.....	65
Tabelle 31: Eigenverbrauch PV-Strom durch Erdkollektor-Wärmepumpe.....	66
Tabelle 32: Laufende Kosten Wärmepumpe + PV	67
Tabelle 33: Gesamtkosten Wärmepumpe + PV	67
Tabelle 34: Investitionskosten Erdgas-Adsorptionswärmepumpe	68
Tabelle 35: Laufende Kosten Erdgas-Adsorptionswärmepumpe	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 36: Gesamtkosten Erdgas-Adsorptionswärmepumpe	69
Tabelle 37: Bewertung der Versorgungssicherheit der Energieträger	70
Tabelle 38: Erdgas - Übersicht Verbrauch und Reserven	71
Tabelle 39: Wirtschaftlicher Vergleich: Gesamtergebnis	74
Tabelle 40: spezifische Treibhausgas-Emissionen der Energieträger	75
Tabelle 41: sonstige spezifische Schadstoffemissionen der Energieträger	76
Tabelle 42: Bewertung CO ₂ -Emissionen und sonstige Schadstoffe	77
Tabelle 43: Deutscher Strommix 2014.....	79
Tabelle 44: Erzeugung EE-Strom.	79
Tabelle 45: Nachhaltigkeit der Rohstoffherzeugung: Gesamtergebnis Strom	81
Tabelle 46: Ergebnis Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung	81
Tabelle 47: Ökologische Bewertung – Gesamtergebnis	82
Tabelle 48: Gesamtergebnis Heizungsvergleich.....	83
Tabelle 49: Übersicht Ergebnisse Sensitivitätsanalysen	86
Tabelle 50: Vergleich Emissionen Erdgas / Biomethan.....	877
Tabelle 51: Vergleich Szenario "Biogas" - Ausgangsszenario	877
Tabelle 52: Szenario - Ökostrom	88
Tabelle 53: Norm-Außentemperatur / Jahresmittel Außentemperatur Hamburg-Fuhlsbüttel	CXI
Tabelle 54: Marktanteile Heizsysteme an Neubauten	CXV
Tabelle 55: Marktanteile sekundäre Heizsysteme.....	CXV
Tabelle 56: Ergebnisse Sensitivitätsanalysen detailliert.....	CXXIII

Abkürzungsverzeichnis

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
Dena	Deutsche-Energie-Agentur
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare Energien Gesetz)
EnEV	Energieeinsparverordnung
HFKW	Halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
JAZ	Jahresarbeitszahl
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kWp	Kilowatt-Peak
LNG	Liquified Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
OPEC	Organization of Petrol Exporting Countries (Organisation Erdöl exportierender Länder)
PV	Photovoltaik
PTG	Power to Gas
SPF	Seasonal Performance Factor (gleichbedeutend mit: Jahresarbeitszahl)
U-Wert	Wärmeleitfähigkeitswert
WP	Wärmepumpe

Einheitenverzeichnis

a	Jahr
C	Celsius
g	Gramm
h	Stunde
k	kilo
J	Joule
K	Kelvin
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Q _P	Primärenergiebedarf
t _{NE}	Normaußentemperatur
T	Temperatur in Kelvin
U	Wärmedurchgangskoeffizient
W	Watt

1 Einführung in das Thema

Spätestens seit dem Atomunglück in Fukushima im März 2011 ist die Umstellung der Energieversorgung hin zu Erneuerbaren Energien (im Folgenden kurz: EE) unter dem Stichwort „Energiewende“ in das öffentliche Bewusstsein gerückt.

Im Fokus stehen die Förderung von Ökostrom durch das EEG¹ und die damit einhergehenden Strompreissteigerungen. Der Anteil von Strom aus EE an der Stromerzeugung hat sich von ca. 3,6% im Jahr 1990 auf knapp 26% im Jahr 2014 vervielfacht.² Die Entwicklung des EE-Anteils der Stromerzeugung seit 1990 ist in Anhang 1: dargestellt. Durch den fortgesetzten Kapazitätsausbau ist von einer weiteren Steigerung des EE-Anteils an der Stromerzeugung auszugehen.

Dabei hat der Stromverbrauch nur einen Anteil von 20% am Endenergieverbrauch und liegt damit hinter dem Wärmebedarf privater Haushalte.³ Diese hatten in 2012 einen Anteil von ca. 27% am Endenergieverbrauch in Deutschland.⁴ Davon entfielen ca. 84% auf die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser, daraus ergibt sich ein Anteil des Wärmebedarfes privater Haushalte am gesamten Endenergieverbrauch von ca. 22,7%. Der Anteil von EE daran betrug 14,9%⁵. Eine Übersicht bietet die folgende Tabelle 1:

Energieträger	Raumwärme		Warmwasser		Raumwärme + Warmwasser		sonstige	Gesamt
	in PJ	in %	in %	in %	in PJ	in %		
Mineralöl	422	25,4%	80,4	21,7%	502,4	24,7%	0	502,4
Gase	726,6	43,7%	176,9	47,8%	903,5	44,4%	3,6	907,1
Strom	31,6	1,9%	68,6	18,5%	100,2	4,9%	393,1	493,3
Fernwärme	154,3	9,3%	18,5	5,0%	172,8	8,5%	0	172,8
Kohle	51	3,1%	1,3	0,4%	52,3	2,6%	0	52,3
EE	279	16,8%	24,7	6,7%	303,7	14,9%	0	303,7
Gesamt	1664,5	100%	370,4	100%	2034,9	100%		2431,6

Tabelle 1: Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern und Anwendungsbereichen⁶

Aus diesen Zahlen lässt sich ein erheblicher Nachholbedarf bzw. ein großes Potenzial der EE im Wärmebereich ableiten. Die Steigerung des Anteils von EE an der Deckung des Energiebedarfs sowie die Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden sind zwei

¹ Abkürzung für das Gesetz zum Vorrang Erneuerbarer Energien, s. Bundesgesetzblatt 2000

² Vgl. AGEb (2014-2)

³ Vgl. AGEb (2014-1), S. 17

⁴ Vgl. ebenda, S. 9, S. 20

⁵ Vgl. AGEb (2013), S. 27. Unter Berücksichtigung des zuvor genannten EE-Anteils der Stromerzeugung ergibt sich ein EE-Anteil von 16,2% an der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung, der Anteil von EE an Fernwärme ist nicht berücksichtigt

⁶ Vgl. AGEb 2013, S. 27

wichtige Bestandteile des Energiekonzepts der Bundesregierung. Deren Ziel ist es, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen.⁷

Für Neubauten bestehen, abgeleitet von EU-Richtlinien, strenge Kriterien zur Umsetzung der oben genannten Ziele. Diese umfassen sowohl den Dämmungsstandard als auch die Umweltverträglichkeit des Energieträgers. Während in der Vergangenheit fossile Energieträger bei der Gebäudebeheizung dominierten, stehen mittlerweile zahlreiche unterschiedlicher Heizkonzepte bzw. Kombinationen von Heizsystemen zur Auswahl, die auf regenerative Energieträger zurückgreifen. Diese Vielfalt macht es potenziellen Bauherren schwer, das jeweils passende Heizungskonzept zu identifizieren.

1.1 Zielformulierung

Ziel dieser Arbeit ist es, Bauherren durch einen objektiven Vergleich aktueller Heizungskonzepte eine Entscheidungshilfe für die Auswahl des Heizungssystems zu geben.

Anhand einer beispielhaften Planung eines Einfamilienhauses zeigt diese Arbeit die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Heizungskonzepte transparent auf. Der Vergleich beinhaltet sowohl ökologische als auch ökonomische Kriterien, so dass ein Kompromiss aus beiden Bereichen angestrebt wird.

Aufgrund der Vielzahl der Parameter wie Ausrichtung, Gebäudeform, Größe, Dämmung und dem Nutzerverhalten ist eine pauschale Übertragung der Ergebnisse nicht möglich, es sollen jedoch Tendenzen aufgezeigt werden, die für bestimmte Konstellationen von Parametern zum Tragen kommen.

Im Zentrum dieser Arbeit liegt die Nutzung von EE als Energiequelle, dabei soll als Vergleich eine konventionelle Gasheizung dienen.

1.2 Abgrenzung des Themas und Gang der Untersuchung

Aufgrund der Komplexität ist eine Abgrenzung des Themas unverzichtbar. Die folgende Untersuchung beschränkt sich auf Einfamilienhäuser. Thermodynamische Zusammenhänge, relevante Normen sowie die Funktionsprinzipien der Heizsysteme werden vereinfacht dargestellt. Weiterhin ist sommerlicher Wärmeschutz nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

Das Thema Baustoffe und Dämmung wird nur am Rande betrachtet, insofern durch die Dämmung der Energiebedarf des Gebäudes bestimmt wird.

⁷ Vgl. BMWI 2014

Als Rahmen für die Planung wird die Energiereinsparverordnung (im Folgenden kurz: EnEV) von 2009⁸ genutzt, da diese für die geplante Errichtung im Jahr 2015 ausschlaggebend ist. Auf die Änderungen in der Neufassung der EnEV (im Folgenden: EnEV 2014)⁹ welche während des Bearbeitungszeitraums in Kraft trat, aber erst für Neubauten ab dem Jahr 2016 gilt, wird an den entsprechenden Stelle verwiesen.

In Kapitel 2 wird ein Überblick über die EnEV 2009 mit den darin enthaltenen Anforderungen an Neubauten gegeben. Zudem werden in diesem Kapitel thermodynamische Grundlagen kurz dargestellt und wichtige Begriffe erklärt.

Es folgt in Kapitel 3 die Vorstellung der Hausplanung mit Bezugnahme auf Standort, Größe, Bauart, und verwendete Dämmmaterialien. Aus dem ausgewählten Grundriss und Haustyp wird anschließend mittels Energieberatersoftware der (theoretische) Endenergiebedarf des Hauses berechnet sowie eine Heizlastberechnung erstellt.

In Kapitel 4 wird zunächst ein kurzer Überblick über den Heizungsmarkt in Deutschland gegeben. Anschließend werden gängige Heizungssysteme sowie Kombinationen von Heizsystemen erläutert und auf das Planungsbeispiel aus Kapitel 3 angewandt. Weiterhin werden in Kapitel 4 Energiespeicher kurz dargestellt.

Kapitel 5 bildet mit der Definition der Vergleichskriterien sowie dem anschließenden Vergleich der unterschiedlichen Heizkonzepte den Schwerpunkt dieser Arbeit. Um über das gewählte Planungsbeispiel hinaus allgemeinere Aussagen zur Vorteilhaftigkeit der einzelnen Heizsysteme unter bestimmten Bedingungen zu treffen, werden im zweiten Teil Sensitivitätsanalysen mit geänderten Planungsparametern (u.a. Hausgröße, Dämmung, erwartete Preisentwicklung) erstellt.

Es folgen im abschließenden Kapitel 6 eine Bewertung der Ergebnisse sowie ein kurzer Ausblick auf die zukünftige Entwicklung des Heizungsmarktes.

1.3 Geschichte und Entwicklung der Gebäudetechnik

Dieses Kapitel gibt einen kurzen historischen Einstieg in das Thema dieser Arbeit.

Die offene Feuerstelle gilt als erste Wärmequelle. Von den Römern wurde die sogenannte Hypokaustenheizung entwickelt, die eine Art der Fußbodenheizung darstellte. Diese geriet jedoch mit dem Untergang der Römischen Hochkultur in Vergessenheit. Eine verbesserte Wärmeausnutzung erfolgte erst deutlich später, zunächst über einen offenen Kamin, später über einen Kachelofen. Es folgten im 18. Jahrhundert die Erfindung der Warmwasser-

⁸ Vgl. Bundesgesetzblatt (2009)

⁹ Vgl. Bundesgesetzblatt (2013)

Zentralheizung und im 19. Jahrhundert die Radiatoren-Heizung, sowie zahlreiche Innovationsschritte zu modernen Heizungssystemen.¹⁰ Als Brennstoffe dienten zunächst Holz, später Braun- und Steinkohle sowie ab Beginn des 20. Jahrhunderts Öl und Gas.

Wärmedämmung spielte lange Zeit keine große Rolle. Paradoxerweise wurde die Dämmung über lange Zeit sogar verschlechtert. Während im ersten Jahrtausend n. Chr. Häuser in Regel aus Holzwänden und Strohdächern mit relativ guten Wärmedämmeigenschaften bestanden, wiesen die ab ca. dem 11. Jahrhundert gebauten Fachwerkhäuser mit Ziegeln oder Feldsteinen in den Wänden deutlich schlechtere Dämmwerte auf. Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert folgte der Massivbau, bei dem Wert auf Stabilität anstelle von Dämmung gelegt wurde. Es setzte sich in Deutschland die Ziegelwand mit in der Regel 38 cm Wandstärke durch. Obwohl in der Zwischenzeit theoretisches Wissen zur Verfügung stand, spielte Wärmedämmung bis in die Nachkriegszeit hinein keine wichtige Rolle. Primäres Ziel des Wärmeschutzes war es, Schäden an Gebäuden zu vermeiden¹¹

Sensibilität für die Themen Heiztechnik und Dämmung wurde erst mit der Ölkrise im Jahr 1973 geweckt. Plötzlich ansteigende Energiepreise schafften das Bewusstsein für die Notwendigkeit verbesserter Energieeffizienz sowie für Alternativen zu fossilen Brennstoffen. Parallel stieg die Sensibilität in der Bevölkerung gegenüber der zunehmenden Umweltverschmutzung und die Umweltbewegung gewann seit den 1970er Jahren an Bedeutung. Hinzu kamen politische Risiken wie Versorgungssicherheit, da Deutschland auf Importe fossiler Rohstoffe aus totalitären Staaten angewiesen war und noch immer ist.

Es folgten einerseits verschärfte gesetzliche Anforderungen zur Energieeinsparung. Zudem wurden neue Energieträger gesucht, z.B. Sonnenenergie und Umweltwärme. Entsprechend wurde an vielen Stellen an der Reduzierung des Energieverbrauchs von Wohngebäuden gearbeitet, genannt seien exemplarisch folgende:

- Erhöhung der Dämmung an Wänden, Dächern und Decken durch neue Materialien bzw. größere Dämmstärken
- Effizienzsteigerung von Heizungen u.a. durch Nutzung der Brennwertmethode (s. 4.1.1)
- Verstärkte Nutzung regenerativer Wärmequellen (Sonne, Umgebungswärme, Holz).

Heute gibt es eine Vielzahl umweltschonender Hauskonzepte, genannt seien Niedrigenergiehäuser, Passivhäuser, Null-Energie-Häuser und Energie-Plus-Häuser, für die eine große Anzahl unterschiedlicher Heizsysteme zur Auswahl stehen.

¹⁰ Vgl. Tiator (2006), S. 15

¹¹ Vgl. WKSBS (2011), S. 6 ff

2 Grundlagen

Das folgende Kapitel vermittelt Grundlagen, die für das weitere Verständnis der Arbeit notwendig sind. Dies umfasst zunächst die thermodynamischen Grundlagen und Begriffsdefinitionen, wobei Basiswissen zur Wärmeübertragung vorausgesetzt wird. Darauf folgt ein kurzer Überblick über die gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Wohngebäuden in Deutschland.

2.1 Grundlagen der Wärmeübertragung / Begriffsdefinitionen

Einige für die folgenden Berechnungen relevanten thermodynamischen Begriffe werden an dieser Stelle kurz vorgestellt. Thermodynamische Grundlagen werden vorausgesetzt.

2.1.1 Arten von Wärmeübertragung

Folgende Arten von Wärmeübertragung werden unterschieden:

Wärmeleitung: Übertragung von Energie zwischen Molekülen/Atomen/Metallgitter ohne Materialtransport in einem ruhenden Stoff. Es tritt ein dabei ein Wärmestrom in Richtung abnehmender Temperatur auf.¹²

Beispiel: Wärmefluss durch eine Wand, Decke, Fensterscheibe

Konvektion (Wärmeströmung): Wärme wird von einem strömenden Fluid (Gase & Flüssigkeiten) als Enthalpie/innere Energie mitgeführt. Das strömende Fluid nimmt von einer Oberfläche Wärme auf bzw. gibt Wärme an eine Oberfläche ab.¹³

Beispiel: Wärmeübertrager in Heizkesseln; Radiatorheizungen, Lüftungswärmeverluste

Wärmestrahlung: Austausch von Energie zwischen Körpern durch elektromagnetische Wellen. Dieser Austausch findet kontinuierlich statt, eine Wärmeübertragung findet bei Temperaturunterschieden statt.¹⁴

Beispiel: Sonnenstrahlen, Kamin, Heizstrahler

Häufig treten die drei oben genannten Arten der Wärmeübertragung gemeinsam auf bzw. überlagern sich. Beispielsweise findet in einem Heizkessel eine Wärmeleitung über die Kupferoberfläche zwischen dem Heizkessel und dem Transportrohr statt, während gleichzeitig die Wärme mittels Konvektion transportiert wird. Ein weiteres Beispiel ist die Abgabe von Wärme aus einer Wandheizung oder Fußbodenheizung in einen Raum. Nach der Konvektion des Heizungswassers an der Heizschlange und Wärmeleitung durch den Estrich und den

¹² Vgl. Herwig, S. 15 & 21

¹³ Vgl. ebenda, S. 63

¹⁴ Vgl. ebenda, S. 167

Fußboden, erfolgt die Wärmeübertragung in der Raum mit einem Anteil von ca. 60% durch Wärmestrahlung.

2.1.2 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden einige grundlegende Begriffe aus dem Bereich der Wärmeübertragung bzw. Heiztechnik definiert bzw. kurz erklärt.

Wärmedämmung: Wärmedämmung ist im Duden definiert als „Schutz gegen Wärme oder gegen Wärmeverluste“.¹⁵ Bezogen auf Wohngebäude besteht in der Regel das Ziel, eine bestimmte Raumtemperatur bzw. einen bestimmten Temperaturkorridor aufrecht zu erhalten. In der DIN 18599 wird vom konditionierten Raum gesprochen, welcher wie folgt definiert ist: „Raum und/oder Raumgruppe, die auf eine bestimmte Solltemperatur beheizt und/oder gekühlt und/oder be- und entlüftet und/oder befeuchtet und/oder beleuchtet und/oder mit Trinkwarmwasser versorgt werden“¹⁶ Als Vergleichsmaßstab dient in der Regel die Außenluft bzw. umgebende Bodenschichten. Da in Hamburg die durchschnittliche Außentemperatur mit ca. 9,2°C¹⁷ deutlich unter der normalen Soll-Innentemperatur von 20°C liegt, betrifft die Wärmedämmung über weite Teile des Jahres den Wärmefluss von innen nach außen.

Transmissionswärmeverlust: Der Transmissionswärmeverlust ist die Menge an Wärme, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums durch Wärmeleitung durch die Gebäudehülle von innen nach außen abgegeben wird. Ziel ist es, durch Dämmung den Transmissionswärmeverlust zu minimieren.

Lüftungswärmeverlust: Der Lüftungswärmeverlust ist die Menge an Wärme, die durch die Belüftung eines Gebäudes innerhalb eines bestimmten Zeitraums aus dem Gebäude entweicht. Die Lüftungswärmeverluste beinhalten sowohl die gewollte Lüftung als auch die ungewollte Belüftung durch Undichtheiten oder Schornsteine. Eine Lüftung ist notwendig, um die hygienische Qualität des Wohnraums einzuhalten. Insbesondere müssen Feuchtigkeit und Schadstoffe aus dem Wohnraum gelangen sowie die verbrauchte Luft durch Frischluft ersetzt werden. Zur Reduzierung der Wärmeverluste beim Lüften existieren technische Lösungen zur Wärmerückgewinnung, bei denen die Wärmeenergie der Abluft über einen Wärmeübertrager an die hereinströmende Außenluft übertragen wird.

(Spezifische) Wärmeleitfähigkeit (λ): Beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Wärme durch einen Stoff eines bestimmten Durchmessers ausbreitet.

¹⁵ S. Duden

¹⁶ S. DIN 18599-1, S. 12

¹⁷ Vgl. IWU (2014-1), die Auswertung erfolgt auf Basis der Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes an der Messstation Hamburg Fuhlsbüttel

Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit lautet $W / (m * K)$.

Wärmedurchgangskoeffizient (im Folgenden kurz: U-Wert): Gibt die Wärmeleitung durch ein Bauteil an. Der U-Wert lässt sich für einen mehrschichtigen Wandaufbau unter Berücksichtigung der jeweiligen Schichtdickmesser und deren spezifischen Wärmeleitfähigkeiten berechnen. Der U-Wert beinhaltet den Wärmeübergangswiderstand innen und außen und ist maßgebliche Berechnungsgröße für den Transmissionswärmeverlust. Die Einheit des U-Wertes lautet $W / (m^2 * K)$.

Primärenergie: Energiegehalt des ursprünglichen Energieträgers (z.B. Kohle, Erdgas) vor Verlusten.

Endenergie: Nach Verlusten durch Gewinnung, Umwandlung und Transport innerhalb der Systemgrenzen eines Gebäudes zur Verfügung stehende Energiemenge als Teilmenge der Primärenergie

Nutzenergie: Anteil der Endenergie, der tatsächlich beim Verbraucher genutzt wird, d.h. Endenergie abzüglich Anlagenverlusten.¹⁸

Primärenergiebedarf (bezogen auf Gebäude): Energiemenge, die zur Deckung des jährlichen Heizenergiebedarfs und des Warmwasserbedarfs benötigt wird. Energiemengen, die bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen, werden berücksichtigt.¹⁹

2.2 Einführung in die Energieeinsparverordnung (EnEV)

Das im Titel dieser Arbeit verwendete Wort „Niedrigenergiehaus“ ist nicht eindeutig definiert. In Deutschland stellt die Energieeinsparverordnung (Nachfolgend kurz: EnEV)²⁰ Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden. Weiterhin regelt das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, dass bei Neubauten ein Mindestanteil des Wärmeenergiebedarfs durch EE gedeckt werden muss.²¹ Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz nimmt direkten Bezug auf die EnEV, indem es als Ersatzmaßnahme für die Verwendung von EE Energieeinsparmaßnahmen erlaubt. Dabei müssen die Vorgaben der jeweils gültigen EnEV um mindestens 15% unterschritten werden müssen.²²

¹⁸ Vgl. Pistohl, S. E3

¹⁹ Vgl. Tiator (2006), S. 42

²⁰ Im Volltext: „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)“

²¹ Vgl. Bundesgesetzblatt (2008), S. 1658 f

²² Vgl. ebenda, S. 1665

2.2.1 Entwicklung der EnEV

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, war die erste Ölkrise im Jahr 1973 der Ausgangspunkt für die Suche nach Energiesparpotenzialen. Im Jahr 1976 wurde die 1. Wärmeschutzverordnung verabschiedet, welche im Jahr 1984 und 1995 novelliert wurde.

Die erste Fassung der EnEV wurde am 16. November 2001 vom Bundestag verabschiedet und trat am 01. Februar 2002 in Kraft. Sie ersetzte damit die für Gebäude bis dahin geltende Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung.²³ In der zugehörigen Begründung wurden für Neubauten u.a. folgende Ziele verfolgt:

- Senkung des Energiebedarfs für Heizung und Warmwasserbereitung um 30% gegenüber bisherigen Gesetzen
- Ganzheitliche Betrachtung von Neubauten unter Berücksichtigung der Anlagentechnik
- Erleichterung des Einsatzes von EE
- Erhöhung der Transparenz für Bauherren durch aussagefähige Energieausweise²⁴

Eine erste Revision erfolgte im Jahr 2004, bevor im Rahmen einer grundlegenden Reform der EnEV im Jahr 2007 die EU-Gebäuderichtlinie von 2002 umgesetzt wurde²⁵

Ziel der EU-Richtlinie war die Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden. Sie sah in Artikel 3 die Verpflichtung der Mitgliedstaaten zur Festlegung einer Berechnungsmethode zur Gesamtenergieeffizienz vor, zu der im Anhang ein grundlegender Rahmen festgelegt wurde. Weiterhin wurden Anforderungen an die Energieeffizienz von Neu- und Bestandsbauten gesetzt (Artikel 4-6). In Artikel 7 wurde die Pflicht zur Erstellung eines Energieausweises bei Bau, Verkauf und Vermietung festgelegt.²⁶

Im Jahr 2009 folgte eine weitere Änderung der EnEV (Im Folgenden kurz: EnEV 2009)²⁷, die für diese Arbeit maßgeblich ist. Inhalt und Aufbau der EnEV 2009 werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

Im November 2013 wurde eine weitere Überarbeitung der EnEV vom Bundestag verabschiedet, die seit dem 01.05.2014 bundesweit gilt. In §1 ist darin das Ziel der Bundesregierung verankert, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Der Jahres-Primärenergiebedarf eines Referenzhauses muss für Gebäude mit Baubeginn ab dem 01.01.2016 um 25% unter den bisher gültigen Werten liegen.²⁸

²³ Vgl. Bundesgesetzblatt (2001), S. 3091

²⁴ Vgl. EnEV-Info, S. 1f

²⁵ Vgl. Bundesgesetzblatt (2004) & Bundesgesetzblatt (2007), Amtsblatt der EG (2003)

²⁶ Vgl. Amtsblatt der EG (2003)

²⁷ Vgl. Bundesgesetzblatt (2009)

²⁸ Vgl. Bundesgesetzblatt (2013), S. 3961

2.2.2 EV 2009 – Aufbau und Inhalt

Die EnEV 2009 verfolgt einen integrierten Ansatz zur Ermittlung der Energieeffizienz eines Gebäudes. Berücksichtigt werden Gebäudeaufbau, Dämmung, Standort und Ausrichtung sowie die verwendete Anlagentechnik. Dabei gibt die EnEV 2009 Vorgaben zum maximalen Primärenergiebedarf $Q_{P,REF}$ und zum maximalen spezifischen Transmissionswärmeverlust $H_{T',REF}$ eines Referenzgebäudes am selben Standort. Das Referenzgebäude hat identische Abmessungen wie das geplante Gebäude, d.h. für jedes geplante Gebäude wird ein individuelles Referenzgebäude berechnet.²⁹

Für das tatsächlich geplante Gebäude sowie für das Referenzgebäude erfolgt eine Berechnung des Primärenergiebedarfs Q_P und des spezifischen Transmissionswärmeverlustes $H_{T'}$. Als Berechnungsmethode stehen die Normen DIN 18599 und DIN 4108 zur Auswahl. Dabei wird zunächst der Endenergiebedarf Q_E berechnet, aus dem mittels des Primärenergiefaktors f_p der Primärenergiebedarf ermittelt wird: $Q_P = f_p \times Q_E$.

Nachfolgend eine Übersicht der Primärenergiefaktoren für gängige Energieträger:

Energieträger	Primärenergiefaktor f_p (nicht erneuerbarer Anteil)
Erdgas H, Heizöl	1,1
Holz, Biogas	0,2
Strom, allgemeiner Strom Mix	2,4 (ab 2016: 1,8 ³⁰)
Umweltenergie (Solarenergie, Erdwärme, Umgebungswärme)	0,0

Tabelle 2: Primärenergiefaktoren ausgewählter Energieträger. Quelle: DIN 18599-1, S. 67

Der hohe Primärenergiefaktor für Strom resultiert aus den Umwandlungsverlusten in den fossilen Kraftwerken. Durch den steigenden Anteil von EE-Strom wurde der Primärenergiefaktor für Strom von ursprünglich 3,0³¹ mehrfach auf aktuell 2,4 und 1,8 ab dem 01.01.2016 gesenkt.

Die EnEV gibt somit keine allgemeinen Vorschriften für den absoluten Energiebedarf für Einfamilienhäuser, sondern nur einen Höchstwert für den Energiebedarf des jeweiligen geplanten Hauses. Aufgrund der Komplexität der Normen werden die entsprechenden Berechnungen zur Ermittlung der Kennzahlen in der Regel durch Computerprogramme durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2.1).

²⁹ Vgl. Bundesgesetzblatt (2009), S. 955 und S. 960 ff

³⁰ Vgl. Bundesgesetzblatt (2013), S. 3963

³¹ Vgl. DIN V 4701-10 (2003), S. 139

2.2.3 Anforderungen an Neubauten

Die Anforderungen der EnEV 2009 an den maximalen Primärenergiebedarf sowie den maximalen Transmissionskoeffizienten von Neubauten sind in Anhang 2: dargestellt.

Durch die Methodik der EnEV ist es den Bauherren überlassen, wie sie die Anforderungen erreichen. Solange der Mindestwert des Transmissionskoeffizienten eingehalten wird, hat der Bauherr die Wahl, den geforderten Primärenergiebedarf durch gute Dämmung oder durch umweltfreundliche Anlagentechnik zu erreichen. Beispielsweise kann eine etwas schlechtere Wärmedämmung durch regenerative Wärmequellen mit niedrigem Primärenergiefaktor kompensiert werden.

Der Staat fördert über die staatseigene KfW-Bank Häuser, die die Mindestanforderungen der EnEV 2009 deutlich unterschreiten. Die KfW unterscheidet in ihrem Förderprogramm Nr. 153 zwischen KfW70, KfW55 und KfW40.³² Die Höhe der Förderung hängt ab vom prozentualen Verhältnis von Q_P an $Q_{P\text{ REF}}$ und H_T an $H_{T\text{ REF}}$ sowie vom absoluten Primärenergiebedarf pro m^2 . Für das Programm „KfW 55“ darf der Primärenergiebedarf des geplanten Hauses maximal 55% vom $Q_{P\text{ REF}}$ und der Transmissionskoeffizient maximal 70% von $H_{T\text{ REF}}$ betragen, zudem darf der Primärenergiebedarf einen Wert von 40 kWh/m² nicht überschreiten. Die zum Zeitpunkt der Erstellung gültigen Förderbedingungen sind in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt:

Programm	Voraussetzungen (Maximalwerte)				Förderung
	Q_P in % von $Q_{P\text{ REF}}$	Q_P in kWh/m ² p.a.	H_T in % von $H_{T\text{ REF}}$	Q_H in kWh/m ² p.a. (nur Passivhaus)	
KfW 70	70%	k.a.	85%	k.a	Max. 50.000 EUR geförderter Kredit
KfW 55 (incl. Passivhaus)	55%	40	70%	15	s. KfW 70 + Tilgungszuschuss 5%
KfW 40 (incl. Passivhaus)	40%	30	55%	15	s. KfW 70 + Tilgungszuschuss 10%

Tabelle 3: KfW-Förderbedingungen, Quelle: KfW (2014)

³² S. KfW (2014)

3 Planungsbeispiel Einfamilienhaus

In diesem Kapitel wird das geplante Einfamilienhaus, welches als Berechnungsgrundlage für den Heizungsvergleich in Kapitel 5 dient, vorgestellt. Die Vorstellung beinhaltet neben Lage und Größe auch die Planungskriterien. Anschließend werden für das geplante Haus eine Energiebedarfsrechnung gemäß EnEV sowie eine Heizlastberechnung zur Ermittlung der benötigten Heizungsgröße durchgeführt.

3.1 Vorstellung der Hausplanung

3.1.1 Lage des Grundstücks

Das geplante Einfamilienhaus soll in 21244 Buchholz in der Nordheide, ca. 30 km südlich von Hamburg entstehen. Es handelt sich um ein ca. 800 m² großes Grundstück in einem gewachsenen Wohngebiet im Stadtteil Steinbeck. Das Grundstück hat eine leichte Hanglage und fällt von West nach Ost auf der Grundstücksbreite von ca. 27 m um ca. 3 m ab. Ein Grundstücksplan mit Höhenlinien ist in Anhang 3: abgebildet.

Das Haus wird nach Süden ausgerichtet und nicht unterkellert sein. Im östlichen Bereich des Grundstückes ist aufgrund der Hanglage eine Aufschüttung um bis zu 1,5 m notwendig.

Für das Wohngebiet besteht kein detaillierter Bebauungsplan, die Bebauung richtet sich nach der umliegenden Bebauung. Nach telefonischer Angabe einer Mitarbeiterin des Bauamtes Buchholz beträgt die Grundflächenzahl 0,2, d.h. eine Grundfläche von 160 m ist zulässig. Weiterhin ist eine eingeschossige Bauweise zugelassen. Gemäß § 2 (7) der Niedersächsischen Landesbauordnung ist ein oberstes Geschoss nur dann ein Vollgeschoss, wenn es über mehr als zwei Drittel der Grundfläche des darunter liegenden Stockwerks eine lichte Höhe von mindestens 2,20 m hat.³³

3.1.2 Größe des Hauses

Aufgrund der Begrenzung der Geschoszahl ist eine kompakte und energetisch vorteilhafte quadratische Form des Hauses nicht realisierbar. Stattdessen ist das Haus mit Satteldach geplant, wodurch sich die im vorherigen Abschnitt genannten Anforderungen der Niedersächsischen Bauordnung erfüllen lassen.

Die Grundfläche des Hauses beträgt 11 x 10,5 m, das Haus ist für 4-5 Personen ausgelegt. Im Erdgeschoss verfügt es über eine halboffene Küche, ein Wohnzimmer, einen Hauswirtschaftsraum, ein kleines Bad mit Dusche sowie ein Arbeitszimmer. Letzteres kann im

³³ Vgl. NBauO

Bedarfsfall als Schlafzimmer genutzt werden und ermöglicht ein ggf. notwendiges altersgerechtes Wohnen auf einer Ebene. Das Obergeschoss besteht aus einem Elternschlafzimmer, zwei Kinderzimmern, einem Mehrzweckzimmer, welches ggf. in ein drittes Kinderzimmer umgewandelt werden kann, sowie einem Bad. Der Dachboden wird zunächst nicht ausgebaut und steht als Ausbaureserve zur Verfügung.

Die Hausplanung wurde mit einer Studentenversion der Architektensoftware „Archicad-17“ des Softwareherstellers Graphisoft erstellt.³⁴ Der Grundriss ist in Anhang 4: abgebildet. Nachfolgende Abbildung 1 zeigt eine 3-D Ansicht des geplanten Hauses.



Abbildung 1: Visualisierung des geplanten Einfamilienhauses, Blickrichtung: Süd West. Eigene Darstellung, erstellt mit „Archicad“

³⁴ Die Studentenversion ist erhältlich unter: <https://myarchicad.com/>

Nachfolgend eine Übersicht der Hausdaten:

Grundfläche:	115 m ² (11,5 m x 10 m)
Dachneigung:	45°
Ausrichtung:	Süd
Geschosshöhe:	2,7 m
Lichte Raumhöhe:	2,5 m
Beheiztes Volumen (V_e):	610,8 m ³
Hüllfläche (A):	442,1 m ²
Kompaktheit (Verhältnis A/V_e):	0,72
Wohnfläche:	162,9 m ²
Nutzfläche ($0,32 \times V_e$):	195,4 m ²

Tabelle 4: Übersicht Hausdaten

3.1.3 Planungsgrundlagen

Bei der Hausplanung wird versucht, ökologische und baubiologische Kriterien soweit möglich zu berücksichtigen. Ursprünglich war geplant, das Haus nach Passivhausstandard zu bauen. Da die Kosten für die letzten Prozent der Energieeinsparung als unverhältnismäßig hoch eingeschätzt wurden, fiel die Entscheidung, nicht den Passivhausstandard zu verfolgen.

Die Abwägung zwischen Kosten und Ökologie spiegelt sich unter anderem in der Auswahl der Bau- und Dämmstoffe wider. Zunächst wurde abgewogen zwischen Holzbau und massiver Bauweise. Primär aus Kostengründen wurde die Massivbauweise ausgewählt.

Alle beheizten Räume werden mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Vorteile der Fußbodenheizung sind im Vergleich zu Radiatorheizkörpern niedrigere Vorlauftemperaturen, was insbesondere für die Nutzung von Wärmepumpen, Solarthermie sowie für Brennwerttechnik vorteilhaft ist (s. Kapitel 4). Das Heizungssystem soll als zentrales System ebenfalls die Warmwasserbereitstellung gewährleisten.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Belüftung bei gleichzeitiger Minimierung des Lüftungswärmeverlustes ist der Einbau einer maschinellen Lüftungsanlage vorteilhaft. Diese kann entweder durch ein zentrales oder ein dezentrales System realisiert werden. Ein zentrales System bietet in der Regel den Vorteil, dass ein höherer Grad an Wärmerückgewinnung möglich ist. Bei dezentralen Systemen entfallen Rohrleitungen, welche einen hohen Wartungs- und Reinigungsbedarf haben. Die Wahl fiel auf ein dezentrales System.

3.1.4 Verwendete Baustoffe

Bei der Auswahl der Baustoffe wurde auf ökologische und baubiologische Verträglichkeit der verwendeten Materialien geachtet, während gleichzeitig eine gute Dämmung angestrebt wurde. Die folgenden Baumaterialien sollen Verwendung finden:

Außenwand

Als Baustoff für die Außenwände wurde Poroton T7-49-P ausgewählt. Allgemein handelt es sich bei Poroton um Hohllochziegel aus Ton.³⁵ Bei der gewählten Ausführung sind die Ziegel mit dem Dämmstoff Perlite verfüllt. Perlite ist ein Gestein vulkanischen Ursprungs, welches kurzzeitig auf über 1000°C erhitzt und dabei auf das 15-20 fache seines ursprünglichen Gewichtes aufgebläht wird.³⁶ Die Ziegel kombinieren daher die tragende Konstruktion mit der Dämmung in einem einschaligen Mauerwerk. Die Wärmeleitfähigkeit des gewählten Werkstoffes beträgt 0,07 W/(m*K). Zur Innenseite werden die Porotonziegel mit einer ca. 1cm dicken Putzschicht bedeckt. Die Außenseite wird zum Schutz gegen Witterungseinflüsse mit einer Klinkerfassade versehen, dazwischen dient ein schmaler Luftspalt zum Abtransport von Feuchtigkeit. Für die gesamte Wand resultiert daraus ein U-Wert von 0,13 W/(m²K) wie in Tabelle 5 dargestellt.

	Wärmeleitfähigkeit	Wanddicke	Wärmedurchgangswiderstand
Außenwand	λ [W/mK]	d in m	R [m²K/W]
Wärmeübergangswiderstand (innen)			0,13
Innenputz	0,1	0,01	0,1
Poroton T7-49-P	0,07	0,49	7
Luftspalt		0,01	
Ziegel/Klinker	0,5	0,115	0,23
Wärmeübergangswiderstand (außen)			0,04
Summe			7,5
Wärmedurchgangskoeffizient (U)	0,13	W/(m²K)	

Tabelle 5: Berechnung U-Wert Außenwand

Oberste Geschossdecke: Die oberste Geschossdecke wird aus Beton gegossen und mit Holzweichfasermatten gedämmt. U-Wert: 0,2

Dachstuhlämmung: Der Dachstuhl wird zunächst nur bis zur obersten Geschossdecke gedämmt. Als Dämmmaterial werden Holzfaserdämmplatten benutzt, die Dämmung wird als Zwischensparrendämmung ausgeführt. U-Wert: 0,2 W/(m²K)

³⁵ Weitere Informationen zu Poroton unter: <http://poroton.org/>

³⁶ Vgl. NABU (2001), S. 25

Bodenplatte: Stahlbetonplatte, Dämmung mit Glasschaumschotter (Recyclingglas), U-Wert: 0,25 W/(m²K)

Fenster: 3-fach-Verglasung. Rahmen aus Kunststoff-Kammersystem. Der U-Wert des gesamten Fensters (U_w) beinhaltet den U-Wert des Fensterglases (U_g) und den U-Wert des Rahmens incl. Abstandshalters (U_i): 0,8 W/(m²K)

3.2 Ermittlung des Energiebedarfes

Auf Basis der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Parameter wie Größe und Form des Gebäudes sowie der eingesetzten Baustoffe erfolgen in diesem Abschnitt die Ermittlung des Energiebedarfes sowie eine Heizlastberechnung. Bei der Berechnung des Primärenergiebedarfes sowie bei der Heizlastberechnung wird der reduzierte pauschale Wärmebrückenzuschlag ΔU_{wB} von 0,05 W/(m²K) gemäß Beiblatt 2 zur DIN V 4108 verwendet.³⁷ Die Einhaltung der entsprechenden Vorgaben ist bei der Errichtung des Hauses zu überwachen.

3.2.1 Ermittlung des Endenergie- / Primärenergiebedarfs nach EnEV

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, ist der Primärenergiebedarf eine der Zielgrößen der EnEV. Für die ökonomische und ökologische Betrachtung ist dagegen vielmehr der Endenergiebedarf aussagekräftig, aus dem der Primärenergiebedarf errechnet wird. Zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs erlaubt die EnEV mit der DIN 18599 und der DIN 4108 in Verbindung mit DIN 4701 zwei Berechnungsverfahren.³⁸

Folgende Einflussgrößen bestimmen maßgeblich den Heizwärmebedarf:

- Transmissionswärmeverlust: Wärmeleitung durch Bauteile und Wärmeübergang an den Oberflächen
- Lüftungswärmeverluste: Austausch warmer Innenluft durch kalte Außenluft
- Solare Gewinne: Transmission durch transparente Bauteile und in geringem Maße Absorption an nicht transparenten Oberflächen
- Interne Wärmegewinne: Wärmeabgabe elektrischer Geräte, Beleuchtung und Körperwärme.³⁹

Für die Berechnung des Primär- bzw. Endenergiebedarfes wurde das Programm „Energieberater 18599“ der Firma Hottgenroth Software GmbH & Co. KG genutzt.⁴⁰ Als Berechnungsmethode diente die DIN 4108-6 in Verbindung mit DIN 4701. Da der

³⁷ Vgl. DIN 4108 Beiblatt 2

³⁸ Vgl. EnEV 2009, Anlage 1, Abschnitt 2.1.1 und 2.1.2

³⁹ Vgl. DIN 4108-6 (2003), S. 11

⁴⁰ Genutzt wurde eine kostenlose Demoversion, die unter folgender Adresse zu beziehen ist:
<https://www.hottgenroth.de/service/demo-versionen/>

Energiebedarf auch von der Anlagentechnik beeinflusst wird, wurde für alle ausgewählten Heizungsvarianten eine separate Berechnung durchgeführt. Die Transmissionswärmeverluste sowie die Lüftungswärmeverluste waren jeweils identisch, lediglich die Anlagenverluste differieren abhängig von der verwendeten Heiztechnik.

Die Vorgaben der EnEV zum maximal zulässigen Transmissionswärmeverlust von 0,4 W/(m²K) werden eingehalten, wie aus Tabelle 6 erkennbar ist.⁴¹ Ebenfalls eingehalten werden die Anforderungen der KfW-Förderprogramme KfW 70 und KfW 55 an den Transmissionswärmeverlust, während das Programm KfW 40 nicht erreicht wird (vgl. Kapitel 2.2.3, Tabelle 3).

	Ist-Wert	Referenz- gebäude	KfW 70	KfW 55	KfW 40
Jahres-Primärenergiebedarf QP [kWh/m²]	siehe Tabelle 7	74,97	52,48	41,23	29,99
Transmissionswärmeverlust H _T [W/(m²K)]	0,245	0,354	0,300	0,247	0,194

Tabelle 6: Erfüllung EnEV-Anforderungen

Aufgrund der unterschiedlichen Energieträger unterscheiden sich die Varianten hinsichtlich des Primär- und Endenergiebedarfes. Bis auf die Erdgasheizung und die Erdgas-Adsorptions-Wärmepumpe erreichen alle Heizungssysteme den Standard „KfW 55“, wie aus Tabelle 7 erkennbar ist:

Heizsystem	Endenergie- bedarf Heizung + Warmwasser	Hilfs- energie -	Endenergie- bedarf Gesamt	Solarthermie / PV-Ertrag angerechnet	Primärenergie- bedarf	
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh/m²
Erdgas	7.805	948	8.753		10.861	55,6
Erdgas + Solarthermie	4.397	1.082	5.479	3.295	7.434	38,0
Erdgas-Adsorptions-WP	6.426	1.035	7.461		9.553	48,9
Erdgas-Adsorp- WP+Solarth.	4.065	1.171	5.236	3.070	7.282	37,26
Pelletheizung	8.631	1.014	9.645		4.160	21,3
Pelletheizung Solarthermie +	5.015	1.125	6.140	3.295	3.703	18,9
Luft-Wasser-WP	2.431	900	3.331		7.994	40,9
Luft-Wasser-WP + PV	2.437	967	3.404	1.023	5.715	29,2
Sole-Wasser-WP Sonde	1.673	1.000	2.673		6.415	32,8

⁴¹ Vgl. Bundesgesetzblatt (2009), S. 966, bzw. Anhang 2:

Sole-Wasser-WP Sonde + PV	1.677	1.067	2.744	893	4.444	22,7
Erdkollektor-WP	1.929	1.010	2.939		7.054	36,1
Erdkollektor -WP + PV	1.933	1.077	3.010	936	4.978	25,5

Tabelle 7: Ergebnis der Primärenergie- / Endenergiebedarfsberechnung. Eigene Berechnung mit Hottgenroth Energieberater 18599

Die Pelletheizung hat einen um ca. 10% höheren Endenergiebedarf als die Erdgas-Brennwertheizung. Der Grund liegt darin, dass die Pelletheizung den Brennwerteffekt nicht nutzt und zudem ein schlechteres Verhalten bei häufiger Taktung aufweist. Die niedrigen Endenergiebedarfe der Wärmepumpen und Heizungskombinationen resultieren aus dem jeweiligen Anteil regenerativen Energien.

Auszüge aus den Berechnungen sind in Anhang 5: abgebildet. Der Anteil des Warmwasserbedarfs am Gesamtenergiebedarf liegt abhängig vom Heizsystem zwischen 40% und 47%, wobei Verluste bei der Warmwasserverteilung und Speicherung vom Heizenergiebedarf abgezogen wurden.

Der Hilfsenergiebedarf ist zu einem überwiegenden Teil unabhängig von der Heiztechnik und ist folgenden Verbrauchern zuzuordnen:

- Lüftung (Ventilatoren): 2,13 kWh/m²: ca. 416 kWh/a
- Verteilung Heizung: 1,91 kWh/m²: ca. 373 kWh/a

Abhängig vom Heizsystem und der Speichergöße fallen dazu unterschiedliche Hilfsenergiebedarfe für den Betrieb der Heizung und für den Warmwasserspeicher an. Bei den Kombinationen mit Solarthermie und PV fällt der Hilfsenergiebedarf aufgrund der größeren Speicher entsprechend höher aus.

3.2.2 Heizlastberechnung nach DIN 12831

Der im vorherigen Abschnitt berechnete jährliche Primär- bzw. Endenergiebedarf des geplanten Einfamilienhauses alleine gibt noch keine hinreichende Auskunft über die notwendige Leistung des Heizsystems. Für dessen Auslegung ist eine Heizlastberechnung notwendig, da sich die Leistung einer Heizung nicht am durchschnittlichen Verbrauch sondern am maximalen Verbrauch orientieren sollte. Zu diesem Zweck muss die benötigte Heizleistung bei Extremtemperaturen ermittelt werden.

Als Berechnungsmethode für die Norm-Heizlast wird in Deutschland die DIN EN 12831 in Verbindung mit dem Beiblatt 1 verwendet.

Die Normheizlast entspricht dem Gesamtwärmeverlust des Gebäudes (bzw. des beheizten Wohnraums) bei Norm-Außentemperatur (t_{NE}). Diese wird standortspezifisch ermittelt und beschreibt die niedrigste Durchschnittstemperatur über 2 Tage, die in 20 Jahren mindestens

10 Mal erreicht bzw. unterschritten wurde.⁴² Der Gesamtwärmeverlust bei t_{NE} wird addiert aus dem Transmissionswärmeverlust und dem Lüftungswärmeverlust.

Bei der Berechnung werden gebäudespezifische, umgebungsspezifische, meteorologische und nutzerabhängige Parameter berücksichtigt. In Anhang 6: sind die ausgewählten Parameter zur Ermittlung der Norm-Heizlast dargestellt und kurz erläutert.

Auf Basis dieser Parameter werden zunächst raumspezifisch die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste berechnet, wodurch die Heizlast jedes Raumes ermittelt wird. Unterschiedliche Raumtemperaturen und daraus resultierende Wärmeströme innerhalb des Gebäudes werden dabei berücksichtigt. Die Summe der Raumheizlasten ergibt die Gebäudeheizlast.

Bei unterbrochenem Heizbetrieb (z.B. Sperrzeiten für Wärmepumpentarife bzw. Nachtabsenkung) muss zusätzlich die Aufheizleistung als Zusatz-Heizleistung ermittelt werden. Da unter anderem eine Wärmepumpenheizung untersucht wird, wurde eine Unterbrechung der Heizleistung von 2 Stunden, dies entspricht der maximal zulässigen Abschaltzeit, berücksichtigt.⁴³ Die Aufheizleistung wird separat ausgewiesen, so dass je nach Heizsystem die entsprechende Leistung mit bzw. ohne Aufheizleistung berücksichtigt werden kann.

Bei der Heizlastberechnung werden keine solaren Gewinne berücksichtigt, da bei der Extremfallbetrachtung von trüber Witterung ausgegangen wird.

Die Heizlastberechnung wurde vom Verfasser gemäß dem ausführlichen Verfahren, welches seit dem Jahr 2008 in Deutschland verpflichtend ist, eigenständig durchgeführt. Als Rechenprogramm wurde MS Excel verwendet. Zur Darstellung werden die Formblätter aus DIN 12831 genutzt.⁴⁴ Das Ergebnis der Heizlastberechnung ist in folgender Abbildung 2 dargestellt. Weitere Auszüge aus den Berechnungen sind in Anhang 7: abgebildet.

⁴² Vgl. DIN 12831:(2003), S. 13 in Verbindung mit DIN 12831 Beiblatt 1 (2008), S. 7

⁴³ Dabei wurde eine Aufheizzeit von ebenfalls 2 Stunden berücksichtigt, so dass auch mehrmalige Abschaltungen kompensiert werden können. Maximal 3x2 Stunden täglich sind zugelassen, dabei muss die Pause zwischen den Sperrzeiten mindestens der vorherigen Sperrzeit entsprechen.

⁴⁴ Vgl. DIN 12831 Beiblatt 1 (2008), S. 40 ff

Formblatt G3 - ausführliches Verfahren		DIN EN 12831
Projekt-Nr. / Bezeichnung		Musterhaus "Masterarbeit"
Gebäudedaten		Datum 27.01.2015 Seite G3
Wärmeverlust-Koeffizienten		W / K
Transmissionswärmeverlust-Koeffizient	$\Sigma_{HT,e}$	98,72
Lüftungswärmeverlust-Koeffizient	Σ_{HV}	27,12
Gebäude-Wärmeverlust-Koeffizient	H_{Geb}	125,84
Wärmeverluste		W
Transmissionswärmeverluste (nach außen)	$\Phi_{T,Geb}$	3028,96
Mindest-Luftwechsel	$\Phi_{V,min,Geb}$	
natürliche Infiltration	$\Phi_{V,inf,Geb} = \zeta \times \Sigma\Phi_{V,inf}$	176,60
mech. Zuluftvolumenstrom	$\Phi_{V,su,Geb} = (1-\eta_V) \times \Sigma\Phi_{V,su}$	474,24
Abluftvolumenüberschuss	$\Phi_{V,mech,inf,Geb}$	
Lüftungswärmeverluste	$\Phi_{V,Geb}$	650,84
Gebäudeheizlast		W
Netto-Heizlast	$\Phi_{N,Geb}$	3679,80
Zusatz-Heizleistung	$\Phi_{RH,Geb}$	665,24
Norm.-Gebäudeheizlast	$\Phi_{HL,Geb}$	4345,04
Spezifische Werte		
Netto-Heizlast / beh. Gebäudefläche	$\Phi_{N,Geb} / A_{N,Geb}$	168,05 m ² 25,86 W/m ²
Netto-Heizlast / beh. Gebäudevolumen	$\Phi_{N,Geb} / V_{N,Geb}$	419,99 m ³ 10,35 W/m ³
wärmeübertragende Umfassungsfläche	A	427,06 m²
Spezifischer Transmissionswärmeverlust	H_T	0,23 W/m²K

Abbildung 2: Ergebnis der Heizlastberechnung

Die zu installierende Heizanlage muss demnach für die Bereitstellung der benötigten Heizwärme mindestens eine Leistung von 3.680 W, bzw. mindestens 4.345 W bei Berücksichtigung der zuvor genannten Abschaltzeiten, haben.

Für den Warmwasserbedarf wird eine zusätzliche Heizleistung von 0,25 kW pro Person angenommen.⁴⁵ Dies entspricht bei vier Personen einer zusätzlichen Leistung von 1 kW, so dass für die Dimensionierung der Heizung eine gesamte Heizleistung von mindestens 4.680 W bzw. 5.345 W bei Wärmepumpenheizungen zu berücksichtigen ist.

⁴⁵⁴⁵ Vgl. Tiator (2014), S. 138

4 Aktuelle Heizungskonzepte

In diesem Abschnitt werden nach einer kurzen Beschreibung der allgemeinen Marktentwicklung gängige Heizungskonzepte für Einfamilienhäuser vorgestellt.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Anteile einzelner Heizsysteme seit dem Jahr 1993:

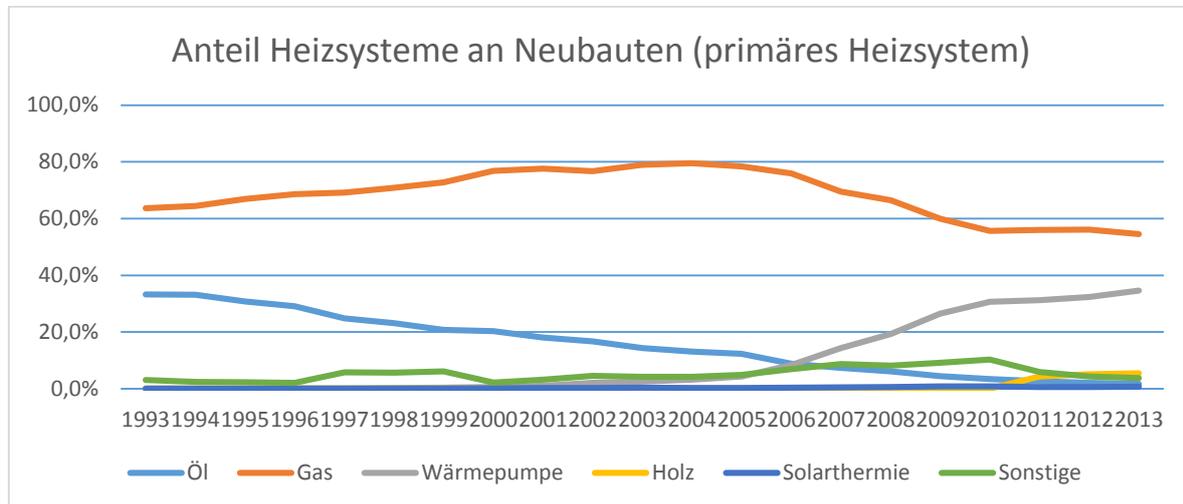


Abbildung 3: Marktanteile Heizsysteme an Neubauten (exkl. Fernwärme), Quelle: Destatis (2014)

Während Ölheizungen im Jahr 1993 noch in etwa jedem dritten Neubau eingesetzt wurden, haben sie mit aktuell 1,7% Marktanteil für Neubauten keine Bedeutung mehr. Gleichzeitig ist der Marktanteil von Wärmepumpen seit dem Jahr 2000 von ca. 1% auf über 30% angestiegen. Die Dominanz der Erdgasheizungen, der Marktanteil zeitweilig bei ca. 80% lag, geht seit Mitte des vergangenen Jahrzehnts kontinuierlich zurück. Der Marktanteil von Erdgas liegt aber noch über 50%. Der Anteil von Holzheizungen wird erst seit dem Jahr 2011 separat erfasst und ist seitdem leicht angestiegen. Eine detaillierte Auswertung der primären und sekundären Heizenergiequellen von Neubauten seit dem Jahr 1993 ist in Anhang 8: abgebildet.

Die detaillierte Beschreibung der Heizungskonzepte in diesem Kapitel beschränkt sich auf folgende Systeme.

- Erdgasheizung
- Holzpellettheizung
- Wärmepumpe
- Solarthermie

Die drei erstgenannten Heizungsarten machten bei Neubauten im Jahr 2013 einen Anteil von ca. 95% der installierten primären Heizungssysteme aus, wie aus nachfolgender Abbildung 4 erkennbar ist.⁴⁶

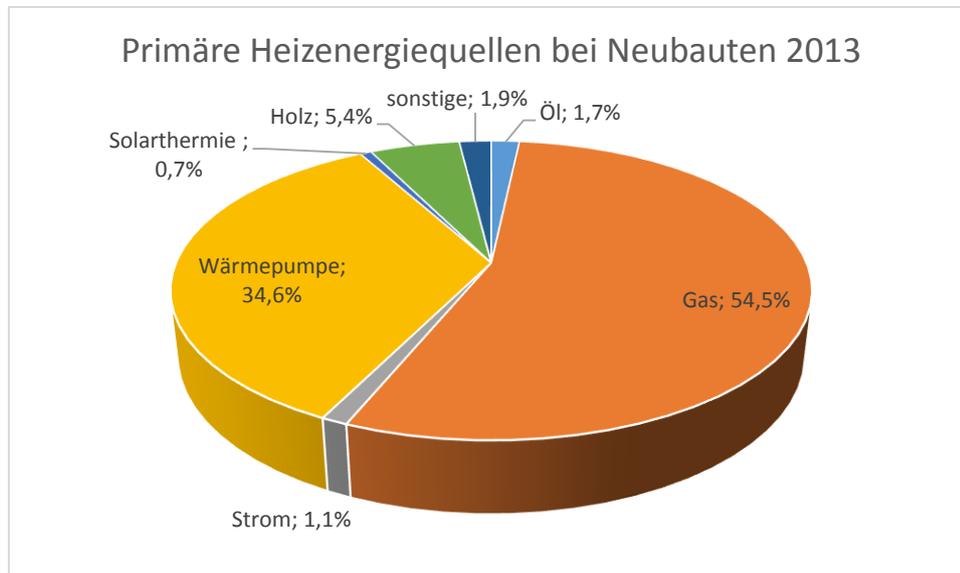


Abbildung 4: Heizenergiesysteme in Neubauten 2013, eigene Abbildung, Quelle: DESTATIS (2014)

Solarthermie hat zwar lediglich einen Anteil von ca. 0,7% als primär verwendete Heizenergiequelle, aber einen Anteil von ca. 20% als sekundäre Energiequelle.⁴⁷

Weitere Heizungsarten, wie z.B. Öl werden aufgrund des geringen Anteils bei Neubauten nicht näher betrachtet.

Neben den genannten Systemen wird zusätzlich Photovoltaik (im Folgenden kurz: PV) vorgestellt. PV ist kein klassisches Heizsystem, wird aber in Verbindung mit Wärmepumpen untersucht. Zudem werden Kombinationsmöglichkeiten von Heizsystemen vorgestellt.

4.1 Erdgasheizung

Wie aus der in Anhang 8: dargestellten Statistik erkennbar ist, war Erdgas in den Neunzigerjahren und in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts die klar dominierende Heizenergiequelle. Seit Mitte des vergangenen Jahrzehnts ist der Anteil von Erdgas kontinuierlich etwas gesunken, lag aber im Jahr 2013 noch über 50% bei Neubauten.

⁴⁶ vgl. DESTATIS (2014), S. 47, nicht berücksichtigt wurde Fernwärme

⁴⁷ Vgl. ebenda, S. 47 u. 49

4.1.1 Funktionsprinzip

Bei neu installierten Erdgasheizungen ist die sogenannte Brennwerttechnik Stand der Technik.⁴⁸ Im Gegensatz zu früheren Anlagen wird die im Abgas enthaltene Energie, insbesondere die Kondensationsenthalpie des enthaltenen Wasserdampfes genutzt. Die Abgase werden über Wärmetauscher soweit heruntergekühlt, dass ein Großteil des Wasserdampfes kondensiert. Die dabei freiwerdende Wärme wird zur Anhebung der Rücklauftemperatur genutzt. Für die entstehenden Abgastemperaturen von ca. 40°C müssen die Abgasleitungen säureunempfindlich sein.⁴⁹ Daher werden in der Regel Edelstahlrohre verwendet. Das Prinzip der Brennwertheizung ist in Abbildung 5 dargestellt.

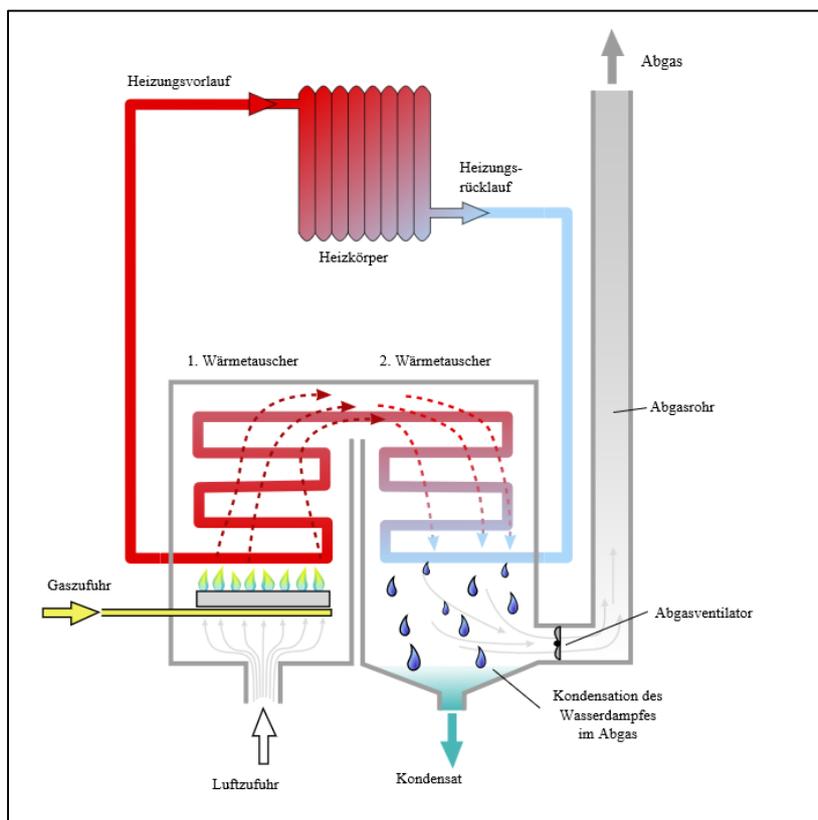


Abbildung 5: Funktionsprinzip Gas-Brennwerttherme, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Brennwertkessel> (Abrufdatum: 15.02.2015)

4.1.2 Brennstoff Erdgas

Das heute geförderte Erdgas ist vor vielen Millionen Jahren durch die Umwandlung organischen Materials unter Sauerstoffausschluss durch chemische und geologische Vorgänge weit unterhalb der Erdoberfläche entstanden. Erdgas besteht zum Großteil aus Methan (CH_4), zudem enthält es Stickstoff und in geringem Maße andere Kohlenwasserstoffe

⁴⁸ Vgl. BDEW (2015-1)
⁴⁹ Vgl. Pistohl, S. G68

und Helium. Die Zusammensetzung und damit auch der Energiegehalt unterscheiden sich regional. Das in Norddeutschland primär verwendete H-Gas hat einen Energiegehalt von ca. 10,42 kWh/m³. Bei der Verbrennung weist Erdgas mit 241 g/kWh einen um ca. 23% geringeren CO₂-Ausstoß gegenüber Heizöl mit 313 g/kWh gegenüber Heizöl auf.⁵⁰

Die Förderung erfolgt durch Bohrungen in mehreren Tausend Metern Tiefe. Der Erdgasverbrauch von ca. 941 Mrd. kWh⁵¹ in Deutschland im Jahr 2013 wurde zu ca. 13% durch inländische Förderung gedeckt⁵², die überwiegende Menge wird importiert. Deutschland verfügt über ein Gasnetz mit einer Länge von ca. 523.000 km, davon 37.880 km Fernleitungen⁵³ (näheres zur Versorgungssicherheit in Kapitel 5.2.2).

Neben dem oben genannten fossilen Erdgas gibt es sogenanntes Bio-Erdgas. Als Varianten existieren aufbereitetes Biogas aus Biogasanlagen und „Power to Gas“ (nachfolgend kurz: PTG). Bei PTG wird überschüssiger Strom aus Windkraft- oder PV-Anlagen zur Wasserstoffelektrolyse und anschließender Methanisierung genutzt. Im Jahr 2013 wurden 665 Mio. m³ Bioerdgas eingespeist, dies entspricht einem Anteil von ca. 0,7% am Gesamtverbrauch an Erdgas.⁵⁴

4.1.3 Marktentwicklung

Trotz Rückgang des Marktanteils in den vergangenen Jahren haben Erdgasheizungen derzeit noch einen Marktanteil von über 50% bei den Neuinstallationen in Deutschland. Die Entwicklung lief von der konventionellen Gastherme über die Niedertemperaturtherme zur Brennwerttechnik.

Als zukünftige Entwicklungen der Erdgastechnik werden voraussichtlich gasbetriebene Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (nachfolgend KWK-Anlagen) an Bedeutung gewinnen. KWK-Anlagen können entweder strom- oder wärmegeführt betrieben werden, d.h. je nach Bedarfssituation ist die Stromerzeugung oder die Wärmeerzeugung primäres Ziel. KWK-Anlagen können neben der Strom- und Wärmeerzeugung netzstabilisierende Aufgaben übernehmen. Bisher wurden KWK-Anlagen primär in Mehrfamilienhäusern eingesetzt, mittlerweile sind auch erste KWK-Anlagen für Einfamilienhäuser auf dem Markt.

Als weitere Entwicklung erhöhen Gaswärmepumpen den Nutzungsgrad des Brennstoffes Erdgas. Eine Beschreibung der Technik ist in Kapitel 4.6.4 zu finden.

⁵⁰ Vgl. IWU (2014-2), S. 3

⁵¹ Vgl. BDEW (2015-2)

⁵² Vgl. BGR (2014)

⁵³ Vgl. Bundesnetzagentur (2014), S. 201

⁵⁴ Vgl. BDEW (2015-3)

4.2 Holzpelletheizung

Holzpelletheizungen etablieren sich zunehmend als vollwertige Heizungssysteme. Mit dem Brennstoff Holz nutzen sie einen regenerativen Energieträger und weisen daher eine deutlich bessere Treibhausgasbilanz auf als Erdgas.

4.2.1 Funktionsprinzip

Bei einer Holzpelletheizung bzw. verkürzt Pelletheizung werden sogenannte Pellets, dies sind Presslinge aus Holzspänen und Sägemehl, in einem Kessel verbrannt. Die Zuführung des Brennstoffes erfolgt in der Regel automatisch. Dadurch können Pelletheizung im Gegensatz zu Scheitholzöfen, die manuell bestückt werden müssen, vollautomatisch betrieben werden.

Holzpelletheizungen gibt es in folgenden Varianten:

- Pelletöfen
- Pelletzentralheizungen
- Pellet-Brenneraufsätze

Pelletöfen werden in der Regel im Wohnbereich aufgestellt und dienen primär der Beheizung einzelner Räume bzw. Wohnbereiche. In Verbindung mit einer Wassertasche können sie in Niedrigenergiehäusern auch für die Beheizung des ganzen Gebäudes verwendet werden.

Pelletzentralheizungen werden in einem separaten Heizungsraum aufgestellt und können für Ein- und Mehrfamilienhäuser die vollständige Heizung und Warmwasserversorgung übernehmen.

Pellet-Brenneraufsätze werden verwendet, um bestehende Ölheizungen nachzurüsten.⁵⁵ Da die Nachrüstung von Altbauten nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, werden im Folgenden nur Pelletöfen und Pellet-Zentralheizungen betrachtet.

Pelletheizungen benötigen einen Lagerraum für den Brennstoff. Aus diesem werden die Pellets vollautomatisch zunächst in einen Vorratsbehälter oder eine Dosiereinrichtung transportiert. Mittels einer Dosierschnecke werden die Pellets in den Brennraum transportiert. Zur Unterbindung des Rückbrands der Pellets durch die Transportsysteme in den Lagerraum wird eine Rückbrandsicherung standardmäßig in allen Pelletheizungen eingesetzt.⁵⁶

Pelletheizungen benötigen nicht zwingend einen Pufferspeicher, ein solcher kann aber sinnvoll sein, um die Taktung, also die Ein- und Ausschalthäufigkeit, zu reduzieren. Eine häufige

⁵⁵ Vgl. FNR (2013), S. 8 f

⁵⁶ Vgl. ebenda, S. 17

Taktung hat negative Auswirkungen auf die Effizienz, Schadstoffemissionen und die Lebensdauer des Kessels.⁵⁷

4.2.2 Brennstoff Holzpellets

Holzpellets bestehen aus rindenfreiem Holz, als natürliches Bindemittel fungiert der im Holz enthaltene Stoff Lignin, der unter hohem Druck entweicht.⁵⁸ Die Eigenschaften von Holzpellets sind in der internationalen Norm EN ISO 17225-2:2014 festgelegt, welche die bisher gültige Norm EN 14961-2 ersetzt. Abhängig von der Nutzung existieren die Qualitätsklassen A1 und A2, wobei für nicht-industrielle Anwendung in der Regel die Klasse A1 von den Ofenherstellern gefordert wird.

In Europa existiert darüber hinaus das Prüfsiegel EN Plus, welches neben der Einhaltung der stofflichen Grenzwerte eine Transparenz und Kontrolle der gesamten Lieferkette von der Produktion der Pellets bis hin zur Auslieferung beim Kunden ermöglichen.

Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt einige Qualitätsanforderungen aus der EN14961.⁵⁹

Parameter	Einheit	Qualität A1	Qualität A2
Durchmesser	mm	6 (+/- 1) oder 8 (+/-1)	6 (+/- 1) oder 8 (+/-1)
Länge	mm	3,15 – 40	3,15 – 40
Heizwert	MJ/kg kWh/kg	min 16,5 min 4,583	min 16,3 min 4,528
Wassergehalt	Masseanteil in %	< 10	< 10
Aschegehalt	Masseanteil in %	< 0,7	< 1,5

Tabelle 8: Qualitätsanforderungen an Holzpellets

4.2.3 Marktentwicklung

Der Bestand an Pelletheizungen hat in Deutschland in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Von 2005 bis 2014 vervielfachte sich dieser von ca. 50.000 auf ca. 368.500. Davon entfallen ungefähr zwei Drittel auf Pelletkessel und wasserführende Kaminöfen unter 50 kW Heizleistung, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dies entspricht einem jährlichen Zuwachs von ca. 35.000 Pelletheizungen mit leicht zunehmender Tendenz. Entsprechend stiegen die Produktion sowie der Verbrauch an Pellets stark an. Weitere Marktinformationen vom Deutschen Pellet Institut sind in Anhang 9: abgebildet.

⁵⁷ Vgl. ebenda, S. 9

⁵⁸ Eine Animation der Energieagentur Nordrhein-Westfalen zur Herstellung von Holzpellets ist zu finden unter: <http://www.energieagentur.nrw.de/biomasse/animations-23837.asp>

⁵⁹ Quelle: DEPV 2014; eine Übersicht weiterer Parameter sind in

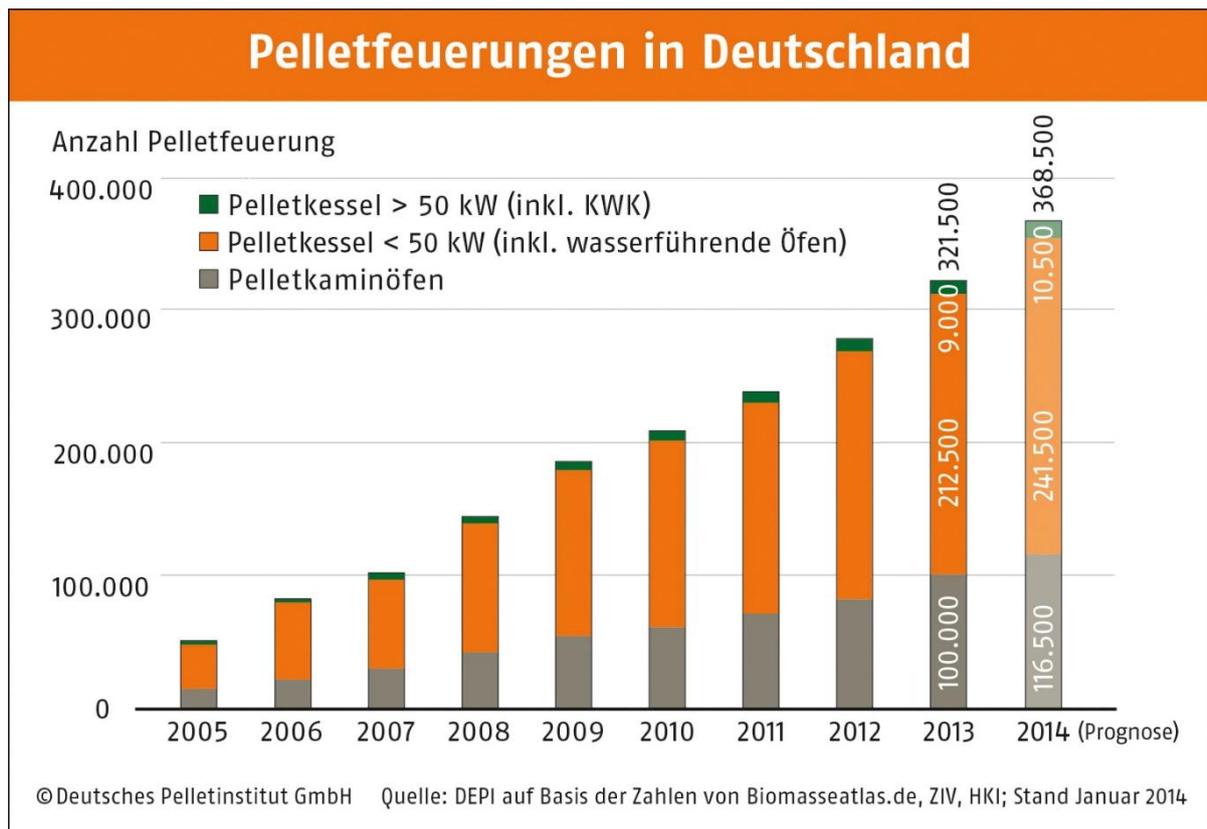


Abbildung 6: Bestand Pelletheizungen in Deutschland⁶⁰

Die Preisentwicklung des Brennstoffs Pellets wird seit einigen Jahren in einem Index erfasst. Nachfolgende Abbildung 7 zeigt die Preisentwicklung bei Pellets seit 2006 im Vergleich zu Heizöl und Erdgas. Es wird deutlich, dass die Preise für Holzpellets in der Vergangenheit weniger stark angestiegen sind als die fossilen Energieträger. Zudem sind die spezifischen Kosten je kWh bei Holzpellets derzeit niedriger.

⁶⁰ Quelle: DEPI (2015)

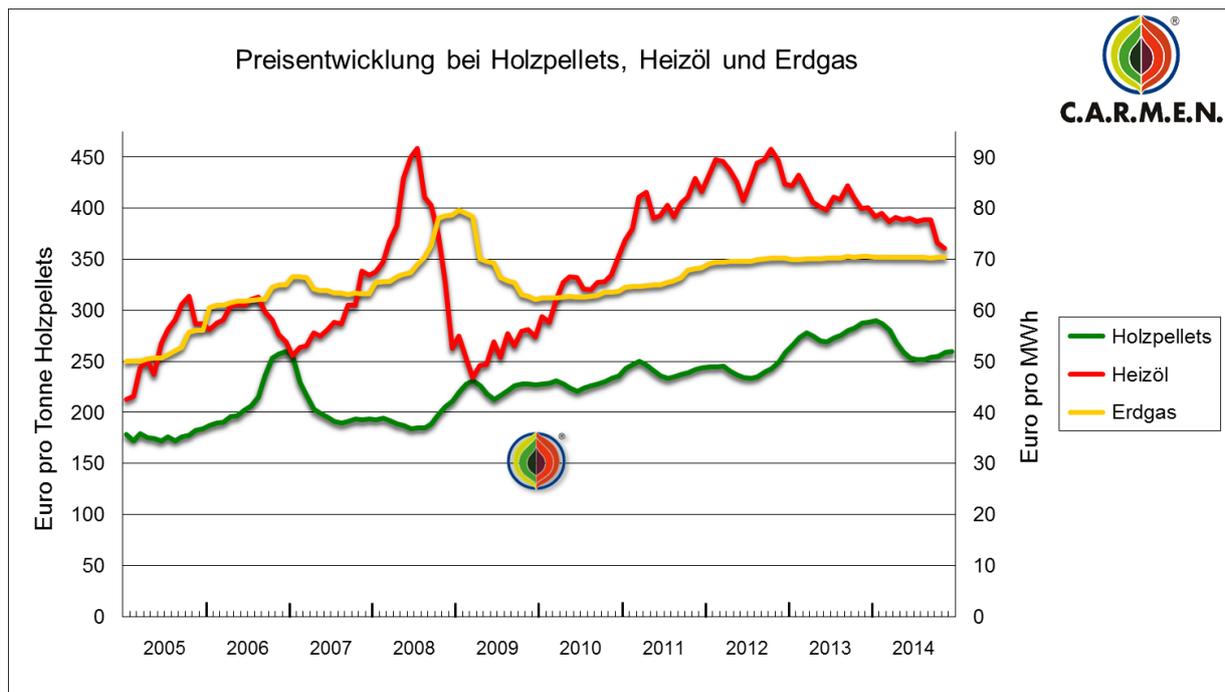


Abbildung 7: Preisentwicklung Pellets ⁶¹

Die zukünftige Preisentwicklung ist schwer einzuschätzen. Bei der stark steigenden Anzahl an Pelletheizungen (vgl. Abbildung 6) wäre ein Preisanstieg denkbar. Gleichzeitig sind die Produktionskapazitäten ebenfalls stark gewachsen und sind nach Erhebungen des Deutschen Pellet Instituts nicht ausgelastet (vgl. Anhang 9:). Die Fachverbände sehen zudem erhebliche Mobilisierungsreserven aus folgenden Bereichen:

- derzeit werden laut Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe nur 70% des jährlichen Holzzuwachses genutzt
- Holzproduktion aus Energieholzplantagen
- Import von Pellets
- Ersatz alter Holzheizungen mit deutlich schlechteren Wirkungsgraden (60%) durch moderne Pelletheizungen ermöglicht eine effektivere Holznutzung.⁶²

4.3 Wärmepumpe

Wie in der Einleitung zu Kapitel 4 dargestellt, wurde im Jahr 2013 ungefähr jeder dritte Neubau in Deutschland mit einer Wärmepumpenheizung als primärem Heizungssystem ausgestattet.

⁶¹ Quelle: C.A.R.M.E.N. (2014)

⁶² Vgl. FNR (2009), S. 17f

Mit Hilfe einer Wärmepumpe ist es möglich, Umweltenergie (z.B. aus Luft, Boden oder Grundwasser) für Heizzwecke bzw. zur Warmwasserbereitung zu nutzen. Zur Nutzung der Umweltenergie muss zunächst Energie aufgewendet werden, dies kann entweder elektrische oder thermische Energie sein. Dabei besteht das Ziel, aus der eingesetzten Energie ein Mehrfaches als Wärmeenergie zu gewinnen. Im Folgenden werden ausschließlich elektrisch betriebene Wärmepumpen betrachtet. Als Beispiel für eine thermisch betriebene Wärmepumpe wird in Kapitel 4.6.4 eine Erdgas-Adsorptionswärmepumpe vorgestellt.

4.3.1 Funktionsprinzip

Thermodynamisch gesehen basiert das Funktionsprinzip einer Wärmepumpe auf dem linksläufigen Carnot'schen Kreisprozess. Dabei wird in einem Kreisprozess Wärme auf ein höheres Niveau gebracht. Dies erfolgt durch die folgenden vier Schritte, die in Abbildung 8 dargestellt sind und im Folgenden kurz erläutert werden. Bei der nachfolgenden Beschreibung handelt es sich um den idealen Prozess, der in der Realität nicht stattfindet.

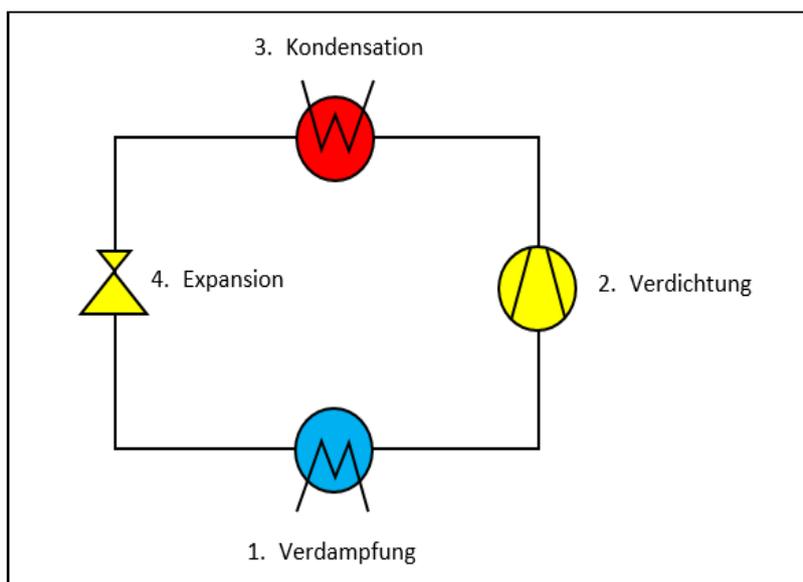


Abbildung 8: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe, Quelle: eigene Darstellung

Schritt 1 - Verdampfung: Ein Kältemittel wird durch ein Wärmequellenmedium (näheres zu Wärmequellen im folgenden Abschnitt 4.1.2) verdampft. Dies setzt voraus, dass die Temperatur des Wärmequellenmediums höher ist als die Siedetemperatur des Kältemittels. Dieser Phasenwechsel findet isotherm statt, d.h. ohne Temperaturänderung des Kältemittels. Die dafür notwendige Energie (Verdampfungsenthalpie) wird dem Wärmequellenmedium entzogen.

Schritt 2 – Verdichtung: Das verdampfte Kältemittel wird im nächsten Schritt mittels mechanischer Energie isentrop, d.h. (idealerweise) ohne Entropiezunahme, verdichtet, wodurch die Temperatur des Kältemittels ansteigt

Schritt 3 – Kondensation: Im Kondensator findet eine isotherme Kondensation des Kältemittels statt. Die Temperatur des Wärmesenkenmediums ist niedriger als die des verdampften Kältemittels. Die Kondensationsenthalpie des Wärmemittels wird an das Wärmesenkenmedium abgegeben.

Schritt 4 – Expansion: Ein Expansionsventil dient zur Abgrenzung der Druckniveaus von Kondensator und Verdampfer. Das Kältemittel wird isenthalp, d.h. ohne Änderung der Enthalpie, entspannt.

Als Kältemittel werden von den meisten Herstellern halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (nachfolgend kurz HFKW) eingesetzt, die bei Freisetzung ein sehr hohes Treibhauspotenzial haben. Das derzeit häufig eingesetzte Kältemittel R407C (bestehend aus CH_2F_2 , CHF_2CF_3 und CH_2FCF_3) hat ein 1.774-fach größeres Treibhauspotenzial als Kohlenstoffdioxid.⁶³ Vorteile von HFKW sind deren Nicht-Brennbarkeit sowie niedrige Siedepunkte.

Die Wärmemenge, die der Wärmesenke im Kondensator zugeführt wird, entspricht der Summe aus der thermischen Energie, die im Verdampfer aufgenommen wurde und der im Verdichter zugeführten mechanischen Energie.⁶⁴

Entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe ist das Verhältnis zwischen verwendbarer Wärmeleistung zur aufgenommenen (elektrischen) Antriebsleistung des Verdichters, dieses wird als Leistungszahl ε bezeichnet. International hat sich die Abkürzung COP (Coefficient of Performance) durchgesetzt.

$$\varepsilon = \frac{\text{Wärmeleistung}}{\text{Antriebsleistung}} = \frac{\text{Leistung aus Umweltenergie} + \text{Antriebsleistung}}{\text{Antriebsleistung}}$$

Im Carnot-Prozess lässt sich die ideale Leistungszahl aus der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Wärmequelle T_U (Temperatur aus der die Wärme im Verdampfer aufgenommen wird) und der Temperatur der Wärmesenke T_H (Temperatur, bei der die Wärme abgegeben wird) ermitteln, wie aus der folgenden Formel erkennbar ist:

$$\varepsilon_c = \frac{T_H}{T_H - T_u} = \frac{T_H}{\Delta T}$$

ε_c = Carnot'sche Leistungszahl

T_U = Temperatur der Wärmequelle

T_H = Temperatur der Wärmesenke

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke
(Alle Temperaturen in K)

⁶³ Vgl. Miara, S. 51 ff

⁶⁴ Vgl. Miara, S. 19 ff

Aufgrund der oben geschilderten Zusammenhänge ist der Temperaturhub, also die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, für die Leistungszahl und damit für die Effizienz der Wärmepumpe entscheidend. Je geringer der Temperaturhub, desto höher ist die Leistungszahl.⁶⁵ Nachfolgender Vergleich der Vorlauftemperaturen einer Fußbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 35°C und einer Radiatorheizung mit einer Vorlauftemperatur von 55°C soll dies verdeutlichen:

$T_U = 273,15 \text{ K}$ (entspricht 0°C)

a) Fußbodenheizung:

Vorlauftemperatur (T_H) = 308,15 K (= 35°C)

$\Delta T = 35 \text{ K}$

$$\epsilon_c = \frac{308,15 \text{ K}}{308,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}} = \frac{308,15 \text{ K}}{35 \text{ K}} = \mathbf{8,80}$$

b) Radiatorheizung:

Vorlauftemperatur (T_H) = 328,15 K (entspricht 55°C)

$\Delta T = 55 \text{ K}$

$$\epsilon_c = \frac{328,15 \text{ K}}{328,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}} = \frac{328,15 \text{ K}}{55 \text{ K}} = \mathbf{5,97}$$

Aus obiger Berechnung wird ebenfalls ersichtlich, dass die Nutzung der Wärmepumpe zur Brauchwassererwärmung einen negativen Einfluss auf die Leistungszahl hat.

Der oben geschilderte Prozess sowie die ermittelten Carnot'schen Wirkungsgrade spiegeln die Idealform des Wärmepumpenkreislaufs wider. In der Praxis treten Verluste, u.a. durch Überhitzung im Verdampfer, Unterkühlung bei der Expansion, Temperaturänderung bei Verdampfung und Kondensation, Wärmeverluste in Leitungen und Kondensator auf.⁶⁶ Überschlägig kann die tatsächliche Leistungszahl ϵ mit $0,5 \cdot \epsilon_c$ angenommen werden.⁶⁷

Während die Leistungszahl eine unter Testbedingungen ermittelte Größe darstellt, gibt die Jahresarbeitszahl (nachfolgend kurz: JAZ) eine Aussage über die tatsächliche Effizienz der Anlage in der Praxis wider. Die JAZ beschreibt für eine festgelegte Periode (in der Regel ein Jahr) das Verhältnis zwischen abgegebener Wärme und aufgenommener elektrischer Leistung.⁶⁸ Zur Erfassung der JAZ sind ein separater Stromzähler und ein Wärmemengenzähler notwendig.

⁶⁵ Vgl. Ochsner, S. 13 f

⁶⁶ Vgl. Miara, S. 22 f

⁶⁷ Vgl. Ochsner, S. 14

⁶⁸ Vgl. Miara, S. 26

4.3.2 Arten von Wärmepumpen / Wärmequellen

Wie im vergangenen Abschnitt erläutert, ist der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Wärmesenke maßgeblich für die Effizienz einer Wärmepumpe. Entsprechend ist die Temperatur der Wärmequelle bzw. des Wärmequellenmediums ein wichtiger Faktor.

Wärmepumpen werden nach der Art der Wärmequelle und des Übertragungsmediums unterschieden. Im Folgenden werden nur Wärmepumpen mit Wasser (bzw. einer wasserhaltigen Flüssigkeit) als Übertragungsmedium betrachtet. Als Wärmequelle kommen Luft, das Erdreich und Wasser in Frage.

4.3.2.1 Betriebsweisen von Wärmepumpen

Grundsätzlich werden die folgenden vier Betriebsweisen von Wärmepumpenheizungen unterschieden:

- Monovalent: Die Wärmepumpe deckt den Heizwärmebedarf komplett
- Monoenergetisch: Die Heizenergie wird über eine Endenergiequelle gedeckt. Dies erfolgt, wenn die Wärmepumpe durch einen elektrisch betriebenen Heizstab unterstützt wird
- Bivalent-parallel: Bis zu einer Zuschalttemperatur deckt die Wärmepumpe den kompletten Heizenergiebedarf, ab dem Zuschaltzeitpunkt decken die Wärmepumpe und ein sekundäres Heizsystem gemeinsam den Heizwärmebedarf
- Bivalent-Alternativ: Ab einem Zuschaltzeitpunkt wird die Wärmepumpe durch ein anderes Heizsystem ersetzt⁶⁹

In dieser Untersuchung wird primär der monovalente und monoenergetische Betrieb betrachtet.

4.3.2.2 Wärmequellen

Wärmequelle Außenluft

Bei Außenluft als Wärmequellenmedium wird Luft durch einen Ventilator angesaugt und gibt am Verdampfer Wärme an das Kältemittel ab. Aufgrund der im Verhältnis zu Wasser deutlich geringeren spezifischen Wärmekapazität von Luft (Wasser ca. $4,182 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, Luft ca. $1,004 \frac{kJ}{kg \cdot K}$) sind große Volumenströme notwendig, um eine signifikante Energiemenge bereitzustellen.

⁶⁹ Vgl. ebenda, S. 93 ff

Luft-Wasser-Wärmepumpen (im Folgenden kurz: Luftwärmepumpen) können entweder außen aufgestellt werden, als Split-Systeme aus einem außen stehenden Verdampfer und einem innen stehenden Verdichter bestehen, oder komplett innen stehen. Bei letzterer Variante muss die Außenluft über ein Rohrsystem dem Verdichter zugeführt werden.⁷⁰

Vorteil der Wärmequelle Außenluft ist deren kostengünstige Erschließung sowie deren kontinuierliche Verfügbarkeit.

Großer Nachteil von Außenluft als Wärmequelle ist die jahreszeitliche Schwankung der Lufttemperatur. In Zeiten des maximalen Wärmebedarfes ist die Lufttemperatur - und damit der Energiegehalt der Luft - am niedrigsten. Dadurch ist ein großer Temperaturhub notwendig, der gleichbedeutend ist mit einer schlechteren Effizienz. Bei monovalentem Betrieb droht eine Überdimensionierung der Wärmepumpe für einen Großteil des Jahres. Ein monoenergetischer Betrieb von Luftwärmepumpen, die bei Maximallasten durch einen Elektro-Heizstab unterstützt werden, ist daher üblich.⁷¹

Ein weiterer Nachteil von Luftwärmepumpen sind deren Geräuschemissionen durch den Ventilator. Eine korrekte Planung der Luftzuführung und die richtige Aufstellung sind daher zu beachten.⁷²

Bei Luftwärmepumpen besteht die Gefahr der Vereisung am Verdampfer. Die Temperaturabsenkung der Luft führt zu einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit und begünstigt dabei die Kondensation von Wasser am Verdampfer. Bei Lufttemperaturen von ca. 7°C oder darunter kann dies zur Vereisung des Verdampfers führen, da die Temperatur des Kältemittels unter 0°C liegt. Während die Kondensation gewünscht ist (Nutzung der Kondensationsenthalpie), führt die Vereisung zu einer schlechteren Wärmeübertragung am Verdampfer. Daher ist bei entsprechenden Temperaturen ein regelmäßiges Abtauen des Verdampfers notwendig, was wiederum zur Verschlechterung der Effizienz führt.⁷³

Wärmequelle Erdreich

Das Erdreich bietet unterschiedliche Möglichkeiten der Wärmenutzung. Die üblichen Varianten sind:

- A) Erdsonden
- B) Erdkollektoren
- C) Grundwasser

⁷⁰ Vgl. Ochsner, S. 72 ff

⁷¹ Vgl. Miara, S. 74

⁷² Vgl. ebenda, S. 79

⁷³ Vgl. ebenda, S. 76 f

Zudem existieren auf dem Markt zahlreiche weitere Konzepte, genannt seien Energiekörbe, Grabenkollektoren oder Energiepfähle.⁷⁴

Die Effizienz der unterschiedlichen Systeme hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens und von der Bodentiefe ab. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, nimmt die jahreszeitliche Schwankung der Bodentemperatur mit zunehmender Bodentiefe ab. Ab einer Tiefe von ca. 15 m liegt die Temperatur eines ungestörten Bodens während des ganzen Jahres nahezu konstant bei ca. 10°C, und nimmt darunter um ca. 1°C je 30 m zu.⁷⁵ In den oberen Bodenschichten, wird die Temperatur maßgeblich von der Sonnenenergie beeinflusst, in tieferen Schichten dominiert die Geothermie.

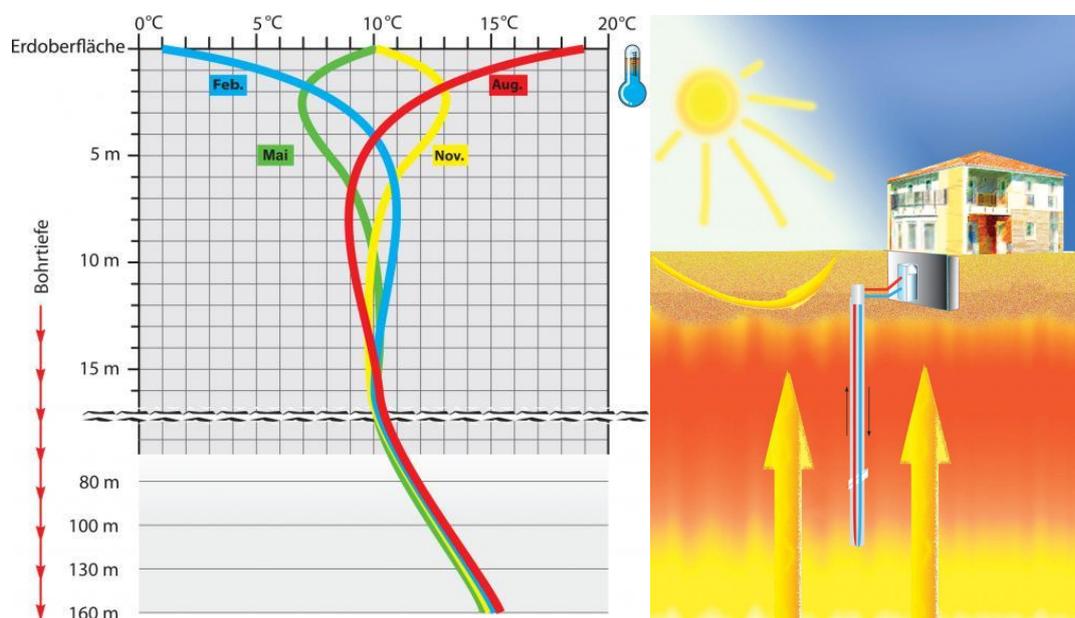


Abbildung 9: Jahresgang der Bodentemperatur in Abhängigkeit von der Bodentiefe, Quelle: Erdwärme-Region

Bei der Auslegung der Wärmequellenanlage ist die ausreichende Regenerationsfähigkeit des Bodens zu beachten. Durch den Betrieb der Wärmepumpe wird dem Boden Wärme entzogen, so dass dessen Temperatur in der Heizperiode sinkt. Um einen dauerhaften Betrieb zu gewährleisten, muss der Boden im Jahresverlauf wieder die ursprüngliche Temperatur erreichen. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist daher wichtig für die Eignung des Bodens als Wärmequelle. Auslegungsparameter zur Dimensionierung der Wärmequelle sind in der VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ erfasst.⁷⁶

⁷⁴ Vgl. Miara, S. 69 ff

⁷⁵ Vgl. auch Ochsner, S. 51

⁷⁶ Vgl. VDI 4640

Nachfolgend werden die drei oben genannten Varianten vorgestellt.

A) Erdsonden

Erdsonden werden senkrecht oder schräg in den Boden eingebracht und haben üblicherweise eine Tiefe von 50 - 100 m. Es handelt sich um geschlossene Systeme, bei denen Sole (eine Salz-Wasser-Lösung) als Wärmeträgermedium fungiert. Dabei werden die Sonden in Bohrlöcher mit Durchmessern von ca. 120 -200 mm eingebaut, die anschließend dicht verfüllt werden müssen.⁷⁷ Aufgrund der konstanten und relativ hohen Wärmequellentemperaturen von ca. 10-12 °C weisen Erdsonden-Wärmepumpen die höchsten Jahresarbeitszahlen auf.

Die notwendige Tiefe der Bohrung hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens ab. Nachteilig sind die hohen Kosten für die Bohrungen, zumal eine Probebohrung zur Bestimmung der genauen Bodenschichtung notwendig ist. Für Erdsonden ist eine Genehmigung notwendig, auf dem ausgewählten Grundstück ist eine Erdsondenbohrung gestattet.

B) Erdkollektoren

Im Gegensatz zu Erdsonden werden Erdkollektoren bodennah, dicht unterhalb der Frostschicht in ca. 1,2-1,5 m Tiefe verlegt. Erdkollektoren werden im Gegensatz zu Erdsonden horizontal mit einem Abstand von ca. 50 cm verlegt und beanspruchen daher eine deutlich größere Grundfläche. Um eine Regeneration durch Sonneneinstrahlung, Außenluft und Niederschlag zu ermöglichen, darf die Fläche über einem Erdkollektor nicht überbaut oder versiegelt werden.⁷⁸

Erdkollektoren können in zwei Varianten gebaut werden. Eine Möglichkeit ist ein indirektes System, welches die Energie am Verdampfer an das Kältemittel überträgt. Als Wärmeträgermedium wird dazu aus Frostschutzgründen ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet.⁷⁹ Alternativ können Erdkollektoren als Direktverdampfer konzipiert werden. Das Kältemittel der Wärmepumpe strömt dabei durch die Rohre im Erdreich. Dadurch entfällt die Wärmeübertragung zwischen Wärmequelle und Kältemittelkreis sowie die zugehörige Umwälzpumpe, da die Strömung des Kältemittels durch den Verdichter angetrieben wird. Dies führt zu höheren Jahresarbeitszahlen. Nachteilig sind die höheren Kosten für die Planung und Installation der Wärmequellenanlage, da die Anforderungen an die Dichtheit der Verrohrung aufgrund der großen Menge an (FKW-haltigen) Kältemittel höher sind.⁸⁰

Die Bodentemperaturen sind in der genannten Verlegetiefe jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt, diese sind jedoch weniger stark ausgeprägt als bei Außenluft. Daher sinkt die

⁷⁷ Vgl. Miara, S. 64

⁷⁸ Vgl. ebenda, S. 60

⁷⁹ Vgl. ebenda, S. 60 ff

⁸⁰ Vgl. ebenda, S. 63 ff

Effizienz der Wärmepumpe während der Heizperiode, ist jedoch höher als bei Luftwärmepumpen. Die Kosten für die Verlegung der Erdkollektoren hängen von der benötigten Größe der Wärmequellenanlage ab. Bei Neubauten, bei denen Erdarbeiten notwendig sind, sind die Kosten für das Anlegen der Wärmequelle in der Regel geringer als bei einer Nachrüstung.

C) Grundwasser

Im Gegensatz zu Erdsonden und Erdkollektoren wird die Wärmequelle Grundwasser als offenes System genutzt. Aus einem Entnahmebrunnen wird Wasser herausgepumpt, am Verdampfer der Wärmepumpe vorbeigeführt (dort findet die Wärmeabgabe statt), und in den Einleitbrunnen zurück gepumpt. Grundwasser bietet jahreszeitlich fast konstante Wärmequellentemperaturen, zudem wird die Temperatur an der Entnahmestelle bei richtiger Ausführung durch den Betrieb der Wärmepumpe nicht beeinflusst. Da die Kosten zur Erschließung der Wärmequelle sehr hoch sind, wird die Wärmequelle Grundwasser nicht in den nachfolgenden Vergleich nicht aufgenommen.

4.3.2.3 Untersuchung von Jahresarbeitszahlen

Die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe hängt neben den Investitionskosten und den Fixkosten maßgeblich von der Leistungszahl der Anlage ab. Wie in Kapitel 4.3.1 erläutert, ist die Leistungszahl eine theoretische Größe und auch die von den Herstellern genannten Zahlen geben nur Aussagen zum Verhalten der Anlagen bei bestimmten Betriebspunkten unter Laborbedingungen.

Um die Effizienz von Wärmepumpen in der Praxis zu untersuchen, wurde vom Fraunhofer-Institut für Solare Energieforschung in Freiburg (nachfolgend kurz: Fraunhofer ISE) in einer mehrjährigen Studie das reale Verhalten von Wärmepumpen untersucht.

Im ersten Projektabschnitt wurden unter dem Projektnamen „Wärmepumpen-Effizienz“ in einem Betrachtungszeitraum von Juli 2007 bis Juni 2010 insgesamt 110 Systeme mit unterschiedlichen Wärmequellen und Konfigurationen untersucht. Dabei wurden Jahresarbeitszahlen für die unterschiedlichen Wärmequellen ermittelt. Die Studie ergab folgende Ergebnisse:

Wärmequelle	Jahresarbeitszahl
Erdreich	3,88
Luft	2,89

Abbildung 10: Ergebnisse Fraunhofer ISE Projekt Wärmepumpen-Effizienz⁸¹

⁸¹ Vgl. Fraunhofer ISE (2011), S. 45 ff

Direkt im Anschluss wurde die Untersuchung mit dem neuen Projekt „WP-Monitor“ fortgesetzt. Dabei wurden 50 Anlagen aus dem Vorprojekt verlängert, sowie 37 neue Anlagen hinzugefügt. Die Messung erfolgte von Juli 2010 bis Juni 2013. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Effizienz der Wärmepumpen im Feld zugenommen hat, was überwiegend durch die neuen Wärmepumpen begründet ist.⁸² Die JAZ der Luftwärmepumpen erhöhte sich von durchschnittlich 2,89 auf 3,1. Dabei erreichten die neuen Wärmepumpen eine JAZ von 3,2. Einen Anstieg der JAZ gab es auch bei den Erdreich-Wärmepumpen von 3,88 auf 4,0, wobei dort die neuen Wärmepumpen mit einer JAZ von 4,3 deutlich effizienter waren. In der folgenden Abbildung 11 sind links die durchschnittlichen JAZ dargestellt, im rechten Teil der Abbildung ist die Schwankungsbreite der JAZ für die jeweiligen Wärmequellen dargestellt. Die jeweils große Bandbreite der JAZ lässt auf Optimierungspotenzial schließen.

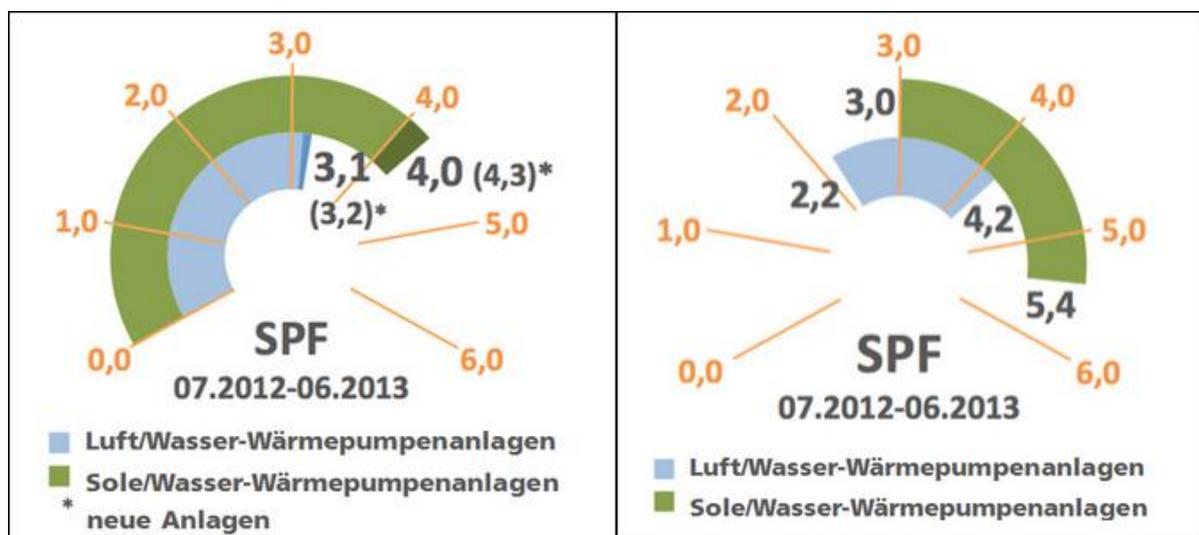


Abbildung 11: Ergebnisse Fraunhofer ISE Projekt „WP-Monitor“. Links: durchschnittliche JAZ, rechts: Bandbreiten der JAZ. Quelle: Fraunhofer ISE (2015)⁸³

In Anlehnung an die oben genannten Ergebnisse werden die folgenden Jahresarbeitszahlen in der Energiebedarfsrechnung verwendet:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe: 3,1
- Erdsonde-Wasser-Wärmepumpe: 4,5
- Erdkollektor-Wasser-Wärmepumpe: 3,9

⁸² Vgl. Fraunhofer ISE (2013), S. 3

⁸³ Die Abkürzung SPF steht für „Seasonal Performance Factor“ und ist gleichbedeutend mit der JAZ

4.3.3 Marktentwicklung

Wie in der Einleitung zu Kapitel 4 Anhang 8: dargestellt, ist der Anteil von Wärmepumpen bei Neubauten seit Anfang des letzten Jahrzehnts auf mittlerweile ca. 30% stark angestiegen. Die Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland seit 2007 sind in Abbildung 12 dargestellt.

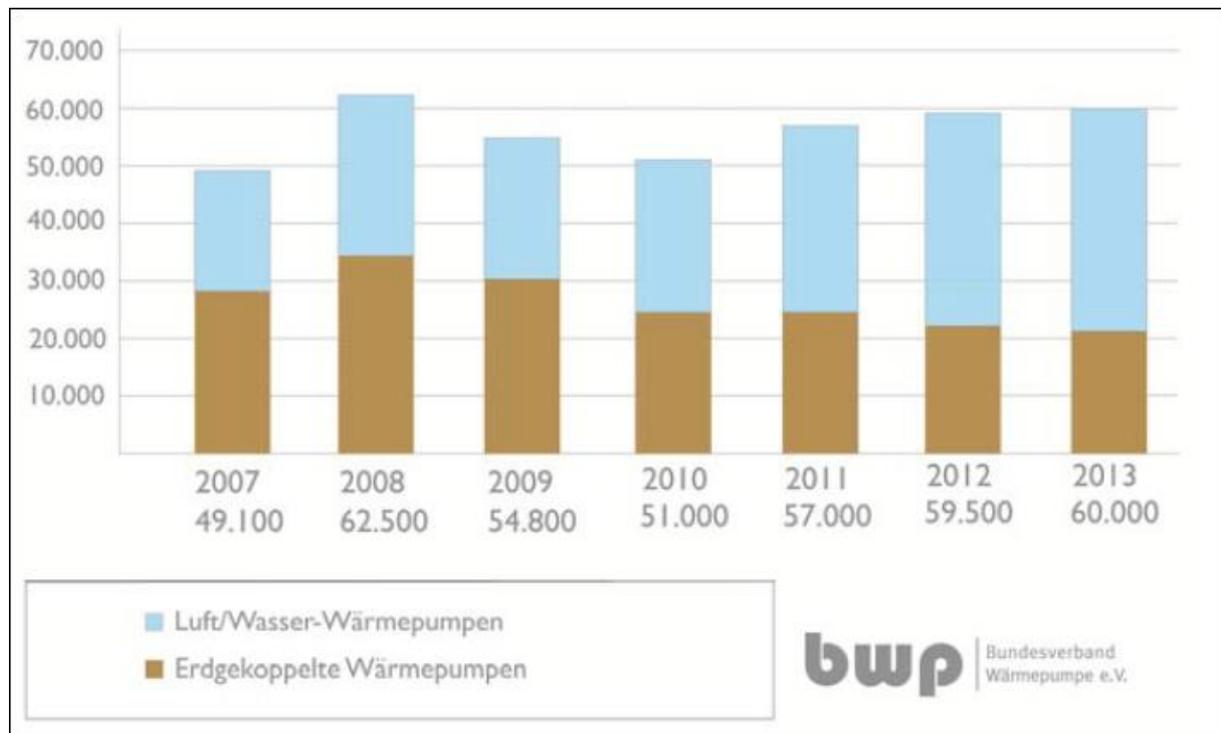


Abbildung 12: Absatz von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2007-2013, Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e.V.⁸⁴

Auffällig ist die relative Zunahme von Luft/Wasser-Wärmepumpen, deren Anteil im Jahr 2013 bei 64,8% lag. Der Gesamtabsatz ist seit dem Jahr 2007 um ca. 20% angestiegen.

Der Wärmepumpenmarkt in Deutschland verteilt sich auf eine Vielzahl zumeist mittelständischer Unternehmen. Auf der Internetseite des Bundesverbandes Wärmepumpe e.V. sind 40 Hersteller aufgelistet, dennoch weist der Wärmepumpenmarkt eine geringe Transparenz auf. Mit Ausnahme eines Tests durch die Stiftung Warentest aus dem Jahr 2007⁸⁵ sind weder Produkt- oder Preisvergleiche noch Informationen über Marktanteile einzelner Hersteller verfügbar.

⁸⁴ Vgl. BWP (2014)

⁸⁵ Vgl. Stiftung Warentest (2007), S. 65 ff

4.3.4 Dimensionierung der Wärmequelle

Die Größe der Wärmequelle hat maßgeblichen Einfluss auf die Investitionskosten für eine Wärmepumpenheizung. Die Wärmeaufnahmefähigkeit des Bodens hängt von dessen Zusammensetzung ab. Da keine Bodensuchung durchgeführt wurde, wurden Daten des Niedersächsischen Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) zugrunde gelegt. Das LBEG gibt im Internet Informationen über die lokalen Bodenverhältnisse und stellt unter der Seite <http://nibis.lbeg.de/geothermie/> standortgenaue Einschätzungen zur Eignung von Erdwärmepumpen zur Verfügung. Nach Eingabe der Koordinaten sowie des geschätzten Energieverbrauchs berechnet das Programm die Entzugsleistung und die Kollektorfläche bzw. Sondenlänge.⁸⁶ Die Ergebnisse der Berechnung sind in Anhang 10: dargestellt.

Erdkollektor:

Dem Ergebnis der LBEG zur Folge liefert der Boden für Erdwärmekollektoren bei 1.800 Betriebsstunden eine Entzugsleistung von 20-30 W/m². Bei angenommenen 25 W/m² muss die Wärmequelle demnach eine Fläche von mindestens 161 m² haben, wie Tabelle 9 hervorgeht:

benötigte Wärmeleistung	5.400	W
angenommene JAZ	3,9	
benötigte Leistung Wärmequelle	4.015	W
spezifische Entzugsleistung	25	W/m ²
Fläche Erdkollektor	161	m ²

Tabelle 9: Dimensionierung Wärmequelle Erdkollektor

Erdsonde:

Der Bau einer Erdsondenanlage ist ebenfalls möglich, es werden keine Entzugsleistungen genannt, jedoch eine Doppel-U-Bohrung mit einer Tiefe von 70-80 m vorgeschlagen, dies entspricht einer Entzugsleistung von ca. 50-60 W/m.

4.4 Solarthermie

Wie im Eingang zu diesem Kapitel erläutert, stellt Solarthermie in Deutschland nur einen sehr geringen Anteil von 0,7% als primäre Heizenergiequelle, wird aber in ca. 20% aller Neubauten als sekundäre Heizenergiequelle genutzt. Grund für die geringe Nutzung als

⁸⁶ Unter <http://nibis.lbeg.de/cardomap3/#> ist ein Kartenserver hinterlegt, in dem Informationen zu unterschiedlichen Bodenmerkmalen zu finden sind. Das Berechnungsprogramm ist unter folgendem Link verfügbar: <http://nibis.lbeg.de/geothermie/> (Stand 15.02.2015)

Primärenergiequelle sind die meteorologischen Verhältnisse in Deutschland, da in Zeiten des maximalen Energiebedarfes im Winter das Sonnenangebot am geringsten ist.

4.4.1 Funktionsprinzip

Solarthermie-Anlagen bestehen aus Sonnenkollektoren, einem Verteilsystem und ggf. einem Speicher. Wichtigster Bestandteil ist dabei der Kollektor, welcher die einfallende Sonnenstrahlung in Wärme umsetzt. Die Aufnahme der Sonnenstrahlung und deren Umwandlung in Wärme finden am Absorber statt. Der Absorber besteht aus dunkel beschichteten Metallflächen, auf deren Rückseite eine Flüssigkeit zirkuliert, die die einfallende Energie abtransportiert. Ziel ist eine maximale Absorption, d.h. die Maximierung der Umwandlung von Strahlung in Wärme. Dazu werden spezielle Beschichtungen eingesetzt. Zum Schutz vor Wärmeverlusten durch Transmission und Konvektion verfügen Kollektoren über eine transparente Abdeckung aus Glas.

Folgende zwei Arten von Kollektoren werden für Einfamilienhäuser eingesetzt⁸⁷:

- a) Flachkollektoren
- b) Vakuum-Röhrenkollektoren

Flachkollektoren bilden in Deutschland mit einem Anteil von ca. 90% der Installationen die gängigste Form. Sie bestehen aus einem nach hinten und zur Seite isolierten Gehäuse mit einer ebenen Glasabdeckung und einer dahin liegenden ebenen Absorberschicht. Hinter der Absorberschicht sind die Flüssigkeitskanäle verlegt.

Im Gegensatz dazu sind bei Vakuum-Röhrenkollektoren die Absorber in eine evakuierte Glasröhre eingebaut. Das Vakuum sorgt für geringe Wärmeverluste, wodurch die Effizienz der Vakuum-Röhrenkollektoren deutlich über derjenigen von Flachkollektoren liegt. Dagegen liegen die Kosten für Vakuum-Röhrenkollektoren deutlich über denen von Flachkollektoren.

4.4.2 Marktentwicklung

Der Markt für Solarthermie-Anlagen in Deutschland zeigt erhebliche Schwankungen. Abbildung 13 zeigt die Marktentwicklung seit dem Jahr 1992. Auf eine starke Zunahme der Installationen seit dem Jahr 1992 und einem Rekordzubau von 2.100.000 m² Kollektorfläche im Jahr 2008 folgte ein kontinuierlicher Rückgang auf zuletzt ca. 900.000 m² im Jahr 2014. Die volatile Marktentwicklung wird einerseits mit dem Fehlen eines konstanten Fördermechanismus begründet. Weiterhin wird Solarthermie durch PV verdrängt, da die

⁸⁷ Als weitere Varianten existieren Schwimmbadabsorber zur Beheizung von Schwimmbädern sowie konzentrierende Kollektoren (Parabolrinnenkollektoren und Solartürme) für großmaßstäbliche Anwendungen.

Installationskosten für PV wesentlich stärker gesunken sind als bei der Solarthermie. Weltweit ist der chinesische Markt mit einem Anteil von 84,9% des weltweiten Zubaus dominierend. Während in Deutschland überwiegend (ca. 90%) Flachkollektoren installiert werden, haben in China Röhrenkollektoren einen Marktanteil von über 90%.⁸⁸

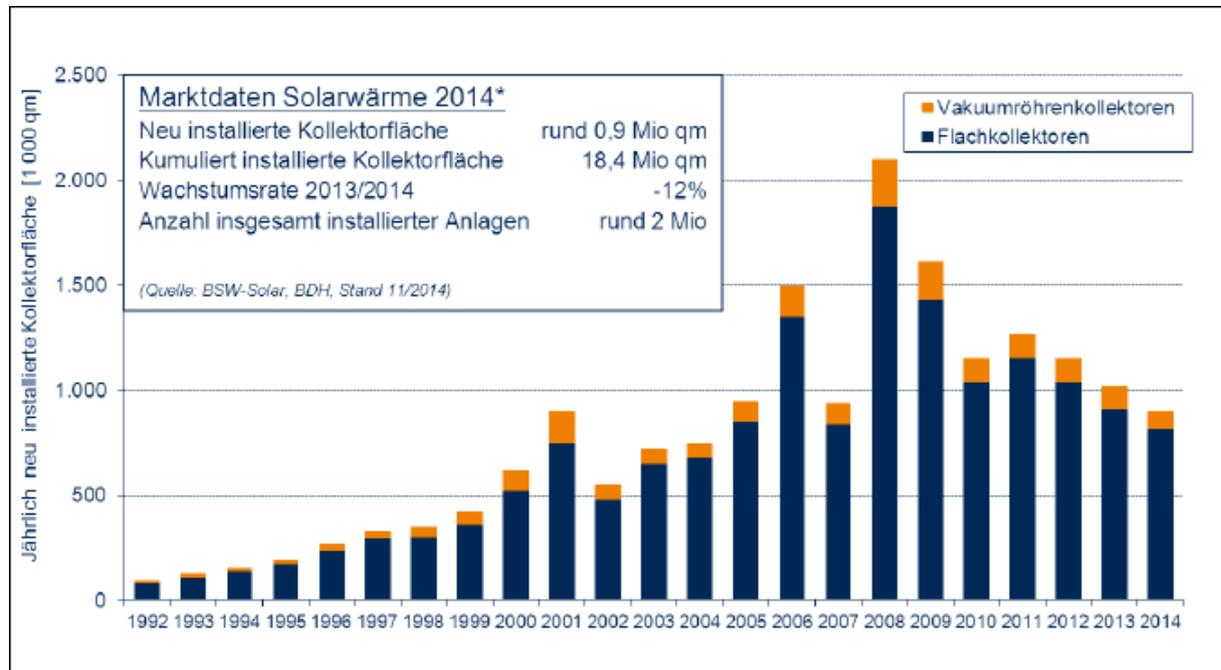


Abbildung 13: Zubau Solarthermie in Deutschland von 1992 bis 2014, Quelle: BSW Solar (2015)

Die Art der Nutzung der Solarthermie hat sich von der reinen Warmwasserversorgung hin zur Kombination von Warmwasser und Heizungsunterstützung entwickelt. Der Anteil der Kombianlagen an den Neuinstallationen stieg von 43% im Jahr 2011 auf 59% im Jahr 2012.⁸⁹ Damit nimmt Deutschland neben Österreich eine internationale Vorreiterrolle ein.

4.4.3 Dimensionierung

Die Dimensionierung einer Solarthermie-Anlage hängt von deren geplanter Nutzung und dem angestrebten solaren Deckungsgrad, d.h. dem Anteil der Wärmeerzeugung durch Solarthermie am Gesamtwärmebedarf, ab. Der solare Deckungsgrad steht dabei in Konkurrenz mit dem solaren Nutzungsgrad, d.h. dem Anteil der einfallenden Sonnenenergie, der für Warmwasser oder Heizungszwecke genutzt wird. Mit zunehmender Kollektorfläche nimmt der solare Deckungsgrad zu, gleichzeitig sinkt der Nutzungsgrad, da in Zeiten maximaler Einstrahlung die Energie immer weniger genutzt werden kann und bei Erreichen

⁸⁸ Vgl. Mauthner (2014), S. 18*

⁸⁹ Vgl. Mauthner (2013), S. 39 und Mauthner (2014), S. 35

der maximalen Temperaturen still steht. Zur Steigerung von Deckungsgrad und Nutzungsgrad werden Warmwasserspeicher eingesetzt.

Für einen üblichen solaren Deckungsgrad von ca. 60% bei der Warmwasserbereitstellung werden überschlägig pro Person ca. 1-1,5m² Flachkollektorfläche bzw. 0,8 m² Röhrenkollektorfläche angesetzt.⁹⁰ Soll zusätzlich die Heizung unterstützt werden, ist eine Vergrößerung der Kollektorfläche notwendig. Für einen solaren Deckungsgrad des Wärmebedarfes für Warmwasser und Heizung von ca. 10-40% wird eine Kollektorfläche von ca. 10-20 m² für Ein- und Zweifamilienhäuser angegeben, wobei der solare Deckungsgrad mit zunehmender Dämmung zunimmt.⁹¹

Ein grundsätzliches Problem der Solarthermie ist das zeitliche Auseinanderfallen von Energiebereitstellung und Nutzung. Dies betrifft sowohl die tägliche als auch die ganzjährige Betrachtung. Während der Großteil des Warmwasser- und Heizenergiebedarfs von Einfamilienhäusern in den Morgen- und Abendstunden auftritt, steht die Energiequelle Sonne nur tagsüber zur Verfügung. In der ganzjährigen Betrachtung entfällt der Großteil des Heizenergiebedarfes auf die Zeit geringer Sonneneinstrahlung.

Für die Nutzung von Solarthermie ist daher ein ausreichend dimensionierter Speicher notwendig. Als grobe Richtlinie zur Dimensionierung eines Warmwasserspeichers gilt der 1,5-2 fache Tagesbedarf an Warmwasser, bei einem 4-Personen-Haushalt ca. 270-360 l.⁹² Bei Anlagen mit Heizungsunterstützung sollte das Speichervolumen ca. 50-80 l je m² Kollektorfläche betragen.⁹³ Ein Langzeit-Wärmespeicher, der die jahreszeitlichen Schwankungen von Angebot und Nachfrage ausgleicht, wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

4.5 Photovoltaik

Photovoltaik (im Folgenden kurz: PV) wird in Deutschland bisher nicht in großem Umfang zu Heizzwecken genutzt. Da die Kombination von Wärmepumpen und PV eines der untersuchten Heizsysteme darstellt, werden die Technik und der PV-Markt nachfolgend kurz vorgestellt. Darauf folgt die Dimensionierung der PV-Anlage für das geplante Einfamilienhaus samt zugehöriger Ertrags- und Wirtschaftlichkeitsberechnung.

4.5.1 Funktionsprinzip

Eine PV-Anlage besteht aus PV-Modulen, dem Gestellsystem, der Verkabelung und einem Wechselrichter. Der Wechselrichter wandelt den erzeugten Gleichstrom aus den Modulen in

⁹⁰ Vgl. BINE (2008), S. 69

⁹¹ Vgl. ebenda, S. 79

⁹² Vgl. ebenda, S. 71

⁹³ Vgl. ebenda, S. 87

Wechselstrom um, damit dieser ins Hausnetz oder ins allgemeine Stromnetz eingespeist werden kann. Das Herzstück der PV-Anlage bilden die PV-Module, die aus Solarzellen bestehen. Die Leistung eines Solarmoduls wird in der Einheit Kilowatt-Peak (kWp) angegeben. Es handelt sich dabei um die Leistung eines Moduls unter Standard-Testbedingungen.⁹⁴

Photovoltaik beschreibt die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie. Durch Lichteinstrahlung werden in den Solarzellen Ladungsträger frei und diffundieren durch die Zellschichten. Daraus entsteht eine elektrische Spannung.⁹⁵ Solarzellen bestehen aus Halbleitern, wobei Silizium gegenwärtig das dominierende Einsatzmaterial ist.

Im Gegensatz zur Solarthermie, bei der ein Großteil der Wellenlängen der Sonnenstrahlung in Wärme umgesetzt wird, können Solarzellen nur einen begrenzten Bereich des Sonnenlichts in elektrische Energie umsetzen. Der Wirkungsgrad typischer multikristalliner Solarmodule liegt bei ca. 15% und damit deutlich unter dem von Solarthermie. Allerdings ist die generierte elektrische Energie als höherwertig zu betrachten, da sie nicht nur zu Wärme- bzw. Kältezwecken verwendet werden kann.

4.5.2 Marktentwicklung

PV ist eine etablierte Technik, die in Deutschland durch die Förderung durch das EEG stark ausgebaut wurde. Die Massenfertigung von Solarmodulen und der Aufbau großer Erzeugungskapazität insbesondere durch chinesische Firmen führten zu einem starken Preisrückgang bei PV-Modulen. Die Modulpreise sind zwischen 2006 und 2013 um 80% zurückgegangen, die Anlagenpreise insgesamt um knapp 70%.⁹⁶

In Deutschland sind Stand Ende Februar 2015 insgesamt 38.458 MWp durch das EEG geförderte PV-Anlagenleistung installiert.⁹⁷ Abbildung 14 zeigt den jährlichen Zubau der PV-Kapazitäten seit dem Jahr 2000.

⁹⁴ Da das Funktionsprinzip von PV nicht entscheidend für die nachfolgende Untersuchung ist, erfolgt nur eine kurze Darstellung. Für detaillierte Informationen zu allen wesentlichen Bestandteilen der PV-Anlage wird auf DGS (2008) verwiesen.

⁹⁵ Vgl. DGS (2008), S. 2.27 ff

⁹⁶ Vgl. EuPD (2013), S. 21

⁹⁷ Vgl. Bundesnetzagentur (2015)

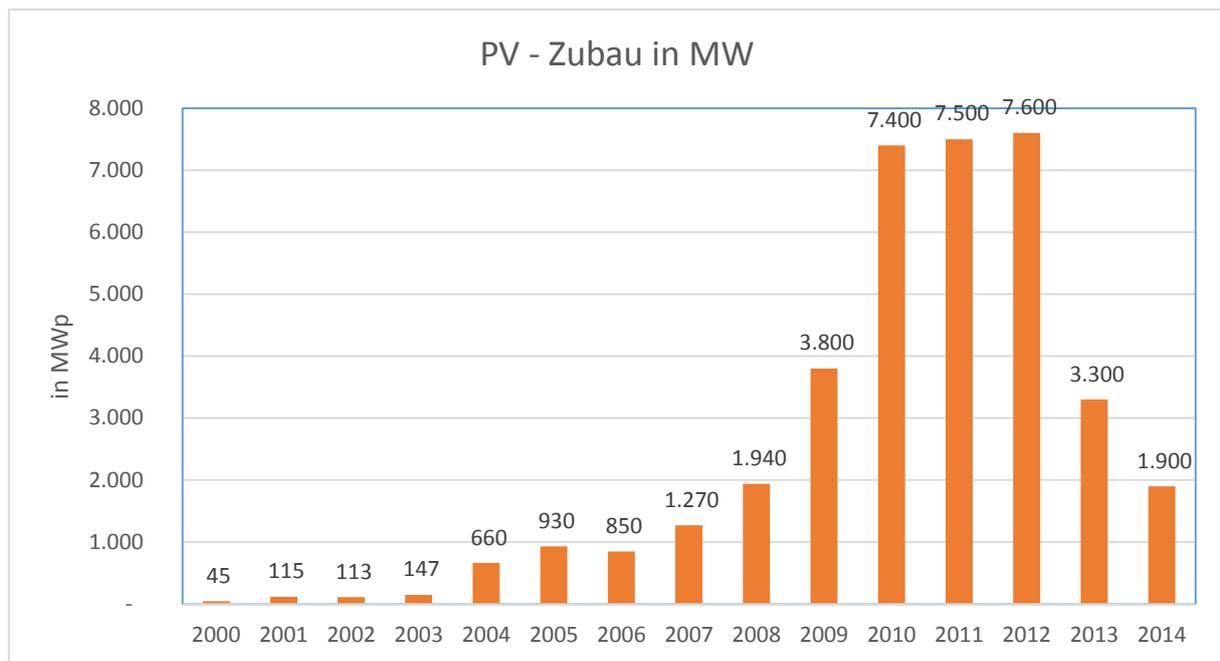


Abbildung 14: Zubau PV 2000-2014, eigene Darstellung, Quelle: BSW

Als Reaktion auf den großen Kapazitätswachstum von jeweils über 7.000 MW in den Jahren 2010 bis 2012 und den beschriebenen Preisverfall bei PV wurde die Einspeisevergütung mehrfach gesenkt, woraufhin die Zubauzahlen seit 2013 wieder zurückgegangen sind. Die Einspeisevergütung wird monatlich um mindestens 0,3% gesenkt, bei erfolgtem Zubau oberhalb des Zielkorridors von 2.400-2.600 MW pro Jahr erfolgt eine stärkere Degression. PV hatte im Jahr 2014 einen Anteil von ca. 5,7% an der Stromerzeugung in Deutschland.⁹⁸

4.5.3 Dimensionierung der PV-Anlage / Ertragsberechnung

Die PV-Anlage soll unabhängig vom ausgewählten Heizungssystem auf dem Hausdach errichtet werden und wird wie folgt dimensioniert

- Ausrichtung Süd
- Neigung 45°
- Nennleistung: 7 kWp (28 Module mit 250 kWp Nennleistung)
- Modultyp: Solarworld SW 250 Poly
- Größe der Anlage: 46,9 m²
- Modulwirkungsgrad (unter Standardbedingungen): 14,91%
- Degeneration PV-Module: 0,5% p.a.

Zur Berechnung des Energieertrages wurden Langzeitdaten zur monatlichen horizontalen Globalstrahlung des Deutschen Wetterdienstes verwendet.⁹⁹ Unter Zuhilfenahme eines

⁹⁸ Vgl. AGE (2015)

⁹⁹ Vgl. DWD

Planungshandbuch wurden Korrekturfaktoren für die Abweichung der Globalstrahlung von der Horizontalen genutzt.¹⁰⁰

Daraus wurde unter Zuhilfenahme eines weiteren Korrekturfaktors, der die Verluste durch unterschiedliche Temperaturen, Einstrahlungsstärken und Einstrahlungswinkel berücksichtigt, der monatliche PV-Ertrag berechnet. Die Ergebnisse wurden abgeglichen mit öffentlich zugänglichen PV-Ertragsberechnungsprogrammen.

Im nächsten Schritt wurde den PV-Erträgen der Haushaltsstrombedarf entgegengestellt und überschlägig die jeweilige Nutzbarkeit des PV-Stroms abgeschätzt. Auf dieser Basis wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung der PV-Anlage über 20 Jahre durchgeführt.

Folgende Annahmen wurden dazu getroffen:

- Anlagenpreis: 10.500 EUR (1.500 EUR/kWp)
- Jährliche Kosten für Versicherung & Wartung: 1,5% der Investitionssumme
- 100% Fremdfinanzierung, Annuitätendarlehen, Zinssatz: 2%, Laufzeit 20 Jahre (Annuität: 643 EUR)
- Bedarf Haushaltsstrom: 4.500 kWh, davon Anteil PV: 34%
- Inflation: 2% (allgemein, auch Strom)
- Einspeisevergütung: 12,25 ct/kWh
- Degeneration: 0,5% p.a.

¹⁰⁰ Vgl. DGS (2009), S. 6-7

Aktuelle Heizungskonzepte

Jahr	Ertrag [kWh]	Eigenverbrauch (EV)			Einspeisung EEG		Jährl. Kosten	Finanzierung	Überschuss
		EV [kWh]	Strompreis [ct/kWh]	Einsparung Strom	Einspeisung [kWh]	Erlöse EEG			
1	6.171	1.539	0,25	385 €	4.632	567 €	158 €	643 €	152 €
2	6.141	1.532	0,26	391 €	4.609	565 €	161 €	643 €	152 €
3	6.110	1.524	0,26	396 €	4.586	562 €	164 €	643 €	152 €
4	6.079	1.516	0,27	402 €	4.563	559 €	167 €	643 €	151 €
5	6.049	1.509	0,27	408 €	4.540	556 €	170 €	643 €	151 €
6	6.019	1.501	0,28	414 €	4.518	553 €	174 €	643 €	151 €
7	5.989	1.494	0,28	421 €	4.495	551 €	177 €	643 €	151 €
8	5.959	1.486	0,29	427 €	4.472	548 €	181 €	643 €	151 €
9	5.929	1.479	0,29	433 €	4.450	545 €	185 €	643 €	151 €
10	5.899	1.471	0,30	440 €	4.428	542 €	188 €	643 €	151 €
11	5.870	1.464	0,30	446 €	4.406	540 €	192 €	643 €	151 €
12	5.840	1.457	0,31	453 €	4.384	537 €	196 €	643 €	151 €
13	5.811	1.449	0,32	460 €	4.362	534 €	200 €	643 €	152 €
14	5.782	1.442	0,32	466 €	4.340	532 €	204 €	643 €	152 €
15	5.753	1.435	0,33	473 €	4.318	529 €	208 €	643 €	152 €
16	5.724	1.428	0,34	480 €	4.297	526 €	212 €	643 €	152 €
17	5.696	1.421	0,34	488 €	4.275	524 €	216 €	643 €	152 €
18	5.667	1.414	0,35	495 €	4.254	521 €	221 €	643 €	153 €
19	5.639	1.406	0,36	502 €	4.233	518 €	225 €	643 €	153 €
20	5.611	1.399	0,36	510 €	4.211	516 €	229 €	643 €	154 €
						Summe:			3.036 €
						Barwert (3% Abzinsung)			2.258 €

Tabelle 10: Wirtschaftlichkeitsrechnung PV

Das Ergebnis weist einen positiven Nettobarwert von ca. 2.200 EUR auf, damit ist die Investition als vorteilhaft zu bezeichnen. Die Ergebnisse sind als konservativ zu betrachten, da die Anlage über die 20 Jahre hinaus weiter betrieben werden kann. Zudem ist der Eigenverbrauchsanteil von 34,2% vorsichtig geschätzt. Bei entsprechender intelligenter Steuerung der Verbräuche in Zeiten hoher Sonneneinstrahlung (z.B. Waschmaschine) ist ein deutlich höherer Eigenverbrauchsanteil erzielbar.

Die Stromgestehungskosten der berechneten PV-Anlage liegen mit ca. 12,5 ct/kWh nur ca. halb so hoch wie die Bezugskosten für Strom. Für eingespeisten aus PV erhält der Anlagenbetreiber eine feste Vergütung nach dem EEG. Die Höhe der Vergütung ist abhängig von der zugebauten Kapazität in Deutschland. Es erfolgt eine monatliche Senkung der Einspeisevergütung von mindestens 0,3%, bei erfolgtem Zubau oberhalb des Zielkorridors von 2.400-2.600 MW pro Jahr erfolgt eine stärkere Degression. Zum Zeitpunkt der Erstellung

dieser Arbeit liegt der Einspeisesatz für März 2015 vor, dieser beträgt 12,5 ct/kWh.¹⁰¹ Bei gleichbleibendem Zubau innerhalb des Zielkorridors wird die Einspeisevergütung bei Inbetriebnahme der Anlage im November 2015 bei 12,25 ct/kWh liegen.

Entsprechend ist es vorteilhaft, einen möglichst großen Teil des benötigten Stroms selber zu erzeugen, da die zu erzielende Einspeisevergütung deutlich unter dem Bezugspreis für Haushaltsstrom liegt. Die Differenz zwischen Einspeisevergütung und dem Haushaltsstrompreis wird als zusätzlicher Erlös der PV-Anlage in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Dieser Effekt ist insbesondere interessant, da somit Strompreise für 20 Jahre gesichert werden können.

4.6 Kombinationsmöglichkeiten

In den vorherigen Abschnitten wurden monoenergetische Heizungssysteme vorgestellt, wobei jedes der Systeme unterschiedliche Vor- und Nachteile hat. In diesem Kapitel werden Kombinationsmöglichkeiten von Heizsystemen mit Solarenergie untersucht. Ziel ist es herauszufinden, ob durch die Kombination von Heizsystemen die jeweiligen Schwächen kompensiert werden können und im Ergebnis ein in der Gesamtbetrachtung von Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit besseres Ergebnis entsteht.

Aus ökonomischer Sicht steht die Frage, ob die erhöhten Investitionskosten, die bei der Installation mehrerer Systeme zwangsläufig entstehen, durch Einsparungen bei den Betriebskosten ausgeglichen werden. Aus ökologischer Sicht kann eine Kombination von Heizungssystemen dann sinnvoll sein, wenn die Schadstoffemissionen gesenkt werden, bzw. die eingesetzten eingespart werden.

4.6.1 Erdgas und Solarthermie

Zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen des fossilen Brennstoffes Erdgas wird die Kombination mit Solarthermie von der Erdgas-Branche stark beworben.¹⁰² Abhängig von der Größe der Solarthermie-Anlage kann diese in den Sommermonaten und in der Übergangszeit einen Großteil des- Warmwasser- und Heizwärmebedarfes decken.

Als Grundlage für die Berechnungen in Kapitel 5 wurde ein solarer Deckungsanteil von 35-40% bezogen auf den Gesamtenergiebedarf aus Heizung und Warmwasser angestrebt. Mit

¹⁰¹ Vgl. Bundesnetzagentur (2015)

¹⁰² Vgl. Erdgas.Info (2015)

Hilfe des Programms GetSolar Professional (Studentenversion)¹⁰³ wurde in einem iterativen Prozess eine entsprechende Anlagenkonfiguration erstellt. Diese sieht wie folgt aus:

- 12m² Kollektorfläche
- Flachkollektoren
- 1000 l Speicher

Die Berechnung ergab einen Ertrag von 3.295 kWh/Jahr, davon 2.443 kWh für Warmwasser und 852 kWh zur Heizungsunterstützung. Diese Werte wurden für die entsprechenden Szenarien bei der Berechnung aus Kapitel 3.2.1 eingegeben.

4.6.2 Pellets und Solarthermie

Für die Holzpellettheizung wird ebenfalls untersucht, ob die Kombination mit einer Solarthermie-Anlage Vorteile bringt. Die Dimensionierung der Anlage erfolgt gleichlautend mit der im vorigen Kapitel genannten Solarthermie-Anlage. Insbesondere bei Pellettheizungen tritt in Zeiten des Teillastbetriebs eine häufige Taktung ein, welche ungünstig im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Verbrennung und die entstehenden Schadstoffe ist. Diese Taktung kann bei der Kombination mit einer Solarthermie-Anlage deutlich reduziert werden. Die vorliegenden Rechenprogramme können diesen Effekt allerdings nicht abbilden.

4.6.3 Wärmepumpe + Photovoltaik

Wie in Kapitel 4.5.3 beschrieben, steigt die Wirtschaftlichkeit der untersuchten PV-Anlage mit Zunahme des Eigenverbrauchsanteils, da die Stromgestehungskosten für PV-Strom deutlich unter den Kosten für externen Strombezug – auch von Wärmepumpentarifen – liegen. Aus diesem Grund kann die Kombination einer PV-Anlage mit einer Wärmepumpe sinnvoll sein. Die Wärmepumpe wird soweit wie möglich mit PV-Strom betrieben.

Da – wie bei der Solarthermie – Sonneneinstrahlung und Wärmebedarf sowohl saisonal als auch während des Tages auseinander liegen, ist dabei die Einbeziehung eines Speichers notwendig. Grundsätzlich wäre für die Maximierung des PV-Eigenverbrauchs ein elektrischer Speicher vorteilhaft, da die Kosten mit ca. 1.000-1.500 EUR je gespeicherter kWh derzeit noch sehr hoch sind, werden Batteriespeicher nicht betrachtet. Für die folgende Berechnung wird daher ein Warmwasserspeicher verwendet. Es besteht aber bei sinkenden Preisen für Batteriespeicher die Möglichkeit diese nachzurüsten.

¹⁰³ Im Internet zu bestellen unter: <https://www.hottgenroth.de/software/solarpvsimulation/getsolar/>

Da der Heizungsbedarf in der sonnenarmen Jahreszeit liegt, ist der Ausnutzungsgrad des PV-Stroms durch die Wärmepumpe begrenzt. Hinzu kommt, dass sich die Arbeitszahl bei abnehmenden Temperaturen der Wärmequellen während der Heizperiode verschlechtert. Dies trifft insbesondere bei Luftwärmepumpen und in geringerem Umfang auf Erdkollektor-Wärmepumpen zu. Daher muss auch bei großzügiger Dimensionierung der PV-Anlage ein erheblicher Teil des Wärmebedarfes über externen Strombezug gedeckt werden.

Andererseits geht der Anteil der Heizenergie am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes mit zunehmender Dämmung zu Lasten des Warmwasserbedarfs zurück und liegt bei dem untersuchten Planungsbeispiel bei ca. 40% (vgl. Kapitel 3.2.1). Daher wird der Energiebedarf von Gebäuden tendenziell etwas gleichmäßiger über das Jahr verteilt, so dass Solarenergie über einen längeren Teil des Jahres die erforderliche Energie bereitstellen kann.

4.6.4 Gas & Adsorptionswärmepumpe

Als innovatives Heizungskonzept wird nachfolgend die Erdgas-Adsorptionswärmepumpe vorgestellt. Eine Adsorptionswärmepumpe wird im Gegensatz zu den unter Kapitel 4.3 beschriebenen elektrischen Wärmepumpen mit Erdgas betrieben.

Das Funktionsprinzip der Adsorptionswärmepumpe basiert auf einem diskontinuierlich laufenden zweistufigen Prozess, der aus Adsorption und Desorption besteht.

Im ersten Schritt erfolgt die Adsorption. Zunächst verdampft Wasser als Kältemittel bei niedrigem Druck bzw. Vakuum mit niedriger Temperatur durch Zufuhr von Umweltwärme (z.B. Luft oder oberflächennaher Erdwärme). Der Wasserdampf wird an der Oberfläche eines Zeoliths aufgenommen, also adsorbiert. Zeolith ist ein Feststoff (typischerweise bestehend aus Aluminiumoxid und Siliziumoxid), der über eine sehr große innere Oberfläche verfügt und die Eigenschaft besitzt, sich bei der Adsorption von Wasserdampf stark zu erhitzen. Die freiwerdende Wärme wird zu Heizzwecken genutzt.

Nach Abschluss der Adsorption (d.h. Sättigung des Zeoliths), erfolgt im nächsten Schritt die Desorption. Durch Einsatz von Hochtemperaturwärme aus einem Gasbrenner wird das im Zeolith gespeicherte Wasser desorbiert, d.h. getrennt und strömt als Wasserdampf zum Kondensator. Die Kondensationswärme wird ebenfalls zu Heizzwecken genutzt. Sobald der Zeolith getrocknet ist, wird die Wärmezufuhr beendet, woraufhin wiederum die Desorptionsphase beginnt.¹⁰⁴

¹⁰⁴ Vgl. BTGA (2014), S. 56 ff

Die Technologie befindet sich derzeit in der Markteinführung. Für Einfamilienhäuser sind derzeit Geräte der Hersteller Vaillant und Viessmann verfügbar. Das Gerät von Viessmann hat gemäß Produktdatenblatt einen gemäß Norm zertifizierten Jahresnutzungsgrad von 124% bezogen auf den Brennwert.¹⁰⁵

In der folgenden Untersuchung wird eine Adsorptionswärmepumpe einmal mit und einmal ohne eine Solarthermie-Anlage untersucht. Da in dem zur Berechnung des Energiebedarfs verwendeten Kalkulationsprogramm (s. Kapitel 3.2.1) keine Adsorptionswärmepumpe zur Verfügung stand, wurde eine konventionelle Gas-Brennwerttherme genutzt, deren Wirkungsgrad für die Berechnung entsprechend angepasst wurde.

4.7 Speicher

Eine Definition von Speichern lautet in der Fachliteratur wie folgt: „Ein Speicher ist eine Einrichtung zur Bevorratung, Lagerung und Aufbewahrung von Gütern“.¹⁰⁶ Für Energiespeicher im Besonderen existiert folgende Definition:

„Ein Energiespeicher ist eine energietechnische Einrichtung, welche die drei folgenden Prozesse beinhaltet: Einspeichern (Laden), Speicher und Ausspeichern (Entladen).¹⁰⁷

Die Energie kann in unterschiedlicher Form, in der Regel elektrisch, elektrochemisch, mechanisch oder chemisch-stofflich vorliegen. Sämtliche Speicher haben einen Wirkungsgrad von weniger als 100%, sind also mit Verlusten behaftet. Jeder Speicher wird daher den Gesamtenergiebedarf erhöhen.

Dennoch kann der Einbau von Speichern in Einfamilienhäusern sinnvoll bzw. notwendig sein, wenn die Energiebereitstellung und der Energiebedarf zeitlich auseinander fallen. Dies ist der Fall bei diskontinuierlicher Nutzung (z.B. Warmwasserverbrauch) und bei diskontinuierlicher Wärmebereitstellung (z.B. Solarenergie, vgl. 4.4.1).

Für Einfamilienhäuser werden in der Regel Wasserspeicher verwendet. Da die benötigten Vorlauftemperaturen für die Fußbodenheizung (ca. 35°C) und für Trinkwasser (ca. 50-55°C) unterschiedlich sind, sind unterschiedliche Speichertemperaturen sinnvoll. Folgende Varianten kommen in Frage:

- 2-Speicher-System
- Kombispeicher

¹⁰⁵ Vgl. Viessmann (2015)

¹⁰⁶ S. Sterner u.a. (2014), S. 26

¹⁰⁷ S. ebenda, S. 26

Bei einem 2-Speicher-System werden zwei getrennte Speicher, ein Pufferspeicher für die Heizung und ein Speicher für Trinkwasser, mit jeweils einem Wärmetauscher in einem Gerät integriert.

Im Kombispeicher sind beide Temperaturniveaus in einem System integriert. Durch thermische Schichtung ist im oberen Speicherbereich Trinkwarmwasser und im mittleren Bereich Heizungswasser vorhanden. Die Trinkwasserversorgung erfolgt in der Regel über einen separaten Wärmetauscher, so dass die Gefahr von Legionellen beseitigt wird, ohne dass ein regelmäßiges Aufheizen des kompletten Speichers notwendig ist. Durch den zusätzlichen Wärmetauscher sinkt jedoch der Wirkungsgrad des Systems.

Die Auslegung der Speichergröße ist nicht eindeutig definiert. Bei der Kombination eines Heizungssystems mit Solarthermie oder Photovoltaik sollte ein Speicher mindestens die Energiemenge bevorraten, die während der Zeit ohne Sonneneinstrahlung benötigt wird. Dies ermöglicht insbesondere in der Übergangszeit (Frühjahr und Herbst) hohe solare Deckungsgrade. Es ist dabei unvermeidbar, dass an Tagen mit geringer Solarstrahlung die konventionelle Heizung genutzt werden muss.

Weiterhin ist ein Speicher notwendig zur Vermeidung einer häufigen Taktung und des in der Regel weniger effizienten Teillastbetriebs. Dies betrifft insbesondere Wärmepumpen und Pelletheizungen.

5 Vergleich der Heizungssysteme

In diesem Kapitel wird der Vergleich der Heizungssysteme durchgeführt. Untersucht werden folgende zwölf Varianten:

- **Erdgas-Brennwert-Heizung** (im Folgenden kurz: Erdgasheizung)
- **Holzpellet-Heizung** (im Folgenden kurz: Pelletheizung)
- **Luft-Wasser-Wärmepumpe** (im Folgenden kurz: Luftwärmepumpe)
- **Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmequelle Erdsonde** (im Folgenden kurz: Sonde-Wärmepumpe)
- **Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmequelle Erdkollektor** (im Folgenden kurz: Erdkollektor-Wärmepumpe)
- **Erdgas-Brennwert-Heizung + Solarthermie-Anlage** (im Folgenden kurz: Erdgas + Solarthermie)
- **Holzpellet-Heizung + Solarthermie-Anlage** (im Folgenden kurz: Pellets + Solarthermie)
- **Luft-Wasser-Wärmepumpe + PV** (im Folgenden kurz: Luftwärmepumpe + PV)
- **Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmequelle Erdsonde + PV** (im Folgenden kurz: Sonde-Wärmepumpe + PV)
- **Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmequelle Erdkollektor + PV** (im Folgenden kurz: Erdkollektor-Wärmepumpe + PV)
- **Erdgas-Adsorptionswärmepumpe** (im Folgenden kurz: Adsorptionswärmepumpe)
- **Erdgas-Adsorptionswärmepumpe + Solarthermie-Anlage** (im Folgenden kurz: Adsorptionswärmepumpe + Solarthermie)

Zunächst werden die wirtschaftlichen und ökologischen Vergleichskriterien definiert. Anschließend wird jeweils ein separater wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich durchgeführt. Die Ausgangsdaten und Ergebnisse der einzelnen Berechnungen werden detailliert dargestellt und erläutert. Anschließend wird das Gesamtergebnis vorgestellt. Um die Ergebnisse auch über die vorliegende Hausplanung und die gewählten Planungsparameter hinaus aussagekräftig zu machen, bilden Sensitivitätsanalysen, bei denen jeweils ein Faktor geändert wird, den Abschluss des Heizungsvergleiches.

5.1 Definition der Vergleichskriterien

Nachfolgend werden die wirtschaftlichen und ökologischen Vergleichskriterien vorgestellt.

5.1.1 Kriterien wirtschaftlicher Vergleich

Als Kriterien für den wirtschaftlichen Vergleich werden die Gesamtkosten der Heizungssysteme und die Versorgungssicherheit festgelegt.

Die Berechnung der Gesamtkosten erfolgt auf Basis der Kapitalwertmethode. Dabei werden die laufenden Kosten auf den Zeitpunkt der Investition abgezinst. Das Ergebnis ist der Barwert aller während der Laufzeit entstehenden Kosten für das jeweilige Heizungssystem. Durch den Abzinsungszinssatz wird die zeitliche Entstehung der Kosten berücksichtigt.

Für die unterschiedlichen Heizsysteme werden jeweils die Kosten für eine Laufzeit von 20 und 30 Jahren ermittelt bzw. prognostiziert. Die Ergebnisse aus beiden Rechnungen fließen jeweils hälftig in das Ergebnis des ökologischen Vergleichs ein.

Die Gesamtkosten setzen sich wie folgt zusammen:

- Investitionskosten (Kosten für Heizung, Installation, Zubehör, Nebenkosten)
- Laufende Kosten
 - o Verbrauchsunabhängige Kosten (Wartung, Rücklage, Schornsteinfeger)
 - o Verbrauchsgebundene Kosten (Brennstoff, Hilfsenergie)

Folgende Randbedingungen werden für die Vergleichsrechnung definiert:

- Abzinsungszinssatz: 3%
- Inflation: 2% (allgemein, keine gesonderte Inflation der Energiepreise)
- Laufzeit 20/30 Jahre

Nachfolgend eine kurze Begründung zu den definierten Randbedingungen:

Der **Abzinsungszinssatz** liegt über dem aktuell sehr niedrigen Zinsniveau, berücksichtigt aber die Möglichkeit steigender Zinsen.

Die erwartete **Inflation** basiert auf dem Inflationsziel der Europäischen Zentralbank und spiegelt die Inflation in den vergangenen Jahren wider. Eine separate Inflationserwartung für die Energieträger wurde nicht zugrunde gelegt, obwohl insbesondere Strom und Erdgas in der Vergangenheit eine überdurchschnittliche Preissteigerung erlebten. Eine Fortführung der Preissteigerung beim Strom von 36% zwischen 2008 und 2014, wie sie vom Statistischen

Bundesamt ermittelt wurde,¹⁰⁸ hält der Autor nicht für wahrscheinlich. Gemäß den veröffentlichten Zahlen zum Verbraucherpreisindex für Februar 2015 sind sowohl die Erdgas- als auch die Strompreise im Vergleich zum Februar 2014 leicht gesunken.¹⁰⁹ Um die Möglichkeit stärker ansteigender Energiepreise abzubilden, werden im Rahmen der Sensitivitätsanalysen in Kapitel 5.5 entsprechende Szenarien berücksichtigt.

Eine Aufteilung der **Laufzeit** auf 20 und 30 Jahren wurde gewählt, um zusätzliche Transparenz im Ergebnis zu schaffen. Die untersuchten Heizungssysteme werden jeweils mit einer Lebensdauer zwischen 20 und 30 Jahren angegeben. Sollten Bauherren nur einen 20-Jahreszeitraum betrachten, können sie für den ökonomischen Vergleich das entsprechende Teilergebnis (s. Kapitel 5.2.3) für ihre Entscheidung nutzen.

Neben den prognostizierten Gesamtkosten der Investition bildet die **Versorgungssicherheit** einen wichtigen Faktor zur Beurteilung des gewählten Heizsystems. Sollte es zu einem (temporären) Ausfall der Versorgung kommen, ist die Funktion der Heizung nicht möglich, was erhebliche Auswirkungen auf den Komfort hätte, da ein Wechsel des Energieträgers in der Regel nur durch eine hohe Investition in eine neue Heizung möglich ist. Daher wird die Versorgungssicherheit im Rahmen des ökonomischen Vergleichs ebenfalls berücksichtigt.

Die **Bewertung** der Gesamtkostenrechnung erfolgt durch ein Punktesystem. Abhängig von den Gesamtkosten werden für die 20- und 30-Jahresbetrachtung jeweils zwischen 0 und 10 Punkte vergeben und das Ergebnis aus beiden Werten gemittelt. Die Versorgungssicherheit wird insofern berücksichtigt, dass bei eingeschränkter Versorgungssicherheit ein Punktabzug erfolgt. Details zur Bewertung sind in den jeweiligen Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 erklärt.

¹⁰⁸ Vgl. Destatis (2015-1)

¹⁰⁹ Vgl. Destatis (2015-2)

5.1.2 Kriterien ökologischer Vergleich

Während die ökonomischen Kriterien relativ objektiv auf kalkulierten Zahlen basieren, ist die Gewichtung der ökologischen Kriterien stärker von subjektiven Faktoren abhängig.

Folgende Ökologische Kriterien werden definiert und gewichtet

Kriterium	Erläuterung	Gewichtung
Treibhausgas-Ausstoß (CO ₂ -Äquivalent)	Ausstoß CO ₂ bzw. CO ₂ Äquivalent des Endenergie- bzw. Primärenergieträgers bei dem ermittelten Energiebedarf	50%
sonstige Schadstoffe	Ausstoß Schadstoffe, z.B. Stickstoffdioxid (NO ₂), Schwefeldioxid (SO ₂), Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtige Gase,	20%
Nachhaltigkeit der Erzeugung / Verarbeitung des Primär- bzw. Endenergieträgers	z.B. Umweltbelastung bei Rohstoffförderung, Langzeitfolgen, Entsorgung, soziale Auswirkungen	30%

Abbildung 15: Festlegung und Gewichtung der ökologischen Kriterien

Die Gewichtung der Kriterien wird wie folgt begründet:

Die Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen ist nach Auffassung des Autors das zentrale ökologische Ziel bei der Auswahl des Heizungssystems. Daher erfolgt eine starke Gewichtung dieses Kriterium.

Da nicht nur der Klimawandel negative Auswirkungen auf die Lebensgrundlagen von Mensch und Umwelt haben, werden weitere Kriterien im ökologischen Vergleich berücksichtigt. Der Ausstoß weiterer Schadstoffe kann unmittelbare gesundheitliche Auswirkungen auf die Anwohner haben.

Die beiden erstgenannten Kriterien betrachten die Auswirkungen der eingesetzten Energien bei deren direkter Verwendung. Für eine ganzheitliche Betrachtung sind zusätzlich die ökologischen Aspekte der Rohstoffgewinnung, Verarbeitung und ggf. Entsorgung zu berücksichtigen. Diese umfassen Faktoren wie Landschaftszerstörung sowie die Belastung von Boden, Luft und Trinkwasser durch die Rohstoffförderung. Weiterhin umfasst dieser Punkt soziale Probleme, die durch die Rohstoffgewinnung entstehen. Aus diesem Grund wird das Kriterium „Nachhaltigkeit“ stärker gewichtet als die Schadstoffe.

Als weiteres Kriterium sollte die Ökobilanz der Herstellung bzw. Entsorgung der jeweiligen Heizungssysteme dienen. In der Literatur waren dazu keine belastbaren Daten zu finden. Da bei keinem der untersuchten Systeme besonders auffällige Rohstoffe eingesetzt werden und zudem die Dimensionen vergleichbar sind, stellt die Ökobilanz der Herstellung nach

Auffassung des Verfassers kein Unterscheidungskriterium dar. Daher wurde sie nicht in die ökologische Bewertung aufgenommen.

Anhand der oben genannten Kriterien werden die Heizsysteme mit einem Punktesystem verglichen. Für jedes Kriterium werden für die betrachteten Heizsysteme zwischen 0 Punkten (sehr schlecht) bis 10 Punkte (sehr gut) vergeben. Entsprechend der Gewichtung wird die Gesamtpunktzahl für jede Heizungsvariante berechnet.

5.2 Ökonomischer Vergleich

5.2.1 Kostenaufstellung der Heizsysteme

Im Folgenden werden für die jeweiligen Heizsysteme die Investitionskosten sowie die laufenden Kosten dargestellt und daraus die Gesamtkosten für die Laufzeiten von 20 und 30 Jahren berechnet. Die Auswertung erfolgt mit MS Excel, die Ergebnisse werden im Text zusammengefasst und in Tabellen dargestellt.

Die Investitionskosten und die fixen Betriebskosten wurden aus Gesprächen mit Händlern, Installateuren sowie durch Internetrecherche ermittelt. Zur Ermittlung der verbrauchsgebundenen Betriebskosten werden die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnungen aus Kapitel 3.2.1 verwendet. Die Energiepreise wurden Vergleichsportalen im Internet entnommen, die an entsprechender Stelle benannt sind.

Folgende Angaben treffen auf alle gewählten Heizsysteme zu: Mit Ausnahme der Adsorptionswärmepumpe existiert für sämtliche Heizungsarten ein breites Angebot von Produkten mit unterschiedlicher Qualität, Ausstattung und Preisen. Es wurde dabei versucht, für alle Varianten Systeme auszuwählen, die hinsichtlich Qualität, Leistungsumfang und Preissegment vergleichbar sind. Dazu wurde intensiv mit Installations- und Handwerksfirmen gesprochen und eine Internet-Recherche durchgeführt. Breite Schwankungen traten ebenfalls für die erwarteten Kosten für Zubehör, Installationsaufwand und Wartungskosten auf. Es ist dem Autor bewusst, dass die Auswahl der jeweiligen Geräte und die Zuordnung der Kosten eine unvermeidbare methodische Schwäche darstellen.

Klarstellend sei zudem erwähnt, dass die nachfolgende Betrachtung nur das Wärmeerzeugungssystem betrifft. Die Lüftungsanlage sowie die Fußbodenheizung selber sind nicht Bestandteil der Kostenaufstellung bzw. des Kostenvergleichs, da diese unabhängig vom Heizsystem geplant werden. Grundsätzlich bieten einige Heizungshersteller integrierte Systeme an. Aus Komplexitätsgründen werden diese allerdings nicht berücksichtigt. Im folgenden Abschnitt werden die Kosten der einzelnen Heizsysteme dargestellt, jeweils aufgeteilt in Investitionskosten und laufende Kosten.

5.2.1.1 Erdgasheizung

Investitionskosten

Wie aus nachfolgender Tabelle 11 erkennbar wird, nimmt die Gastherme weniger als ein Drittel der gesamten Investitionskosten der Heizungsanlage ein.

Position	Kosten
Gastherme (Brötje WGB-E 15 kW)	3.000 €
Zubehör, Regler, Pumpe	700 €
Montage / Installation	2.000 €
Schornstein	1.500 €
Warmwasserspeicher (300 l)	1.200 €
Gasanschluss	1.569 €
Summe Investitionskosten:	9.969 €

Tabelle 11: Investitionskosten Erdgasheizung

Weitere Kostenfaktoren stellen Zubehör, Montage sowie die notwendige Abgasleitung dar. Hinzu kommen die Kosten für den Gasanschluss, die dem lokalen Gasnetzbetreiber entnommen wurden.¹¹⁰ Ein Warmwasserspeicher ist nicht zwingend erforderlich, verbessert jedoch den Komfort erheblich und reduziert die Taktung des Brenners. Ein solcher Speicher wird auch in den anderen monovalenten Heizungssystemen verwendet,

Laufende Kosten

Eine jährliche Überprüfung und Reinigung durch den Schornsteinfeger ist notwendig, wofür 50 EUR veranschlagt werden. Für Wartung und Reparaturen werden 200 EUR pro Jahr kalkuliert. Zur Bestimmung des Gaspreises wurde ein Preisvergleich über das Internetvergleichsportal Verivox durchgeführt und das Ergebnis mit den Tarifen des lokalen Anbieters Stadtwerke Buchholz verglichen. Tabelle 12 zeigt die jeweils niedrigsten Tarife.¹¹¹

Anbieter	Tarif	Grundpreis pro Jahr	Arbeitspreis	Gesamtkosten	Ø- Preis
Stadtwerke Buchholz	Erdgas Online	124,95 €	4,83 ct/kWh	501,93 €	6,43 €
Mitgas	Einheizpreis 12 Monate	60,00 €	5,53 ct/kWh	491,62 €	6,30 €

Tabelle 12: Berechnung Gaspreis

¹¹⁰ Vgl. Stadtwerke Buchholz

¹¹¹ www.verivox.de, Abruf vom 02.04.2015

Vergleich der Heizungssysteme

Für die weitere Berechnung wurde der günstigste Tarif gewählt. Daraus ergeben sich folgende laufende Kosten gemäß Tabelle 13:

fixe Betriebskosten	Wartung/Reparaturen		200 €
	Schornsteinfeger		50 €
verbrauchsabhängige Kosten	Bedarf	Kosten je Einheit	Gesamt
Erdgas	7.805 kWh	6,3 ct €	492 €
Hilfsenergie	948 kWh	0,245 €	232 €
Summe jährliche Kosten			974 €

Tabelle 13: Laufende Kosten Erdgasheizung

Gesamtkosten

Tabelle 14 zeigt die Gesamtkostenaufstellung für die Erdgasheizung:

Betrachtungszeitraum	20 Jahre	30 Jahre
Investitionskosten	9.969 €	9.969 €
laufende Kosten (abgezinst)	17.265 €	24.714 €
Gesamtkosten	27.234 €	34.683 €

Tabelle 14: Gesamtkosten Erdgasheizung

5.2.1.2 Pelletheizung

Investitionskosten

Die Kosten für die Pelletheizung setzen sich aus den Kosten für den Ofen sowie dem zugehörigen Pellet-Speicher und dem Fördersystem zusammen. Bei der Pelletheizung ist ein Pellet-Speicher notwendig, der mindestens den jährlichen Bedarf aufnehmen sollte, um teure Einzellieferungen zu vermeiden. Der Platzbedarf für den zusätzlichen Lagerraum wurde nicht in die Kalkulation aufgenommen, d.h. es wurde unterstellt, dass im Heizungsraum ausreichend Platz für das notwendige Sacksilo vorhanden ist. Weitere Kosten entstehen für den notwendigen Schornstein und den Pufferspeicher. Letzterer ist für Warmwasser vorgesehen, um eine häufigere Taktung zu vermeiden.

Position	Kosten
Pelletofen: Olsberg Levana Aqua 8 kW	6.500 €
Zubehör, Lager (Sacksilo), Förderschnecke	3.500 €
Montage / Installation	2.000 €
Schornstein	2.500 €
Warmwasserspeicher (300 l)	1.200 €
Summe Investitionskosten	15.700 €

Tabelle 15: Investitionskosten Pelletheizung

Laufende Kosten

Pelletheizungen und die Abgasleitung müssen zwei Mal jährlich vom Schornsteinfeger überprüft bzw. gereinigt werden, zudem sind in zweijährigen Abständen Emissionsmessungen notwendig. Die durchschnittlichen Kosten werden mit 100 EUR pro Jahr berechnet. Für die Wartung und kleine Reparaturen werden jährlich 200 EUR kalkuliert.

Als Brennstoffkosten werden die durchschnittlichen Preise für 2-Tonnen-Lieferungen für das Jahr 2014 aus dem C.A.R.M.E.N. Pelletpreisindex zu Grunde gelegt.¹¹²

Die jährlichen Kosten sind in Tabelle 16 zusammengefasst:

fixe Betriebskosten	Wartung/Reparaturen		200 €
	Schornsteinfeger		100 €
verbrauchsabhängige Kosten	Bedarf	Kosten je Einheit	Gesamt
Pellets	1,876 t	291,71 €	547,30 €
Hilfsenergie	1.014 kWh	0,245 €	248,40 €
Summe jährliche Kosten			1.096 €

Tabelle 16: Laufende Kosten Pelletheizung

Gesamtkosten

Nachfolgende Tabelle 1 zeigt die Gesamtkostenaufstellung der Pelletheizung für die Betrachtungszeiträume 20 bzw. 30 Jahre:

Betrachtungszeitraum	20 Jahre	30 Jahre
Investitionskosten	15.700 €	15.700 €
laufende Kosten (abgezinst)	19.424 €	27.804 €
Gesamtkosten	35.124 €	43.504 €

Tabelle 17: Gesamtkosten Pelletheizung

5.2.1.3 Wärmepumpen

Bei den Wärmepumpen werden Systeme mit den drei folgenden Wärmequellen untersucht:

- Luft
- Erdkollektor
- Erdsonde

Investitionskosten

Die Kosten einer Wärmepumpenheizung setzen sich aus den Kosten für das Heizgerät, Montage- und Installationskosten und einem Stromzähler zusammen. Wie bei vorgenannten Heizungen wird ebenfalls ein Warmwasserspeicher für Brauchwasser verwendet. Dieser sollte

¹¹² Vgl. C.A.R.M.E.N. (2015) bzw. Anhang 9:

Vergleich der Heizungssysteme

klein dimensioniert sein, um Speicherverluste zu begrenzen, die die Effizienz der Wärmepumpe reduzieren. Ein Stromzähler ist abhängig vom Stromtarif notwendig. Eine Übersicht der Investitionskosten zeigt Tabelle 18:

Position	Luft-Wasser-Wärmepumpe	Sonde-Wärmepumpe	Erdkollektor-Wärmepumpe
Wärmepumpe	8.500 €	8.000 €	8.000 €
Zubehör	1.000 €	1.000 €	1.000 €
Montage / Installation	2.000 €	1.500 €	1.500 €
Erschließung Wärmequelle	-	7.000 €	3.500 €
Warmwasserspeicher (300 l)	1.200 €	1.200 €	1.200 €
Zähler	500 €	500 €	500 €
Summe Investitionskosten:	13.200 €	19.200 €	15.700 €

Tabelle 18: Investitionskosten Wärmepumpen

Wie aus Tabelle 18 erkennbar, differenzieren sich die Kosten für die Wärmepumpen insbesondere durch die Kosten für die Erschließung der Wärmequelle. Während bei Luft keine Kosten für die Wärmequelle anfallen (die Kosten für den Ventilator und dessen Aufbau sind im Wärmepumpenpreis enthalten), sind die beiden anderen Varianten mit erheblichen Kosten verbunden. Die Kosten wurden auf Basis der Dimensionierung der Wärmequelle aus Kapitel 4.3.4 ermittelt und sind in Tabelle 19 dargestellt:

	Erdkollektor	Erdsonde
Größe Kollektorfläche / Länge Sonde	160 m ²	80 m
Kosten pro m ²	20 €	60 €
Kosten	3.200 €	4.800 €
sonstige Kosten	300 €	2.200 €
Gesamtkosten	3.500 €	7.000 €

Tabelle 19: Kostenermittlung Wärmequellen

Bei den berechneten 20 EUR/m² für den Erdkollektor handelt es sich um einen relativ niedrigen Preis. Dieser berücksichtigt, dass im Rahmen des Hausbaus und der Geländeaufschüttung eh Bodenarbeiten durchgeführt werden.

Verbrauchskosten

Die jährlichen fixen Kosten werden mit 100 EUR angenommen. Wärmepumpen arbeiten nahezu verschleißfrei und haben im Vergleich mit anderen Heizsystemen die geringsten Wartungs- und Instandhaltungskosten.

Für Wärmepumpen existieren spezielle Stromtarife, die den Stromversorgern die Abschaltung der Geräte zu Spitzenlastzeiten ermöglichen. Diese zeichnen sich durch geringe variable Kosten aus, haben allerdings einen zusätzlichen Grundpreis. Die Analyse der aktuell

Vergleich der Heizungssysteme

verfügbaren Sondertarife für Wärmepumpen ergab einen leichten Vorteil von Wärmepumpentarifen, wie aus Tabelle 20 erkennbar wird.

Typ:	Luft-Wasser-Wärmepumpe	
Verbrauch Wärmepumpe	2.431 kWh	
Tarifvergleich	Haushaltsstrom	Wärmepumpentarif
Anbieter / Tarifname	Grünwelt / Grünstrom Classic	Grundgrün / grundgrüner Strom
Grundpreis (Jahr)	0 €	108 €
variabler Preis (ct/kWh)	23,82	17,45
Gesamtkosten pro Jahr	579 €	532 €
Durchschn. Preis pro kWh	23,82	21,89
Vorteil Wärmepumpen-Tarif		46,85 €

Tabelle 20: Vergleich Stromtarife, Quelle: Verivox, Abrufdatum: 25.03.2015

Je geringer der Energiebedarf des Gebäudes, desto geringer fällt der Vorteil von Wärmepumpentarifen aus, da die zusätzlichen Grundgebühren weniger durch die niedrigeren variablen Kosten ausgeglichen werden. Entsprechend der jeweiligen Stromverbräuche werden jeweils unterschiedliche Strompreise für die drei betrachteten Wärmepumpen angesetzt. Eine Übersicht der verbrauchsabhängigen Kosten ist in Tabelle 21 dargestellt:

	Luft-Wasser-Wärmepumpe	Sonde-Wärmepumpe	Erdkollektor-Wärmepumpe
Fixe Kosten: Wartung/Reparatur	100 €	100 €	100 €
Schornsteinfeger	entfällt	entfällt	entfällt
verbrauchsabhängige Kosten			
Stromverbrauch Wärmepumpe	2.431 kWh	1.673 kWh	1.929 kWh
Kosten je Einheit	0,22 ct/kWh	0,24 ct/kWh	0,23 ct/kWh
Kosten WP-Strom pro Jahr	532 €	399 €	445 €
Hilfsenergieverbrauch	900 kWh	1.000 kWh	1.010 kWh
Kosten je Einheit	0,245 ct/kWh	0,245 ct/kWh	0,245 ct/kWh
Kosten Hilfsenergie	221 €	245 €	247 €
Summe jährliche Kosten	853 €	744 €	792 €

Tabelle 21: Laufende Kosten Wärmepumpen

Gesamtkosten

Aus den oben ermittelten Zahlen resultieren folgende Gesamtkosten:

	Luft-Wasser-Wärmepumpe	Sonde-Wärmepumpe	Erdkollektor-Wärmepumpe
Investitionskosten	13.200 €	19.200 €	15.700 €
laufende Kosten 20 Jahre (abgezinst)	15.116 €	13.180 €	14.041 €
laufende Kosten 30 Jahre (abgezinst)	21.637 €	18.866 €	20.098 €
Gesamtkosten 20 Jahre	28.316 €	32.380 €	29.741 €
Gesamtkosten 30 Jahre	34.837 €	38.066 €	35.798 €

Tabelle 22: Gesamtkosten Wärmepumpen

Während die Luft-Wärmepumpe unter den Wärmepumpen die niedrigsten Investitionskosten verursacht, sind die laufenden Kosten am Höchsten. Das Gegenteil gilt für die Sonde-Wärmepumpe. Über die Laufzeit von 30 Jahren liegen die Gesamtkosten für die Luft-Wasser-Wärmepumpe ca. 1.000 EUR unter denen der Erdkollektor-Wärmepumpe. Bei der Sonde-Wärmepumpe reichen die Einsparungen im laufenden Betrieb nicht aus, um die hohen Investitionskosten auszugleichen, so dass die Sonde-Wärmepumpe nach 30 Jahren ca. 3.000 EUR höhere Gesamtkosten aufweist als die Luft-Wärmepumpe.

Bei Wärmepumpen ist eine besonders große Schwankungsbreite bei den Investitionskosten festzustellen. Angebote im Internet liegen z.T. bis zu 50% unter den Listenpreisen der Hersteller, auch bei Heizungs-Installateuren liegen die Kostenangaben weit auseinander. Erhebliche Unterschiede gab es ebenfalls bei den angebotenen und geschätzten Installations- und Montagekosten sowie den Kosten zur Erschließung von Wärmequellen.

5.2.1.4 Erdgas und Solarthermie

Investitionskosten

Bei der Kombination von Erdgas-Brennwertheizung und Solarthermie fallen neben den Kosten für die Erdgasheizung (s. 5.2.1.1) höhere Kosten für den Warmwasserspeicher sowie die Kosten für die Solarkollektoren samt Installation und Leitungen an. Die Speicherkosten werden mit 2.000 EUR für einen 1.000 l Puffer-Speicher angenommen. Für die Solarthermie-Anlage (Dimensionierung entsprechend Kapitel 4.4.3) wurden 5.000 EUR kalkuliert.

Vergleich der Heizungssysteme

Dadurch ergibt sich folgende Kostenaufstellung:

Position	Kosten
Gastherme (Brötje WGB-E 15 kW)	3.000 €
Zubehör, Regler, Pumpe	700 €
Montage / Installation	2.000 €
Schornstein	1.500 €
Pufferspeicher (1.000 l)	2.000 €
Solarthermieanlage (incl. Installation)	5.000 €
Gasanschluss	1.569 €
Summe Investitionskosten:	15.769 €

Tabelle 23: Investitionskosten Erdgasheizung + Solarthermie

Laufende Kosten

Bei den laufenden Kosten wurden zu den Kosten für die Erdgasheizung 50 EUR jährlich für die Wartung der Solarthermieanlage kalkuliert.

fixe Betriebskosten	Wartung/Reparaturen		250 €
	Schornsteinfeger		50 €
verbrauchsabhängige Kosten	Bedarf	Kosten je Einheit	Gesamt
Erdgas	4.397...kWh	6,3 ct €	277 €
Hilfsenergie	1.082 kWh	0,245 €	265 €
Summe jährliche Kosten			842 €

Tabelle 24: Laufende Kosten Erdgas + Solarthermie

Gesamtkosten

Tabelle 25 zeigt die Gesamtkosten der Kombination von Erdgasheizung und Solarthermie.

Betrachtungszeitraum	20 Jahre	30 Jahre
Investitionskosten	15.769 €	15.769 €
laufende Kosten (abgezinst)	14.928 €	21.368 €
Gesamtkosten	30.696 €	37.136 €
Vergleich Erdgas:	27.234 €	34.683 €
Mehrkosten Erdgas + Solarthermie	3.462 €	2.454 €

Tabelle 25: Gesamtkosten Erdgas + Solarthermie / Vergleich mit Erdgasheizung

Aus dem Vergleich mit der Erdgasheizung wird ersichtlich, dass die Einsparungen bei den Brennstoffkosten die höheren Anschaffungskosten nicht ausgleichen. Ein Teil der eingesparten Brennstoffkosten wird zudem durch die zusätzlichen Wartungskosten und den höheren Hilfsenergieverbrauch durch die Solarthermie-Pumpe aufgehoben.

5.2.1.5 Pellets und Solarthermie

Investitionskosten

Bei der Kombination von Pelletheizung und einer Solarthermie-Anlage treten dieselben zusätzlichen Kosten für die Solarthermie-Anlage und den größeren Pufferspeicher auf wie bei der zuvor betrachteten Kombination Erdgas + Solarthermie, woraus folgende Investitionskosten resultieren:

Position	Kosten
Pelletofen: Olsberg Levana Aqua 8 kW	6.500 €
Zubehör, Lager (Sacksilo), Förderschnecke	3.500 €
Montage / Installation	2.000 €
Schornstein	2.500 €
Solarthermieanlage	5.000 €
Pufferspeicher (300 l)	2.000 €
Summe Investitionskosten:	21.500 €

Tabelle 26: Investitionskosten Pelletheizung und Solarthermie

Laufende Kosten

Für die laufenden Kosten werden ebenfalls weitere 50 EUR/Jahr für die Wartung der Solarthermieanlage berechnet, woraus sich folgende Kostenaufstellung ergibt:

fixe Betriebskosten	Wartung/Reparaturen		250 €
	Schornsteinfeger		100 €
verbrauchsabhängige Kosten	Bedarf	Kosten je Einheit	Gesamt
Pellets	1,090 t	291,71 €	318 €
Hilfsenergie	1.125 kWh	0,245 €	276 €
Summe jährliche Kosten			944 €

Tabelle 27: Laufende Kosten Pellets + Solarthermie

Gesamtkosten

Wie bei der Kombination Pellets + Solarthermie gleichen die reduzierten Brennstoffkosten durch die Solarthermie-Anlage die zusätzlichen Investitionen nicht aus, wie aus Tabelle 28 erkennbar wird.

Betrachtungszeitraum	20 Jahre	30 Jahre
Investitionskosten	15.769 €	15.769 €
laufende Kosten (abgezinst)	16.728 €	23.945 €
Gesamtkosten	38.228 €	45.445 €
Vergleich Pelletheizung	35.124 €	43.504 €
Mehrkosten Pellets + Solarthermie	3.104 €	1.940 €

Tabelle 28: Gesamtkosten Pellet + Solarthermie / Vergleich mit Pelletheizung

5.2.1.6 Wärmepumpen + PV

Investitionskosten

Bei den Kombinationen aus Wärmepumpe und PV besteht die Problematik, die Kosten und Erlöse der PV-Anlage richtig abzubilden, ohne das Ergebnis zu verfälschen. Es bestehen die Alternativen

- a) die vollen Kosten und Erlöse zu berücksichtigen oder
- b) nur die eingesparten Kosten durch den zusätzlichen Eigenverbrauch des PV-Strom aufzunehmen.

Die Entscheidung fiel auf die Alternative b) mit folgender Begründung: Wie in Kapitel 4.5.3 beschrieben, wurde unabhängig vom Heizsystem eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für die PV-Anlage durchgeführt. Deren Ergebnis zeigte, dass die Photovoltaikanlage ohne Wärmepumpe bereits eine wirtschaftlich sinnvolle Investition darstellt. Im Falle von Alternative a) hätten die unabhängig von der Wärmepumpe angefallenen PV-Erträge das Ergebnis beeinflusst, wie nachfolgende Berechnung der Gesamtkosten zeigt:

Gesamtkostenbetrachtung Erdollektor-Wärmepumpe	20 Jahre	30 Jahre
Alternative a) Berechnung Investitionskosten, Wartungskosten und sämtlicher Erträge der PV-Anlage	27.616 €	30.292 €
Alternative b) Berechnung des Eigenverbrauchs Wärmepumpen-Strom	28.925 €	34.184 €
Differenz	1.309 €	3.892 €

Tabelle 29: Gesamtkostenrechnung mit/ohne Aufnahme PV in Investitionskosten

Die Erträge der PV-Anlage wären dem Heizsystem Wärmepumpe + PV zugeordnet worden, was diese im Vergleich der Heizsysteme bevorzugt hätte. Für die Vergleichsrechnungen werden daher nur die Einsparungen durch den Eigenverbrauch des Wärmepumpenstroms bei den laufenden Kosten berücksichtigt.

Als zusätzliche Investitionskosten fallen somit bei Wärmepumpe + PV nur die Kosten für einen größeren Speicher (2.000 EUR für den Pufferspeicher anstelle von 800 EUR für den Brauchwasserspeicher) an, wie in Tabelle 30 ersichtlich.

Position	Luft-Wasser Wärmepumpe	Sonde- Wärmepumpe	Erdkollektor- Wärmepumpe
Wärmepumpe	8.500 €	8.000 €	8.000 €
Zubehör	1.000 €	1.000 €	1.000 €
Montage / Installation	2.000 €	1.500 €	1.500 €
Erschließung Wärmequelle	-	7.000 €	3.500 €
Pufferspeicher (1.000 l)	2.000 €	2.000 €	2.000 €
Zähler	500 €	500 €	500 €
Summe Investitionskosten:	14.000 €	20.000 €	16.500 €

Tabelle 30: Investitionskosten Wärmepumpe + PV

Laufende Kosten

Zur Bestimmung des Eigenverbrauchs wurde die Ertragsprognose aus Kapitel 4.5.3 um die Nutzung der Wärmepumpe ergänzt. Da keine kostenlosen Kalkulationsprogramme für die Berechnung des Eigennutzungsanteils der Wärmepumpe verfügbar waren, wurde die Berechnung manuell wie folgt durchgeführt.

- Der Warmwasserbedarf zzgl. Wärmeverlusten in Höhe von 3.092 kWh (gemäß Energiebedarfsberechnung aus Kapitel 3.2.1) wurde linear auf die Monate verteilt
- Zur Ermittlung des monatlichen Heizungswärmebedarfs wurden langjährige monatliche Gradtagszahlen genutzt.¹¹³ Der Heizwärmebedarf von 4.616 kWh (Ergebnis aus 3.2.1) wurde durch die Summe der Gradtage (3.124) geteilt, und anschließend mit den monatlichen Gradtagszahlen multipliziert. Dadurch wurde der monatliche bzw. tägliche Heizenergiebedarf ermittelt.
- Der Energiebedarf wurde durch die monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpe dividiert und dem nach Abzug des Eigenverbrauchs verbleibenden PV-Ertrag gegenübergestellt.
- Da die Sonneneinstrahlung innerhalb der Monate stark schwankt und der PV-Strom daher nur zu einem Teil nutzbar ist, wurde die Nutzbarkeit des zur Verfügung stehenden Stroms geschätzt auf Werte zwischen 20% und 40%.
- Daraus wurde der durch die PV-Anlage täglich bereitgestellte Wärmepumpenstrom und der Deckungsgrad des PV-Stroms errechnet

¹¹³ Vgl. IWU (2014-1)

Die Ergebnisse der Eigenverbrauchsschätzung sind in Tabelle 31 dargestellt.

Monat	Überschuss PV-Strom [kWh/Tag]	Bedarf WW + Heizung [kWh/Tag]	Arbeitszahl WP	WW/Heizung Strombedarf [kWh/Tag]	Nutzbarkeit PV [%]	Durch PV gedeckt [kWh/Tag]	Anteil PV-Deckung [%]
Jan	3,6	35,9	3,7	9,7	40%	1,4	15%
Feb	7,4	35,5	3,8	9,3	40%	3,0	32%
Mrz	11,2	30,7	4	7,7	40%	4,5	58%
Apr	16,9	22,9	4,1	5,6	30%	5,1	91%
Mai	21,4	12,3	4,2	2,9	25%	2,9	100%
Jun	20,3	8,7	4,2	2,1	20%	2,1	100%
Jul	20,6	8,5	4,1	2,1	20%	2,1	100%
Aug	19,0	8,5	4,1	2,1	20%	2,1	100%
Sep	15,1	9,7	4,2	2,3	25%	2,3	100%
Okt	8,9	18,7	4,2	4,4	30%	2,7	60%
Nov	4,9	28,8	4	7,2	35%	1,7	24%
Dez	2,6	34,2	3,9	8,8	40%	1,1	12%
Eigenverbrauch Solarstrom für Wärmepumpe:						936,6 kWh	48%

Tabelle 31: Eigenverbrauch PV-Strom durch Erdkollektor-Wärmepumpe

Bei den Werten aus Tabelle 31 handelt es sich um eine Schätzung, die zu einer Deckung des Strombedarfs durch die Wärmepumpe von ca. 48% führt. Dies liegt unter den Ergebnissen vergleichbarer Berechnungen.¹¹⁴

Um den Vorteil des selbstverbrauchten WP-Stroms korrekt zu erfassen, wurde vom Wärmepumpen-PV-Strom die entgangene EEG-Vergütung abgezogen, das Ergebnis stellt den Vorteil der PV-Anlage für die Wärmepumpe dar.

Die Kosten für die Wartung der PV-Anlage sind bereits in der Wirtschaftlichkeitsberechnung der PV-Anlage berücksichtigt, so dass keine zusätzlichen Wartungskosten gegenüber der reinen Wärmepumpenheizung anfallen. Die laufenden Kosten sind in Tabelle 32 dargestellt.

¹¹⁴ Vgl. AEE (2014), S. 17; Quaschnig u.a. (2014), S. 8

Vergleich der Heizungssysteme

	Luft-Wasser- Wärmepumpe	Sonde- Wärmepumpe	Erdkollektor- Wärmepumpe
Fixe Kosten: Wartung/Reparatur	100 €	100 €	100 €
Schornsteinfeger	entfällt	entfällt	entfällt
verbrauchsabhängige Kosten			
Stromverbrauch Wärmepumpe	2.437 kWh	1.677 kWh	1.933 kWh
Kosten je Einheit	0,24 ct/kWh	0,24 ct/kWh	0,24 ct/kWh
Kosten WP-Strom pro Jahr	585 €	402 €	464 €
Hilfsenergieverbrauch	967 kWh	1.067 kWh	1.077 kWh
Kosten je Einheit	0,245 ct/kWh	0,245 ct/kWh	0,245 ct/kWh
Kosten Hilfsenergie	237 €	261 €	264 €
Summe jährliche Kosten	853 €	744 €	792 €
Eigenverbrauch PV-Strom durch Wärmepumpe Jahr 1 ¹¹⁵	1023,5 kWh	893,2 kWh	936,6 kWh
Abzug PV Eigenverbrauch (Mittelwert 20 Jahre)	170 €	148 €	155 €
Abzug PV Eigenverbrauch (Mittelwert 30 Jahre)	196 €	171 €	180 €

Tabelle 32: Laufende Kosten Wärmepumpe + PV

Gesamtergebnis

Das Gesamtergebnis in Tabelle 33 zeigt einen Kostenvorteil gegenüber den Wärmepumpen ohne PV:

	Luft-Wasser Wärmepumpe	Sonde- Wärmepumpe	Erdkollektor- Wärmepumpe
Gesamtkosten 20 Jahre	27.884 €	31.397 €	28.925 €
Vergleich ohne PV	28.316 €	32.380 €	29.741 €
Kostenvorteil Wärmepumpe + PV	432 €	983 €	815 €
Gesamtkosten 30 Jahre	33.762 €	36.217 €	34.184 €
Vergleich ohne PV	34.837 €	38.066 €	35.798 €
Kostenvorteil Wärmepumpe + PV	1.075 €	1.849 €	1.614 €

Tabelle 33: Gesamtkosten Wärmepumpe + PV

5.2.1.7 Erdgas-Adsorptionswärmepumpe

Investitionskosten

Die Erdgas-Adsorptionswärmepumpe wird mit und ohne Solarthermieanlage verglichen. Bei der Variante mit Solarthermieanlage wird statt des 300l-Warmwasserspeichers ein 1.000l-

¹¹⁵ In der Berechnung wird die Degeneration der Solarzellen auch auf den Eigenverbrauch angerechnet, so dass der Eigenverbrauch jährlich leicht sinkt..

Vergleich der Heizungssysteme

Pufferspeicher eingesetzt. Weiterhin fallen Kosten für die Erschließung der Wärmequelle an. Dazu wird ein kleines Erdkollektor-Feld benötigt, das mit 1.500 EUR in die Kalkulation eingeht.

Position	Erdgas-Adsorptions-WP	Erdgas-Adsorptions-WP+ Solarthermie
Gastherme (Vaillant Vitosorp 200)	5.000 €	5.000 €
Zubehör, Regler, Pumpe	700 €	700 €
Montage / Installation	2.500 €	2.000 €
Schornstein	1.500 €	1.500 €
Gasanschluss	1.569 €	1.569 €
Solarthermieanlage (incl. Installation)	- €	5.000 €
Erschließung Wärmequelle	1.500 €	1.500 €
Pufferspeicher (300 l/ 1.000 l)	1.200 €	2.000 €
Summe Investitionskosten:	13.469 €	19.269 €

Tabelle 34: Investitionskosten Erdgas-Adsorptionswärmepumpe

Aus Tabelle 34 wird ersichtlich, dass die Kosten der Erdgas-Adsorptionswärmepumpe + Solarthermie in etwa doppelt so hoch liegen wie die Investitionskosten für die Gasbrennwert-Heizung.

Laufende Kosten

Als Wartungskosten werden die Kosten für die Brennwert-Heizung übernommen, in der Variante mit Solarthermie werden zudem 50 EUR/Jahr für die Wartung der Solarthermieanlage angesetzt. Die Betriebskosten lauten wie folgt:

fixe Betriebskosten	Erdgas-Adsorptions-WP	Erdgas-Adsorptions-WP+ Solarthermie
Wartung/Reparaturen	200 €	250 €
Schornsteinfeger	50 €	50 €
verbrauchsabhängige Kosten		
Erdgasverbrauch	6.426 kWh	4.065 kWh
Kosten je Einheit	6,30 ct/kWh	6,30 ct/kWh
Kosten Erdgas pro Jahr	405 €	256 €
Hilfsenergieverbrauch	1.035 kWh	1.171 kWh
Kosten je Einheit	0,245 ct/kWh	0,245 ct/kWh
Kosten Hilfsenergie	254 €	287 €
Summe verbrauchsabhängige Kosten	908 €	843 €

Tabelle 35: Laufende Kosten Erdgas-Adsorptionswärmepumpe

Gesamtkosten

Die nachfolgende Gesamtkostenrechnung zeigt, dass die zusätzlichen Investitionskosten gegenüber der konventionellen Erdgas-Brennwertheizung nicht durch Einsparungen in den Betriebskosten ausgeglichen werden:

Vergleich der Heizungssysteme

	Erdgas-Adsorptions-WP	Erdgas-Adsorptions-WP + Solarthermie
Investitionskosten	11.969 €	17.769 €
laufende Kosten 20 Jahre (abgezinst)	16.103 €	14.943 €
laufende Kosten 30 Jahre (abgezinst)	20.098 €	21.368 €
Gesamtkosten 20 Jahre	28.072 €	32.712 €
zum Vergleich: Erdgas	27.234 €	27.234 €
Mehrkosten Adsorptions-WP	2.338 €	6.978 €
Gesamtkosten 30 Jahre	32.067 €	39.137 €
zum Vergleich: Erdgas	34.683 €	34.683 €
Mehrkosten Adsorptions-WP	1.116 €	5.954 €

Tabelle 36: Gesamtkosten Erdgas-Adsorptionswärmepumpe

Die Variante mit Solarthermie liegt deutlich über den Kosten der Brennwertheizung, bei der Erdgas-Adsorptionswärmepumpe sinkt die Differenz nach 30 Jahren auf ca. 1.000 EUR.

5.2.2 Versorgungssicherheit

Neben den rechnerisch ermittelten Gesamtkosten während der definierten Laufzeit spielt die Versorgungssicherheit der eingesetzten Energieträger eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Heizsysteme.

Der nachfolgende Vergleich bezieht sich nur auf die primären Energieträger Erdgas, Strom und Holzpellets, da das Angebot an Solarenergie (sowohl PV als auch Solarthermie) als unendlich betrachtet werden kann.

Um die Versorgungssicherheit in das Gesamtergebnis für den ökonomischen Vergleich aufzunehmen, wird ein Wert für den jeweiligen Energieträger bestimmt. Dieser liegt zwischen 0 (sehr schlechte Versorgungssicherheit) und 10 (sehr gute Versorgungssicherheit). Je Punkt werden vom Ergebnis des Kostenvergleichs 0,5 Punkte vom wirtschaftlichen Gesamtergebnis der betroffenen Heizungsvarianten abgezogen.

Folgende Werte für die Versorgungssicherheit wurden bestimmt:

Energieträger	Erdgas	Strom	Holzpellets
Koeffizient für Versorgungssicherheit	9	10	10
Begründung (Kurzform)	Importabhängigkeit aus totalitären Staaten. Geringe einheimische / europäische Vorräte	Aktueller Kapazitätsüberschuss Europaweiter Netzverbund Staatliche Steuerung von Reservekapazität	Aktueller Kapazitätsüberschuss Möglichkeit des Einsatzes alternativer Einsatzstoffe Import von Pellets

Tabelle 37: Bewertung der Versorgungssicherheit der Energieträger

Für die Erdgasheizungen werden entsprechend 0,5 Punkte vom Ergebnis des wirtschaftlichen Vergleichs abgezogen.

Nachfolgend eine Begründung zur jeweiligen Bewertung der Energieträger:

Erdgas

Derzeit ist die Versorgung mit Erdgas in Deutschland als sehr gut zu betrachten, Versorgungsunterbrechungen traten auch in der Vergangenheit nicht ein. Dennoch ist die langfristige Versorgungssicherheit mit Risiken behaftet.

Tabelle 38 zeigt die Importabhängigkeit Deutschlands und Europas beim Erdgas auf Basis der Daten aus dem Jahr 2013.

Vergleich der Heizungssysteme

	Einheit	Weltweit	Europa	Deutschland
Förderung	Mrd. m ³	3.421	276	11
Reserven	Mrd. m ³	198.051	3.983	104
Ressourcen	Mrd. m ³	638.349	20.510	1.860
Verbrauch	Mrd. m ³	3.434	515	91
Importsaldo	Mrd. m ³		242	79
Anteil Import am Verbrauch			47%	87%
Reichweite Reserven	Jahre	57,7	7,7	1,1
Anteil Verbrauch			15,0%	2,7%
Anteil Reserven			2,0%	0,1%
Anteil Ressourcen			2,2%	0,1%

Tabelle 38: Erdgas - Übersicht Verbrauch und Reserven, Quelle: BGR (2014)

Die Erdgasförderung in Europa hat im Jahr 2004 das Maximum erreicht und ist seitdem rückläufig.¹¹⁶ Rechnerisch hätten die aktuellen Reserven in Europa bei aktuellem Verbrauch ohne Importe eine Reichweite von weniger als 8 Jahren, während sie weltweit auf über 50 Jahre geschätzt werden.¹¹⁷ Die globalen Erdgasreserven liegen zu ca. 80% in Ländern der ehemaligen Sowjetunion sowie der OPEC.¹¹⁸ Eine Übersicht der aktuellen Erdgasreserven ist in Anhang 11: abgebildet. Durch die Abhängigkeit von Erdöl- und Erdgas insbesondere aus Russland, ist Deutschland theoretisch politisch erpressbar. Da es sich bei vielen dieser Länder um autoritäre Staaten handelt, die zudem überwiegend in politisch sensiblen Regionen liegen, ist die Versorgungssicherheit beim Erdgas im Vergleich zu Strom und Pellets etwas schlechter eingestuft worden. Gegen eine stärkere Abwertung sprachen folgende Faktoren:

- Entwicklung eines pipelineunabhängigen Marktes durch verflüssigtes Erdgas (LNG =
- Liquefied Natural Gas), der Deutschland und Europa unabhängiger von Russland macht¹¹⁹
- Erwartung des LNG-Exports der USA
- Einrichtung von Erdgas-Speicherkapazitäten in Deutschland
- Dichtes Pipelinennetz in Europa

¹¹⁶ Vgl. BGR (2014), S. 11

¹¹⁷ Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (nachfolgend kurz: BGR) unterscheidet zwischen Reserven (vorhandene Rohstoffe, die mit heute verfügbaren Methoden wirtschaftlich abbaubar sind) und Ressourcen (nachgewiesene aber mit heutiger Technik nicht wirtschaftlich förderbare Rohstoffe sowie nicht nachgewiesene aber geologisch vermutete, zukünftig gewinnbare Rohstoffe), vgl. BGR (2014), S. 123

¹¹⁸ Vgl. BGR (2014); S. 11, S. 35

¹¹⁹ LNG wird für Transportzwecke auf -162°C abgekühlt und verflüssigt, 1 t LNG enthält ca. 1.400 Nm³ Erdgas, Quelle: BGR (2014), S. 122

Strom (Wärmepumpen)

Für Strom werden aktuell und zukünftig keine Einschränkungen in der Versorgungssicherheit gesehen. Die Netzstabilität in Deutschland ist trotz starken Zubaus fluktuierender EE-Kapazitäten sehr gut, die durchschnittlichen Ausfallzeiten seit dem Jahr 2006 sind in nachfolgender Abbildung 16 erkennbar.

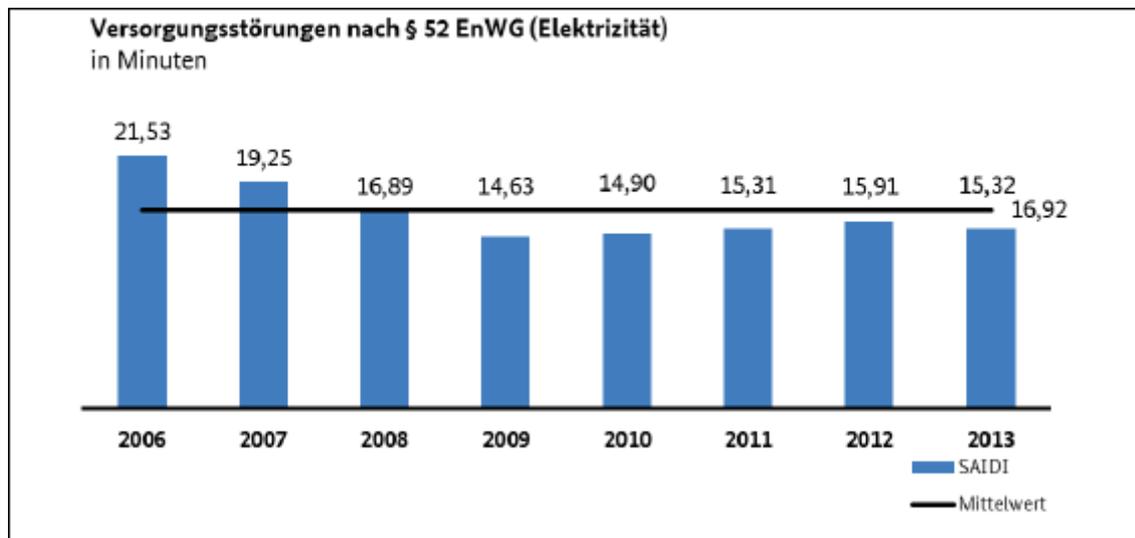


Abbildung 16: Versorgungsstörungen Strom 2006-2013, Quelle: Bundesnetzagentur (2014), S. 56

Demnach liegt die durchschnittliche Nicht-Verfügbarkeit von Mittel- und Niederspannungsnetzen in Deutschland bei jährlich ca. 15 Minuten. Gemäß Monitoringbericht der Bundesnetzagentur nehmen Rückwirkungsstörungen, d.h. Störungen im vor- oder nachgelagerten Netz, tendenziell zu. Ein maßgeblicher Einfluss der Energiewende auf die Versorgungssicherheit ist laut Bundesnetzagentur nicht erkennbar.¹²⁰

Mit dem erwarteten weiteren Zubau fluktuierender EE-Kapazitäten wird die Aufrechterhaltung der Netzstabilität für die Netzbetreiber zunehmend anspruchsvoller. Der Zugriff auf Reservekapazitäten und die kurzfristige Änderung des Kraftwerkseinsatzes (englisch: „Redispatch“) werden voraussichtlich zunehmen. Das Risiko von Versorgungsstörungen wird nach Ansicht des Autors leicht ansteigen, dies wird jedoch keine anhaltenden Versorgungsunterbrechungen zur Folge haben.

Da die betrachteten Wärmepumpen nicht kontinuierlich in Betrieb sind und bei der Dimensionierung eh Abschaltzeiten des Energieversorgers berücksichtigt wurden, würde selbst eine deutliche Zunahme von Versorgungsstörungen die Energiebereitstellung durch Wärmepumpen nicht gefährden. Wärmepumpen können im Gegenteil netzstabilisierend

¹²⁰ Vgl. Bundesnetzagentur (2014)

eingesetzt werden, indem sie in Zeiten von Angebotsüberschüssen betrieben werden und in Zeiten von Nachfrageüberschüssen abgeschaltet werden können.

Weiterhin hätte eine Einschränkung der Versorgungssicherheit nicht nur Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Wärmepumpen, sondern aufgrund des Hilfsenergiebedarfes ebenfalls auf die Funktionsfähigkeit der anderen untersuchten Heizsysteme.

Holzpellets

Für Holzpellets werden ebenfalls weder kurz- noch langfristige Versorgungsschwierigkeiten gesehen. Mit zunehmender Anzahl von Pelletheizungen und damit zunehmendem Bedarf an Pellets wird zwar eine zunehmende Nutzungskonkurrenz bei Holz erwartet. Aus folgenden Gründen werden Pellets dennoch mit der maximalen Punktzahl bewertet:

- Die Kapazitäten der Pelletwerke sind nicht ausgelastet
- Entstehen eines weltweiten Pellethandels mit einer zunehmenden Zahl von Erzeugerländern
- Alternative Rohstoffquellen zu Sägespänen: Kurzumtriebsplantagen, Nutzbarkeit von Restholz und Vollholz

Wenn auch letztgenannte Faktoren einen negativen Einfluss auf die ökologische Betrachtung haben (s. Kapitel 5.3.2.2), stellen sie aus Sicht der Versorgungssicherheit einen positiven Faktor dar.

5.2.3 Ergebnis ökonomischer Vergleich

Die Bewertung der zuvor erstellten Kostenaufstellung wird folgendermaßen vorgenommen:

Für die maximale Punktzahl 10 werden aus der Sensitivitätsanalyse die jeweils geringsten Gesamtkosten zugrunde gelegt, diese liegen in der 20-Jahresbetrachtung bei ca. 25.500 EUR und in der 30-Jahresbetrachtung bei ca. 31.000 EUR. Als Wert für 10 Punkte werden daher 26.000 EUR bei 20 Jahren und 32.000 EUR bei 20 Jahren festgelegt. Als Wert für die minimale Punktzahl werden die Szenarien mit den höchsten Kosten betrachtet (20 Jahre: ca. 41.000 EUR, 30 Jahre: ca. 52.000 EUR). Anschließend werden lineare Abstufungen vorgenommen:

- 20 Jahre: 0,5 Punkte je 800 EUR Mehrkosten
- 30 Jahre: 0,5 Punkte je 1.100 EUR Mehrkosten

Die beiden Teilergebnisse gehen jeweils hälftig in das Gesamtergebnis ein.

Unter Berücksichtigung des Koeffizienten für die Versorgungssicherheit, der in Kapitel 5.2.2 festgelegt wurde, ergeben sich Änderungen für die Varianten mit Erdgas. Wie definiert, werden bei den Erdgasheizungen jeweils 0,5 Punkte vom Ergebnis abgezogen.

Vergleich der Heizungssysteme

Tabelle 39 zeigt das Gesamtergebnis des wirtschaftlichen Vergleichs der unterschiedlichen Heizungssysteme. In der Ergebnisspalte ist das Ergebnis mit und ohne Berücksichtigung der Versorgungssicherheit dargestellt.

Ergebnis-Übersicht	20 Jahre		30 Jahre		Ergebnis	
	Gesamtkosten 20 Jahre	Bewertung	Gesamtkosten 30 Jahre	Bewertung	Vor Abzug	Nach Abzug
Erdgas	27.234 €	9,0	34.683 €	8,5	8,75	8,25
Pellets	35.124 €	4,0	43.504 €	4,5	4,25	
Luft-Wasser-Wärmepumpe	28.316 €	8,5	34.837 €	8,5	8,5	
Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdsonde	32.380 €	6,0	38.066 €	7,0	6,5	
Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdkollektor	29.345 €	7,5	35.232 €	8,5	8	
Erdgas + Solarthermie	30.696 €	7,0	37.136 €	7,5	7,25	6,75
Pellets + Solarthermie	38.228 €	2,0	45.445 €	3,0	2,5	
Luft-Wasser-Wärmepumpe + PV	27.884 €	8,5	33.762 €	9,0	8,75	
Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdsonde + PV	31.397 €	6,5	36.217 €	8,0	7,25	
Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdkollektor + PV	28.925 €	8,0	34.184 €	9,0	8,5	
Erdgas - Adsorptions-WP	31.072 €	6,5	38.019 €	7,0	6,75	6,25
Erdgas + Solarthermie + Adsorptions-Wärmepumpe	32.712 €	5,5	39.159 €	6,5	6	5,5

Tabelle 39: Wirtschaftlicher Vergleich: Gesamtergebnis

Vor der Herunterstufung erreicht die Erdgasheizung gemeinsam mit der Kombination von Luft-Wasser-Wärmepumpe / PV-Anlage das beste Ergebnis und auch nach der Abwertung liegt Erdgas in der Spitzengruppe. Wie aus Tabelle 39 erkennbar ist, liegen die Luft-Wasser-Wärmepumpe und die Kombination Erdkollektor-Wärmepumpe / PV knapp dahinter. In der 20-Jahres-Betrachtung liegt die Erdgasheizung vorne, während die Erdkollektor-Wärmepumpe nach 30 Jahren leichte Kostenvorteile hat.

Die Pellet-Heizung liegt sowohl mit als auch ohne Solarthermie am Ende der Skala, was durch relativ hohe Anschaffungskosten und hohe laufende Kosten verursacht wurde. Insgesamt ist zwischen dem günstigsten und teuersten Heizsystem ein Preisunterschied von ca. 40% in der 20-Jahresberechnung und 35% in der 30-Jahresberechnung festzustellen. Nominal liegen die Ergebnisse in einer Spannbreite von ca. 11.000 EUR. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich um eine Barwert-Berechnung handelt, in der die laufenden Kosten auf den Zeitpunkt der Investition abgezinst wurden. Die kumulierten Kosten während der Laufzeit von

30 Jahren liegen zwischen knapp 44.689 EUR (Erdkollektor-Wärmepumpe) und 60.153 EUR (Pelletheizung).

5.3 Ökologischer Vergleich

5.3.1 Treibhausgase und sonstige Schadstoffe

Die spezifischen Treibhausgas- und sonstigen Schadstoffemissionen der einzelnen Energieträger wurden Studien des Umweltbundesamtes sowie des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien entnommen.¹²¹

Zur Bewertung der Treibhausgasbilanz wurden neben Kohlenstoffdioxid die Treibhausgase Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O, „Lachgas“) mit ihrem jeweiligen Treibhausgasfaktor berücksichtigt. Ergebnis ist das sogenannte „CO₂-Äquivalent“, welches in Tabelle 40 dargestellt ist.

Brennstoff / Energieträger	CO₂ Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Erdgas	248,1	225,8	1,033	0,002
Pellets	32,0	30,5	0,057	0,001
Strom (Mix)	621,0	593,4	0,876	0,030
PV-Strom (Multikristallin)	55,2	51,9	0,135	0,002
Solarthermie (Flachkollektor)	21,8	20,6	0,046	0,001

Tabelle 40: spezifische Treibhausgas-Emissionen der Energieträger, Quelle: UBA (2014-2), S. 39, 81, 100, 108

Die Bewertung der CO₂-Emissionen wurde wie folgt vorgenommen. Der Maximalwert von 10 wurde für einen CO₂-Ausstoß von maximal 500 kg vergeben, dies wurde vom Autor als vertretbarer und kaum vermeidbarer Wert eingeschätzt. Je 150 kg zusätzlicher Emission erfolgte eine Herabstufung um 0,5 Punkte, so dass ein CO₂-Ausstoß ab 3.500 kg mit 0 Punkten bewertet wurde.

¹²¹ Vgl. UBA (2014-2), IINAS (2013)

Nachfolgend die Darstellung der spezifischen Emissionen weiterer Schadstoffe:

Brennstoff / Energieträger	SO ₂ - Äquivalent	SO ₂	NO _x	Feinstaub	CO	NMVOC
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Erdgas	0,134	0,011	0,176	0,006	0,136	0,052
Biogas (Mais)	0,445	0,14	0,437	0,023	0,3	0,038
Pellets	0,382	0,116	0,383	0,118	0,711	0,029
Strom (Mix)	0,814	0,368	0,640	0,040	0,293	0,031
PV-Strom (Multikristallin)	0,118	0,06	0,077	0,032	1,221	0,005
Solarthermie (Flachkollektor)	0,063	0,035	0,041	0,016	0,121	0,004

Tabelle 41: sonstige spezifische Schadstoffemissionen der Energieträger, Quelle: UBA (2014-2), S. 39, 81, 100, 108

Die ermittelten Ergebnisse spiegeln eine Gesamtbetrachtung incl. der Emissionen in den vorhergehenden Wertschöpfungsstufen wider. Im Fall der Emissionen von PV-Strom und Solarthermie handelt es sich um die Ergebnisse von Lebenszyklusanalysen. Diese basieren auf einem Muster-Standort und auf Basis durchschnittlicher Emissionen der Vorstufen. Die Emissionen des PV-Moduls hängen gemäß dieser Betrachtung von den verwendeten Energieträgern in der Herstellung ab.¹²² Beispielsweise werden die hohen Schadstoffemissionen kristalliner PV-Module u.a. dadurch verursacht, dass die Module zu einem großen Teil in China gefertigt, wo Kohlestrom einen großen Anteil an der Stromerzeugung hat.

Die Bewertung der sonstigen Schadstoffe erfolgte auf Basis des gewichteten Durchschnitts der Emissionen der unterschiedlichen Stoffe. Entsprechend des jeweiligen Energiebedarfes und der daraus reduzierenden CO₂- bzw. Schadstoffmengen wurden die Heizsysteme wie folgt bewertet:

¹²² Vgl. UBA (2014-2), S. 38

	CO ₂ -Äquivalent [kg]		sonstige Schadstoffe				
	[kg]	Bewertung	SO ₂ -Äq. [g]	Feinstaub [g]	CO [g]	NM VOC [g]	Bewertung
Erdgas	2.524	3	1.818	85	1.339	435	6
Pellets	906	8,5	4.122	1.059	6.434	282	2
Luft-WP	2.069	4,5	2.711	133	976	103	7
Sonde-WP	1.660	6	2.176	107	783	83	9
Erdkoll.-WP	1.825	5,5	2.392	118	861	91	8,5
Erdgas + Sol-Therm	1.834	5,5	1.678	122	1.314	275	7
Pellets + Sol-Therm	926	8,5	3.025	686	4.267	193	4
Luft-WP + PV	1.535	6,5	2.059	128	1.946	78	7
Sonde-WP + PV	1.199	7,5	1.612	103	1.632	61	9
Erdkoll.-WP + PV	1.340	7	1.799	113	1.750	68	8,5
Adsorp.-WP	2.236	4	1.704	80	1.177	366	8
Adsorp-WP + Sol-Therm	1.807	5,5	1.705	124	1.295	261	7

Tabelle 42: Bewertung CO₂-Emissionen und sonstige Schadstoffe, Quelle: Eigene Berechnungen

Die Pelletheizungen weisen die niedrigsten CO₂-Emissionen im Vergleich auf, gefolgt von den Kombinationen aus Wärmepumpen und PV. Die Wärmepumpen ohne PV verursachen in etwa den gleichen Treibhausgasausstoß wie die Kombinationen aus Erdgas und Solarthermie. Den höchsten Treibhausgasausstoß weist die Erdgas-Heizung auf.

Bei den sonstigen Schadstoffen liegt die Sonde-Wärmepumpe sowohl mit als auch ohne PV an der Spitze, da diese den geringsten Energieverbrauch hat und die Stromerzeugung eine relativ geringe Belastung sonstiger Schadstoffe verursacht. Die Erdgasheizung liegt im Mittelfeld, während die Pelletheizung mit Abstand den höchsten Schadstoffausstoß verursacht.

5.3.2 Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung

Die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung wird für die drei genutzten Hauptenergieträger Erdgas, Pellets und Strom (Mix) untersucht. Für die Bewertung des Strom-Mix werden die zur Stromerzeugung genutzten Energieträger betrachtet.

Solarthermie und PV als Energieträger einiger Kombinationen von Heizungen wurden pauschal mit der maximalen Punktzahl von 10 bewertet, da die Energiegewinnung ohne Umweltauswirkungen verläuft. Die während des Lebenszyklus der Anlagen auftretenden Umweltbelastungen werden bereits im vorherigen Abschnitt erfasst.

5.3.2.1 Erdgas

Die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung wird als relativ kritisch eingestuft. Während die konventionelle Erdgasförderung mit relativ wenigen negativen Umweltauswirkungen verbunden ist, nimmt die Umweltbelastung der Erdgasförderung bei neu erschlossenen Gasfeldern zu.

Einfache Lagerstätten, aus denen sich das Erdgas ohne gravierende Umweltschäden fördern lässt, gehen tendenziell zu Neige und werden zunehmend durch unkonventionelle Fördermethoden ersetzt. Beim sogenannten Fracking¹²³ wird mit Chemikalien angereichertes Wasser unter hohem Druck in den Boden gepresst, um Risse zu bilden, mit denen sich Erdgas leichter gewinnen lässt. Zu möglichen Umweltauswirkungen durch Fracking gibt es zahlreiche Studien mit widersprüchlichen Ergebnissen. Als mögliche Auswirkungen werden u.a. die Gefährdung des Grundwassers durch die eingesetzten Chemikalien, Bodenversiegelung, Luftverschmutzung durch aufwendigen Abbau und Erdbebengefahr genannt. Das Umweltbundesamt kommt in einer Studie zu dem Ergebnis, dass zu diesen Themen weitere Untersuchungen notwendig sind und empfiehlt ein genaues behördliches Monitoring für jedes Fracking-Vorhaben.¹²⁴

Neben dem Fracking wird zunehmend in ökologisch sensiblen Gebieten wie z.B. in Regenwäldern und der Arktis nach Erdgas gesucht. Ein weiteres Problem der Erdgasförderung ist die Freisetzung radioaktiver Substanzen, deren Entsorgung laut Recherchen des WDR nicht ausreichend kontrolliert werde.¹²⁵

In der Gesamtbetrachtung wird Erdgas in der Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung mit 6 Punkten eingestuft.

5.3.2.2 Pellets

Die Einschätzung der Nachhaltigkeit der Pelletproduktion ist umstritten. Idealerweise werden Pellets aus Sägeresten und Rinden hergestellt, was eine sehr gute Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung bedeuten würde. In der Praxis führt die stark angestiegene Zahl von Pelletheizungen dazu, dass zunehmend weniger nachhaltige Einsatzstoffe verwendet werden. Die Nutzung von Totholz führe zu einer Verringerung der Artenvielfalt. Weiterhin wird vermehrt Vollholz zur Pelletherstellung genutzt, was zu erhöhtem Holzeinschlag führt. Daneben steigt der Import von Holzpellets u.a. aus Afrika an, wo Pellets in sogenannten Kurzumtriebsplantagen angebaut werden. Grundsätzlich besteht dabei der Verdacht, dass

¹²³ Abkürzung für „Hydraulic Fracturing“, zu Deutsch: hydraulische Rissbildung

¹²⁴ Vgl. UBA (2014-2)

¹²⁵ Vgl. WDR

dafür Primärwälder abgeholzt werden bzw. Anbauflächen für Lebensmittel verdrängt werden.¹²⁶ Die kritischen Punkte führen dazu, dass die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung von Pellets mit 8 von 10 möglichen Punkten bewertet wurde.

5.3.2.3 Strom (Mix)

Beim Strom wird die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung differenziert, also entsprechend dem Anteil des jeweiligen Energieträgers an der Stromerzeugung, betrachtet. Als Maßstab für die Bewertung von Strom wird der Strommix aus dem Jahr 2014 in Deutschland genutzt, welcher in Tabelle 43 dargestellt ist:

Energieträger	Erzeugung [GWh]	Anteil
Erneuerbare Energien	160,6	26,2%
Braunkohle	155,8	25,4%
Steinkohle	109,0	17,8%
Kernenergie	97,1	15,8%
Erdgas	58,3	9,5%
Sonstige	33,2	5,4%
Gesamt:	614,0	100,0%

Tabelle 43: Deutscher Strommix 2014, Quelle: AGEB (2015)

Nachfolgend werden die zur Stromerzeugung genutzten Energieträger kurz im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung untersucht.

Erneuerbare Energien

Die Stromerzeugung aus EE ist aufgeteilt in folgende Anteile:

Energieträger	Erzeugung [GWh]	Anteil	Bewertung	Gewichtung
Wind	56	35%	10	3,5
Wasser	20,5	13%	10	1,3
Biomasse	43	27%	7	1,9
PV	34,9	22%	10	2,2
Hausmüll	6,1	4%	10	0,4
Summe:	160,5		Ergebnis:	9

Tabelle 44: Erzeugung EE-Strom (Quelle: AGEB 2015), Bewertung der Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung.

Mit Ausnahme von Biomasse wird die Nachhaltigkeit der Energiegewinnung der EE als vorbildlich eingestuft. Bei der Biomasse wird der große Flächenverbrauch, die Tendenz zu Monokulturen durch die dominierende Nutzung von Mais sowie die intensive Bewirtschaftung kritisch betrachtet. In der Gesamtbetrachtung ergibt sich für EE-Strom eine Bewertung von 9.

¹²⁶ Vgl. u.a. Prowildlife, Spiegel-Online (2009). Weitere Informationen liefert das Buch: „Holzrausch: Der Bioenergieboom und seine Folgen“ von Peter Wohlleben (ISBN-10: 3940461032)

Braunkohle

In Deutschland wird Braunkohle in drei Abbaugebieten gefördert: Lausitz, Mitteldeutsches Revier (Leipzig), Rheinisches Revier (zwischen Köln und Aachen). Braunkohle beansprucht sehr große Flächen, ihre Nutzung bedeutet eine Zerstörung der kompletten Natur- und Kulturlandschaften und einen dauerhaften Eingriff in den Grundwasserhaushalt. Die Gebiete werden zwar nach Abschluss der Nutzung rekultiviert und zum Teil als Naherholungsgebiete genutzt, dennoch ist der Eingriff in die Landschaft als sehr groß zu bezeichnen. Im Ergebnis wird Braunkohle mit 3 Punkten bewertet.

Steinkohle

Im Jahr 2014 wurden etwa 2/3 des deutschen Steinkohleverbrauchs von ca. 56,2 Mio. t zur Stromerzeugung genutzt. Die Importquote lag bei ca. 86%. Hauptimportländer waren Russland, USA, Kolumbien, Australien, Polen und Südafrika mit zusammen über 90% der Gesamtmenge.¹²⁷ Insbesondere in Kolumbien berichten Nichtregierungsorganisationen von negativen Auswirkungen des Kohleabbaus, diese seien u.a.: Zerstörung der Landschaft, Entzug der Lebensgrundlage durch Enteignung fruchtbaren Bodens für den Tagebau ohne angemessene Entschädigung, Lärm- und Staubbelastung der Bevölkerung, Verletzung von Arbeitnehmerrechten. Umweltprobleme, insbesondere eine hohe Staubbelastung durch den Tagebau, treten auch in Südafrika und Russland auf.

Die Förderung inländischer Kohle verursacht relativ geringe direkte Umweltschäden. Problematisch sind die Langzeitwirkungen durch die Gefahr von Senkungen, Kontamination des Grundwassers durch Grubenwasser und Grubengasexplosionen. Aus diesem Grund muss dauerhaft ein hoher Aufwand betrieben werden, um Schäden zu verhindern bzw. zu beheben.¹²⁸

Im Vergleich zur Braunkohle sind die Eingriffe in die Landschaften und in die Ökosysteme etwas geringer, allgemein wird die Nachhaltigkeit der Steinkohlegewinnung als mittelmäßig beurteilt und mit 5 Punkten bewertet.

Kernenergie

Brennstoff für die Kernenergie ist das chemische Element Uran. Bereits bei der Urangewinnung bestehen erhebliche Gesundheitsgefahren durch die Radioaktivität, welche durch Staub und Wasser die ansässige Bevölkerung belasten.¹²⁹ Daneben bestehen beim Transport, Verarbeitung und Nutzung des Urans als Kernbrennstoff unkalkulierbare und

¹²⁷

¹²⁸ Vgl. Spektrum

¹²⁹ Vgl. u.a. (Spiegel – Online 2010)

unkontrollierbare Risiken, wie aus den Nuklearkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima erkennbar wurde. Hinzu kommt die dauerhafte Gefährdung durch nukleare Abfälle, welche aufgrund der langen Halbwertszeit der Strahlung über viele Tausend Jahre gelagert werden müssen. Im Gesamtergebnis erhält die Kernenergie daher die minimale Punktzahl 0.

Erdgas

Erdgas wird mit 6 Punkten bewertet, zur Begründung wird auf Kapitel 5.3.2.1 verwiesen.

Sonstige

Mangels verfügbarer Informationen zur Herkunft der Energieträger wird von einer durchschnittlichen Nachhaltigkeit ausgegangen, die Bewertung erfolgt mit 6 Punkten.

Gesamtbewertung Strom-Mix

Die Gesamtbewertung der Nachhaltigkeit der Stromerzeugung ist in folgender Tabelle 45 zusammengefasst:

Energieträger	Erzeugung [GWh]	Anteil	Bewertung	Ergebnis
Erneuerbare Energien	160,6	26,2%	9	2,4
Braunkohle	155,8	25,4%	3	0,8
Steinkohle	109,0	17,8%	5	0,9
Kernenergie	97,1	15,8%	0	0,0
Erdgas	58,3	9,5%	6	0,6
sonstige	33,2	5,4%	6	0,3
Produktion:	614,0		Gesamtergebnis:	5

Tabelle 45: Nachhaltigkeit der Rohstoffherzeugung; Gesamtergebnis Strom

5.3.2.4 Ergebnis der Nachhaltigkeitsbetrachtung

Nachfolgend das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbetrachtung für die untersuchten Energieträger:

Energieträger	Bewertung
Erdgas	6
Pellets	8
Strom	5
PV-Strom	10
Solarthermie	10

Tabelle 46: Ergebnis Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung

Bei den Kombinationen von Energieträgern wurde die anteilige Energiebereitstellung der jeweiligen Energieträger gewichtet.

5.3.3 Ergebnis ökologischer Vergleich

Entsprechend den Ergebnissen aus den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 wurden die jeweiligen Heizungssysteme bzw. Kombinationen bewertet.

Nachfolgende Tabelle 47 zeigt das Gesamtergebnis des ökologischen Vergleichs:

Kriterium	CO ₂ -Ausstoß	Ausstoß sonstiger Schadstoffe	Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung	Gesamtergebnis gewichtet
Gewichtung	50%	20%	30%	
Heizsystem	Bewertung	Bewertung	Bewertung	
Erdgas	3	6	6	4,5
Pellets	8,5	2	8	7,05
Luft-Wärmepumpe	4,5	7	5	5,15
Sonde-Wärmepumpe	6	9	5	6,3
Erdkollektor-WP	5,5	8,5	5	5,95
Erdgas-Solarthermie	5,5	7	8	6,55
Pellets-Solarthermie	8,5	4	9	7,75
Luft-WP + PV	6,5	7	7	6,75
Erdsonde-WP + PV	7,5	9	8	7,95
Erdkollektor-WP + PV	7	8,5	7,5	7,45
Erdgas-Adsorptions-WP	4	8	7	5,7
Erdgas-Adsorp.-WP Solarthermie	5,5	7	8	6,55

Tabelle 47: Ökologische Bewertung – Gesamtergebnis

Demnach ist die Kombination aus Sonde-Wärmepumpe und PV aus ökologischer Sicht das Verträglichste unter den betrachteten Heizsystemen. Dicht dahinter folgt die Kombination aus Pelletheizung und Solarthermie-Anlage vor der Erdkollektor-Wärmepumpe in Kombination mit PV. An vierter Stelle liegt die Pelletheizung, bei der die hohe Belastung sonstiger Schadstoffe ein besseres Ergebnis verhinderte. Im Mittelfeld liegen die sonstigen Wärmepumpen, bei denen die hohen Treibhausgasemissionen sowie die relativ schlecht bewertete Nachhaltigkeit der Rohstoffgewinnung zur Abwertung führten. Ebenfalls im Mittelfeld liegen die Kombinationen mit Erdgas, welches als Einzelsystem aufgrund des hohen CO₂-Ausstoßes an letzter Stelle liegt.

5.4 Gesamtergebnis

Das Gesamtergebnis des Heizungsvergleichs ist in Tabelle 48 abgebildet und setzt sich jeweils hälftig aus dem Ergebnis des ökonomischen und des ökologischen Vergleichs zusammen. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass einige regenerative Heizsysteme gegenüber

Vergleich der Heizungssysteme

dem fossilen Energieträger Erdgas ein deutlich besseres Ergebnis erzielen, da sie im ökonomischen Vergleich etwa gleichauf liegen und im ökologischen Vergleich deutlich besser abschneiden.

Heizsystem	Ökologischer Vergleich	Ökonomischer Vergleich	Gesamt-Ergebnis	Platz
Erdgas-Brennwert	4,5	8,25	12,75	8
Holzpellets	7,05	4,25	11,3	10
Wärmepumpe (Luft-Wasser)	5,15	8,5	13,65	5
Wärmepumpe (Sonde)	6,3	6,5	12,8	7
Wärmepumpe (Erdkollektor)	5,95	7,75	13,7	4
Erdgas-Solarthermie	6,55	6,75	13,3	6
Pellets-Solarthermie	7,75	2,5	10,25	12
Luft-WP + PV	6,75	8,75	15,5	2
Sonde-WP + PV	7,95	7,25	15,2	3
Erdkollektor-WP + PV	7,45	8,5	15,95	1
Erdgas-Absorptions-WP	5,7	7	12,7	9
Erdgas-Adsorp.-WP Sol-therm.	6,55	4,75	11,3	10

Tabelle 48: Gesamtergebnis Heizungsvergleich

Abbildung 17 stellt das Gesamtergebnis grafisch dar und verdeutlicht die Aufteilung der Bewertung in den beiden Kategorien:

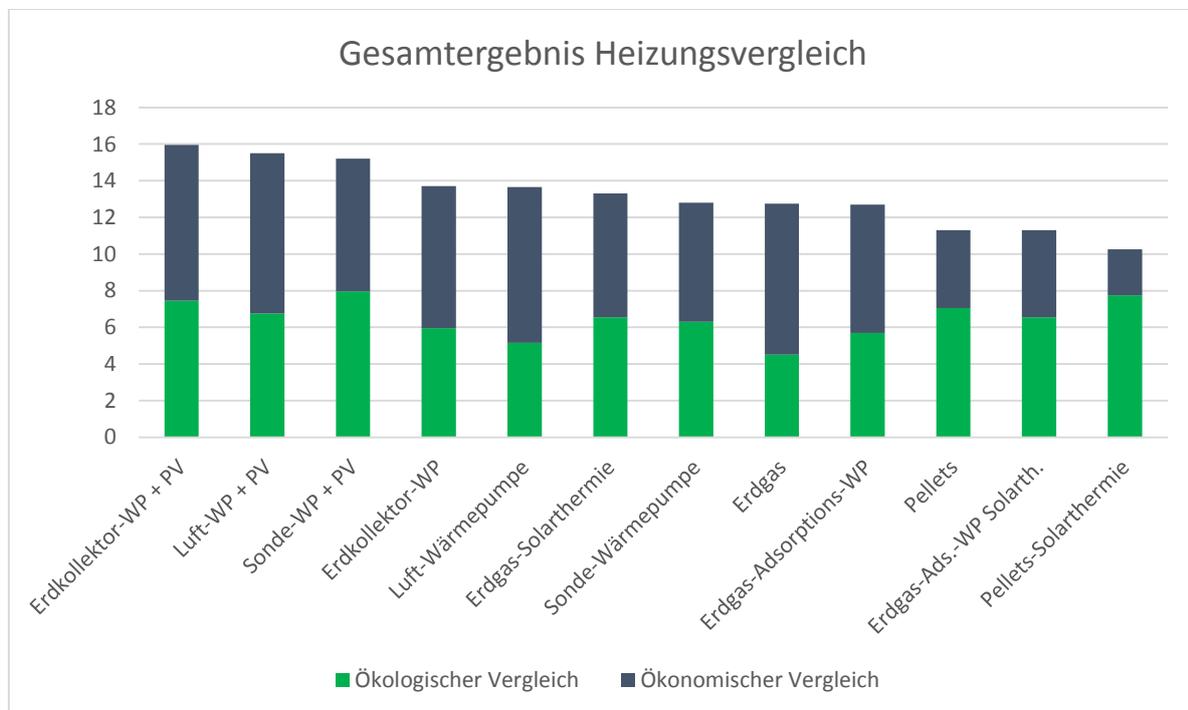


Abbildung 17: Gesamtergebnis Heizungsvergleich - grafische Darstellung

Die Kombinationen aus Wärmepumpen und PV erreichen in der Summe beider Kategorien die höchsten Punktzahlen und gehen als Gewinner des Heizungsvergleichs hervor. Dabei liegt die

Erdkollektor-Wärmepumpe knapp vor der Luftwärmepumpe und diese wiederum knapp vor der Erdsonden-Wärmepumpe. Durch den hohen Anteil regenerativer Energien erreichen diese Heizungskombinationen eine gute ökologische Bewertung, zudem erreichen sie aufgrund des günstigen Strombezugs aus dem PV-Eigenverbrauch im ökonomischen Vergleich ebenfalls ein gutes Ergebnis. Die Wärmepumpen ohne PV liegen insbesondere aufgrund einer niedrigen Bewertung im ökologischen Vergleich deutlich dahinter im Mittelfeld. Unter den Wärmepumpen liegt die Erdsonde trotz besserer ökologischer Bewertung hinter den beiden anderen Varianten. Grund dafür sind die hohen Investitionskosten.

Während Erdgas im ökonomischen Vergleich mit vorne liegt, führt eine schlechte ökologische Bewertung insgesamt zu einer mittleren Platzierung. Die Kombination von Erdgas und Solarthermie liegt knapp vor der Erdgasheizung. Bei dieser Heizungskombination werden höhere Kosten durch eine deutlich bessere Bewertung im ökologischen mehr als ausgeglichen. Die Erdgas-Adsorptionswärmepumpe liegt gleichauf mit Erdgas, hier wird eine schlechtere ökonomische Bewertung durch bessere Umweltverträglichkeit kompensiert.

Die Kombination der Adsorptionswärmepumpe mit Solarthermie liegt aufgrund höherer Gesamtkosten mit etwas Abstand hinter den anderen Erdgasheizungen gleichauf mit der Pelletheizung. Diese erreicht zwar ein recht gutes Ergebnis im ökologischen Vergleich, fällt aber aufgrund einer niedrigen Bewertung im ökonomischen Vergleich zurück. Die Pelletheizungen sind sowohl bei der Investition als auch im Betrieb teurer als die Erdgasheizungen. An letzter Stelle liegt trotz einer führenden Position im ökologischen Vergleich die Variante Pelletheizung mit Solarthermie. Diese Kombination weist die mit Abstand höchsten Kosten auf und erreicht daher das schlechteste Ergebnis im ökonomischen Vergleich.

5.5 Sensitivitätsanalysen

Da diese Arbeit über das konkrete Beispiel aus Kapitel 3 hinaus allgemeine Aussagen zur Vorteilhaftigkeit der untersuchten Heizsysteme treffen soll, werden im Folgenden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dabei werden ausgehend vom Basisszenario jeweils einzelne Parameter geändert.

5.5.1 Untersuchte Szenarien

Insgesamt wurden folgende 10 Szenarien untersucht:

- Änderung der Hausgröße:
 - Kleines Haus (9x10 m, 90 m² Grundfläche)
 - Großes Haus (13x11 m, 143 m² Grundfläche)
- Änderung der Dämmung
 - EnEV 2009
 - Passivhausstandard (15 kWh/m² Heizenergiebedarf)
- Ökologische Energieträger
 - Biogas
 - Ökostrom
- Unterschiedliche Preisentwicklung Energieträger
 - Allgemeine Teuerung 4% p.a.
 - Preisanstieg Strompreise 4% p.a.
 - Preisanstieg Gaspreise 4% p.a.
 - Preisanstieg Pellets 4% p.a.

Da die detaillierte Aufbereitung aller Szenarien den Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte, werden vereinfachend folgende Annahmen getroffen:

- Die Größe der Heizung und die Investitionskosten für die Heizsysteme werden beibehalten. Da die Produktserien der Hersteller Abstufungen von mehreren kW aufweisen und die Recherche nur geringfügige Kostenunterschiede zu der nächstgrößeren oder kleineren Heizung ergab, hat diese Vereinfachung nach Ansicht des Verfassers keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Aussagekraft der Ergebnisse.
- Energiepreise werden auf Basis des Verbrauchs des Ausgangsszenarios beibehalten. Eine Anpassung des Preisniveaus an die jeweiligen Verbrauchsmengen hätte geringfügige Änderungen zur Folge, die jedoch bei allen Energieträgern dieselbe Tendenz hätten.

Die PV-Eigenverbrauchsrechnung wird an die jeweilige Strombedarfsmenge angepasst.

5.5.2 Ergebnisse

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 49 dargestellt:

Heizsystem	Ausgang	Klein	Groß	EnEV	Passiv	Bio-gas	Öko-strom	Infl. Allg.	Infl. Gas	Infl. Strom	Infl. Pell.
Erdgas	12,75	14,35	9,65	9,15	13,85	13,4	13	10	11,25	12,25	12,75
Pellets	11,3	13,15	9,2	8,7	12,4	11,3	11,3	8,55	11,3	10,55	9,55
Luft-WP	13,65	15,5	11,05	10,05	15,25	13,65	16,7	11,15	13,65	11,4	13,65
Sonde-WP	12,8	14,15	10,7	10,2	13,65	12,8	15,1	10,3	12,8	11,05	12,8
Erdkoll.-WP	13,7	15,05	11,35	10,85	14,8	13,7	16,25	11,2	13,7	11,95	13,7
Erdgas-Solarth.	13,3	14,9	10,7	9,95	14,65	13,75	13,55	10,8	12,3	12,55	13,3
Pellets-Solarth.	10,25	12,1	8,9	8,4	11,85	10,25	11	8,75	10,25	10,25	9,75
Luft-WP + PV	15,5	17,1	13,15	11,9	17,1	15,5	16,6	13,5	15,5	14	15,5
Sole-WP + PV	15,2	16,55	13,1	12,85	16,05	15,2	15,5	13,2	15,2	13,95	15,2
Erdk.-WP + PV	15,95	17,3	13,85	13,1	16,8	15,95	16,65	13,95	15,95	14,7	15,95
Erdgas Ads.-WP	12,7	14,55	10,6	10,1	14,3	13	13,45	10,2	11,45	12,2	12,7
Erdg-Adsorp WP-Sol	11,3	13,15	8,95	7,45	12,65	12	11,8	9,05	10,55	10,55	11,3

Tabelle 49: Übersicht Ergebnisse Sensitivitätsanalysen

Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Kombinationen aus Wärmepumpe und PV bei fast allen Szenarien die höchste Punktzahl aufweisen. Einzig bei dem Szenario „Ökostrom“ liegt die Luftwärmepumpe ohne PV minimal vorne.

Die Varianten „Biomethan“ und „Ökostrom“ werden nachfolgend detaillierter vorgestellt, die weiteren Szenarien kurz zusammengefasst. Eine Übersicht der Gesamtkosten und der Bewertungen aller Szenarien ist in Anhang 12: hinterlegt.

Biomethan

Bei dieser Variante wurde untersucht, welche Auswirkung die Verwendung von Bio-Erdgas statt konventionellen Erdgases hat. Dazu wurden für die ökologische Bewertung die Emissionsfaktoren für Bio-Erdgas untersucht. Da Biogas unterschiedliche Entstehungsquellen (nachwachsende Rohstoffe, Gülle, Reststoffe) hat, wurde der durchschnittliche Biogas-Mix,

Vergleich der Heizungssysteme

welcher zu 80% aus nachwachsenden Rohstoffen (insbesondere Mais)¹³⁰ zugrunde gelegt wurde. Nachfolgende Tabelle zeigt den Vergleich der Emissionen:

Brennstoff / Energieträger	CO ₂ Äquivalent	SO ₂ -Äquivalent	Feinstaub	CO	NMVOG
	[g/kWh]				
Bio-Methan	109	0,445	0,023	0,3	0,038
Erdgas	248	0,134	0,006	0,136	0,052

Tabelle 50: Vergleich Emissionen Erdgas / Biomethan, Quelle: UBA (2014-2)

Während der Ausstoß von CO₂ beim Bio-Methan weniger als die Hälfte von Erdgas beträgt, liegen die anderen Schadstoffemissionen deutlich darüber. Aufgrund der starken Gewichtung von CO₂ führt Bio-Methan zu einer deutlich besseren Bewertung als Erdgas.

Auf der Kostenseite wurden Bio-Erdgas-Tarife untersucht. Dabei wurden nur echte Biogas-Tarife mit 100% Biogas-Einspeisung beachtet. Sogenannte „Öko-Gas“-Tarife, bei denen konventionelles Erdgas geliefert wird, der Anbieter aber eine entsprechende Menge an Emissionszertifikaten erwirbt, wurden nicht betrachtet. Im Ergebnis wurde der Tarif „pro Windgas“ von Greenpeace Energy gewählt, der bei der benötigten Gasmenge von ca. 7.800 kWh mit 8,17 ct/kWh ca. 30% über dem zuvor gewählten Tarif liegt.¹³¹

Das Ergebnis in Tabelle 51 zeigt, dass die ökologischen Vorteile durch die höheren Kosten im Gesamtergebnis ausgeglichen werden und das Gesamtergebnis nur marginal vom Ausgangsszenario abweicht. Die Unterschiede fallen im Wesentlichen auf den Wegfall der Abwertung aufgrund der Versorgungssicherheit zurück.

	Ökologischer Vergleich		Wirtschaftlicher Vergleich		Gesamt		Vergleich
	Ausgang	Biogas	Ausgang	Biogas	Ausgang	Biogas	Vergleich
Erdgas	4,5	6,15	8,25	7,25	12,75	13,4	+ 0,65
Erdgas + Solarthermie	6,55	7,5	6,75	6,25	13,3	13,75	+ 0,45
Erdgas- Adsorptions-WP	5,7	6,75	7	6,25	12,7	13	+ 0,3
Erdgas-Adsorp.-WP Solarthermie	6,55	7,5	4,75	4,5	11,3	12	+ 0,2

Tabelle 51: Vergleich Szenario "Biogas" - Ausgangsszenario

¹³⁰ Vgl. UBA (2014-2), S. 60

¹³¹ Greenpeace-Tarif: 9,90 EUR/Monat Grundpreis, 6,65 ct/kWh Arbeitspreis. Quelle: <http://www.greenpeace-energy.de/windgas/der-gastarif.html>, Abruf vom 31.03.2015

Ökostrom

Für das Szenario Ökostrom wurden anstelle konventionellen Stroms „echte“ Ökostromtarif gewählt. Die Anbieter garantieren, dass sie tatsächlich den EE-Ausbau fördern.

Die Stromkosten liegen mit 28 ct/kWh beim Anbieter Naturstrom um ca. 14% über dem konventionellen Strompreis. Für Wärmepumpenstrom wird ein Tarif von Lichtblick gewählt, der bei 2.400 kWh Verbrauch bei ca. 24 ct/kWh und damit 10% über dem Stromtarif ¹³²

Im Ergebnis verbessern sich die Wärmepumpen ohne PV am stärksten, da die ökologische Bewertung deutlich ansteigt und die ökonomische Bewertung nur moderat sinkt.

	Ökologischer Vergleich		Wirtschaftlicher Vergleich		Gesamt		Vergleich
	Ausgang	Ökostrom	Ausgang	Ökostrom	Ausgang	Ökostrom	
Erdgas	4,5	5,25	8,25	7,75	12,75	13	0,25
Pellets	7,05	7,8	4,25	3,5	11,3	11,3	0
Luft-WP	5,15	9,2	8,5	7,5	13,65	16,7	3,05
Sonde-WP	6,3	9,6	6,5	5,5	12,8	15,1	2,3
Erdkollektor-WP	5,95	9,5	7,75	6,75	13,7	16,25	2,55
Erdgas-Solarthermie	6,55	7,3	6,75	6,25	13,3	13,55	0,25
Pellets-Solarthermie	7,75	8,5	2,5	2,5	10,25	11	0,75
Luft-WP + PV	6,75	9,35	8,75	7,25	15,5	16,6	1,1
Sole-WP + PV	7,95	9,75	7,25	5,75	15,2	15,5	0,3
Erdkollektor-WP + PV	7,45	9,65	8,5	7	15,95	16,65	0,7
Erdgas-Ads.-WP	5,7	6,7	7	6,75	12,7	13,45	0,75
Erdgas-Adsorp.-WP Sol-Therm	6,55	7,55	4,75	4,25	11,3	11,8	0,5

Tabelle 52: Szenario - Ökostrom

¹³² Die Stromtarife lauten wie folgt: Haushaltsstrom: naturstrom: 7,95 EUR/Monat Grundpreis + 26,25 ct/kWh Arbeitspreis <https://www.naturstrom.de/privatkunden/strom/naturstrom/>; Wärmepumpe: Lichtblick Wärmepumpe mit Eintarifzähler: 8,95 EUR/Monat Grundpreis + 19,49 ct/kWh Arbeitspreis <http://www.lichtblick.de/privatkunden/strom/heizen/>, Abruf vom 31.03.2015

Szenarien Hausgröße / Dämmung

In der nachfolgenden Abbildung 18 sind die Änderungen der vier Szenarien „Klein“, „Groß“, „Passivhaus“ und „EnEV“ gegenüber dem Ausgangsszenario dargestellt.

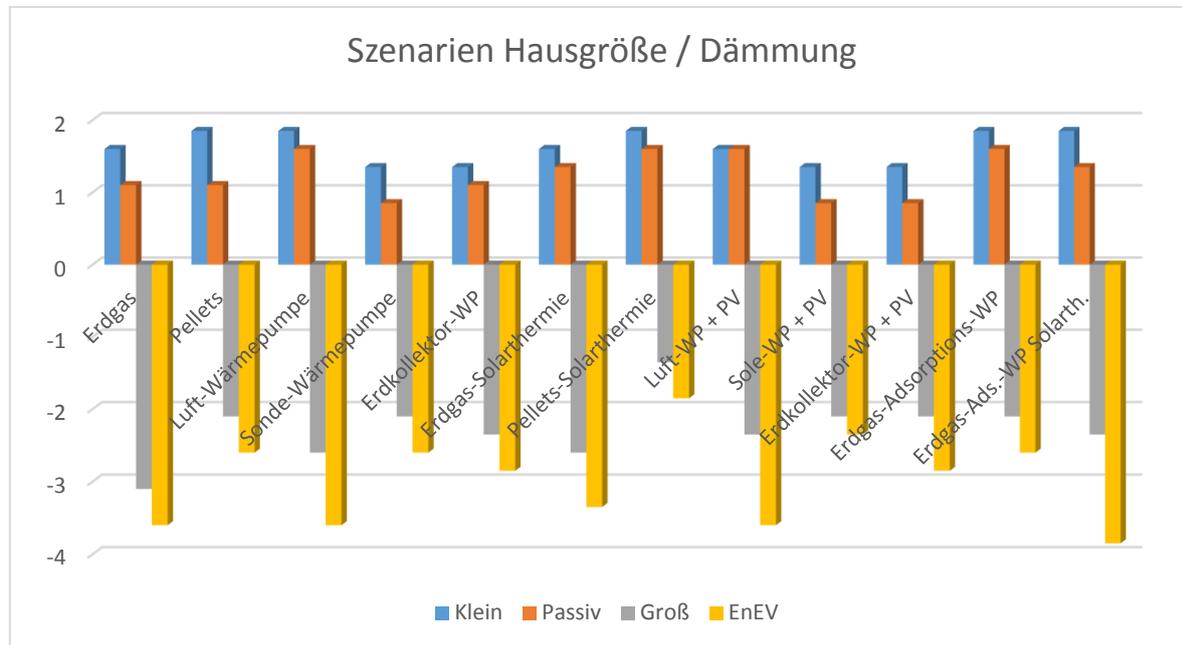


Abbildung 18: Szenarien Hausgröße / Dämmung

Das Ergebnis in zeigt, dass die Ergebnisse im Szenario „Klein“ bei allen Heizungsvarianten besser sind als im Szenario „Passiv“. Sofern ein Bauherr vor der Wahl steht, entweder kleiner zu bauen oder besser zu dämmen, zeigt bereits der Heizungsvergleich, dass eine kleinere Bauweise zu bevorzugen ist.

Der abgezinste wirtschaftliche Vorteil eines Passivhauses im liegt Gesamtkostenvergleich je nach Heizungssystem zwischen 1.500 EUR und 2.500 EUR. Die erwarteten Mehrkosten des Passivhauses werden durch Energieeinsparungen nicht kompensiert. Es müsste detailliert geprüft werden, ob zur Deckung des geringen Verbrauchs ggf. ein anderes Heizkonzept in Frage kommt. Zu berücksichtigen wären zudem erhöhte Förderungen durch die KfW (vgl. Kapitel 2.2.3) sowie ggf. landes- oder regionsspezifische Förderungen. Zum Fertigstellungszeitpunkt dieser Arbeit existieren weder für das Land Niedersachsen noch für den Landkreis Harburg oder die Stadt Buchholz entsprechende Förderprogramme.

Im Vergleich zwischen den Szenarien „Groß“ und „EnEV“ liegt die Variante „Groß“ sowohl im ökologischen wie im ökonomischen Vergleich leicht vorne. Mit der relativ guten Dämmung es aus dem Ausgangsszenario verursacht das große Haus trotz ca. 25% größerer Nutzfläche geringere Gesamtkosten als das nur nach EnEV-Standard gedämmte Haus in der Ursprungsgröße. Die zusätzlichen Baukosten sind natürlich an anderer Stelle zu berücksichtigen.

Inflationsszenarien

Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt die Veränderungen der Ergebnisse bei unterschiedlichen Inflationserwartungen.

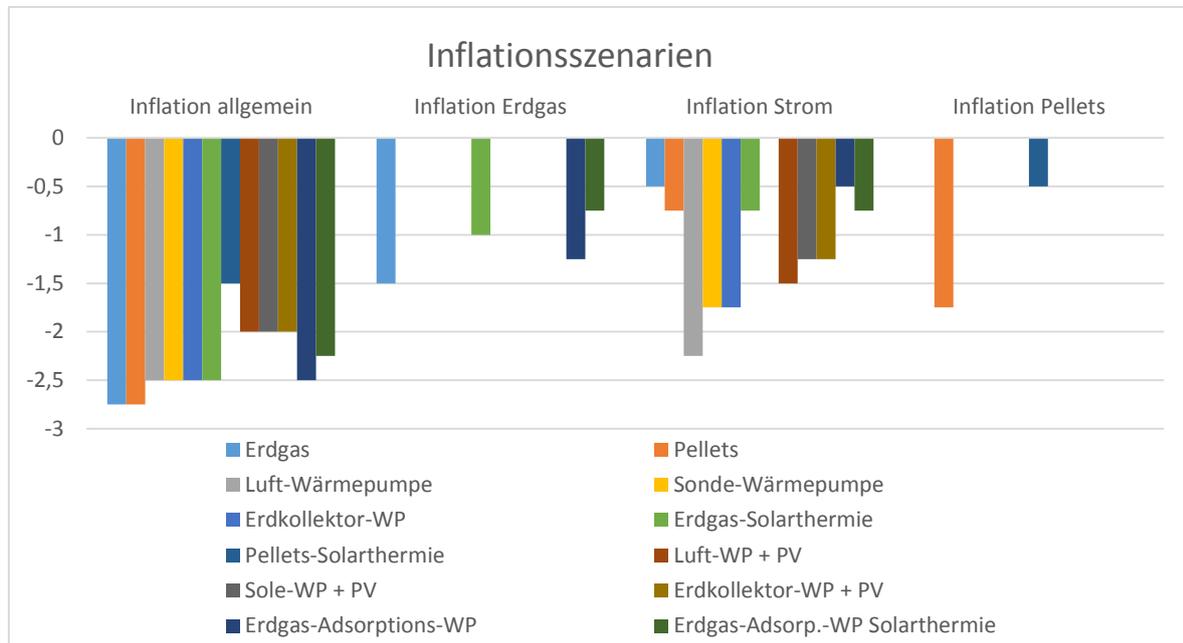


Abbildung 19: Auswirkungen der Inflationsszenarien

In den Szenarien „**Inflation Erdgas**“ und „**Inflation Pellets**“ sind nur die jeweiligen Heizungssysteme betroffen.

Im Szenario „**Inflation allgemein**“ ist der weitest die Kombination Pellets + Solarthermie aufgrund der geringen Verbrauchskosten den geringsten Rückgang auf. Da diese Kombination allerdings im Ausgangsszenario an letzter Stelle sind die Auswirkungen auf das Gesamtergebnis gering. Bei den anderen Heizungsvarianten liegen die Abweichungen vom Ausgangsszenario recht dicht beisammen.

Im Szenario „**Inflation Strom**“ fallen die Wärmepumpen ohne PV am stärksten zurück und werden im Ergebnis von Erdgas überholt. Bei den Wärmepumpen mit PV werden die höheren Stromkosten zum Teil durch den größeren Vorteil des Eigenverbrauchs kompensiert. Der Rückgang der Gesamtpunktzahl fällt daher nur geringfügig stärker aus als bei den Erdgas- und Pelletheizungen.

6 Fazit und Ausblick

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchung reflektiert und ein Gesamtfazit gezogen. Im letzten Abschnitt gibt der Autor einen kurzen Ausblick auf die zukünftige Entwicklung des Heizungsmarktes.

6.1 Kritische Würdigung und Gesamtfazit der Untersuchung

Ziel der Untersuchung war es, das aus ökonomischer und ökologischer Sicht am besten geeignete Heizungssystem zur Deckung des Energiebedarfs von Niedrigenergiehäusern zu ermitteln. Basierend auf der Planung eines Einfamilienhauses wurden Vergleichskriterien definiert, anhand derer zwölf Heizungsvarianten verglichen wurden. Um die Ergebnisse über das Planungsbeispiel hinaus aussagekräftiger zu machen, wurden im Anschluss daran zehn Sensitivitätsanalysen mit jeweils einem geänderten Planungsparameter durchgeführt.

Auf Basis der zugrunde gelegten Annahmen und Festlegungen stellt die Kombination aus Wärmepumpen und einer PV-Anlage sowohl im Ausgangsszenario als auch bei allen Sensitivitätsanalysen das am besten geeignete Heizsystem dar. Als Wärmequelle liegt dabei Luft knapp vor dem Erdkollektor, gefolgt von der Erdsonde. Aufgrund des hohen regenerativen Energieanteils erhält die Kombination aus Wärmepumpe und PV im ökologischen Vergleich eine gute Bewertung und erreicht durch den Eigenverbrauch des PV-Stroms zudem eine gute Wirtschaftlichkeit. Die anderen Heizsysteme zeigen entweder im ökologischen Vergleich (Erdgas) oder im ökonomischen Vergleich (Pelletheizung) Schwächen.

Zudem ist festzustellen, dass beim hohen Dämmungsstandard von Neubauten die Kombination von Heizungssystem zunehmend unwirtschaftlich wird. Grund sind die hohen Anschaffungskosten der Heizungssysteme, welche die Einsparungen im Verbrauch in der Regel nicht kompensieren. Eine Ausnahme bildet die Kombination mit PV, wenn die PV-Anlage bereits ohne Heizungsnutzung durch Eigenverbrauch und Netzeinspeisung wirtschaftlich betrieben werden kann.

Der Autor hat im Rahmen dieser Arbeit einen detaillierten Einblick in den Bereich der Heizungstechnik und der damit verwandten Themengebiete erhalten. Dabei wurde dem Autor die Komplexität der Thematik bewusst. Aufgrund der großen Variantenvielfalt und Heterogenität der Quellen mussten an vielen Stellen Annahmen getroffen werden, die Einfluss auf die Ergebnisse haben. Weiterhin beeinflussen die Auswahl und Gewichtung der Kriterien sowie die Definition des Bewertungsschemas das Ergebnis. Der Autor war bemüht, die Annahmen objektiv und ausgewogen zu treffen, sorgfältig zu begründen und transparent darzustellen.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass das ausgewiesene Ergebnis lediglich eine Momentaufnahme darstellen kann, da der Heizungsmarkt insgesamt sehr dynamisch ist und außerdem gesetzliche Änderungen oder Förderungen einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis haben können.

Als Fazit ist festzustellen, dass einige Heizungssysteme mit vornehmlich regenerativen Energieträgern nicht nur in der Gesamtbetrachtung deutlich bessere Ergebnisse als die Erdgasheizung aufweisen, sondern auch im wirtschaftlichen Vergleich mithalten können. Die Nutzung regenerativer Energien hat somit nicht nur ökologische Vorteile. Zudem sinkt dadurch die Rohstoffabhängigkeit und politische Erpressbarkeit Deutschlands.

6.2 Ausblick

Mit der EnEV 2014 gelten ab dem Jahr 2016 nochmals verschärfte Anforderungen an den energetischen Standard von Neubauten. Durch die weiter verbesserte Dämmung wird der Energiebedarf noch weiter sinken, wodurch Heizsysteme mit geringen Investitionskosten profitieren werden. Bei Wärmepumpen ist bereits eine Tendenz zu weniger effizienten, aber dafür kostengünstigeren Luft-Wärmepumpen erkennbar. Investitionen in Heizungskombinationen werden für Neubauten aus Sicht des Autors zunehmend unwirtschaftlicher, da die höheren Investitionskosten immer weniger durch geringere Verbrauchskosten ausgeglichen werden.

Eine Ausnahme bildet dabei die Kombination aus Wärmepumpe und PV, wie aus dem durchgeführten Vergleich erkennbar wird. Wärmepumpe und PV wird als Kombination voraussichtlich weiter an Attraktivität gewinnen. Mit Fortschreiten der Energiewende wird sich die Ökobilanz der Stromerzeugung weiter verbessern. Weiterhin ist der Betreiber weniger als bei anderen Heizsystemen von einem möglichen Anstieg der Energiepreise betroffen.

Zudem bietet die Kombination aus Wärmepumpen und PV auch einen gesamtwirtschaftlichen Nutzen im Rahmen eines zukünftigen Strommarktes mit einem hohen Anteil fluktuierender Energieträger. Mit zunehmender Fluktuation der Stromerzeugung können Wärmepumpen zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage eingesetzt werden, indem sie primär zu Zeiten des Angebotsüberschusses im Netz betrieben werden. Gleichzeitig kann PV-Strom statt zur Maximierung des Eigenverbrauchs zur Deckung von Verbrauchsspitzen über die Mittagszeit ins Netz eingespeist werden. Dadurch kann der Bedarf nach teurer und in der Regel nicht-regenerativer Ausgleichs- und Regelenergie reduziert werden.

Dazu ist einerseits die Umsetzung eines „Smart Grid“, also eines Stromnetzes, das eine intelligente Vernetzung und Steuerung von Erzeugern und Verbrauchern, notwendig. Andererseits ist ein neues Strommarktdesign mit entsprechenden Anreizsystemen erforderlich, da derzeit für den Anlagenbetreiber nur ein großer Anreiz in der Maximierung des

Eigenverbrauchs besteht. Tendenzen in diese Richtung sind festzustellen, indem Wärmepumpen mit dem Zertifikat „Smart Grid Ready“ ausgestattet werden. Diese Wärmepumpen können bei Bedarf abgeschaltet bzw. in einem festgelegten Rahmen zugeschaltet werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Heizungsmarkt aktuell sehr dynamisch ist. Während über lange Zeit Öl- und Erdgasheizungen den Markt dominierten, haben alternative Konzepte seit einigen Jahren erhebliche Marktanteile gewonnen und werden weiter entwickelt. So werden bei den Wärmepumpen vermehrt leistungsgeregelte Anlagen entwickelt und die Effizienz der Geräte weiter verbessert. Im Erdgasbereich werden Adsorptionswärmepumpen, kleine KWK-Anlagen und Brennstoffzellen derzeit in den Markt eingeführt. Pelletheizungen werden hinsichtlich des Schadstoffausstoßes optimiert und zudem mit Brennwertechnik ausgestattet. All diese Innovationen bieten Potenzial zu einer Verringerung des Energieverbrauchs, einhergehend damit stehen sinkende Heizkosten und eine zunehmend bessere Ökobilanz.

Quellenverzeichnis

Bücher, Skripte, Dissertationen, Veröffentlichungen und Berichte

AEE (2014): Agentur für Erneuerbare Energien e.V.: Eigenverbrauch und regionale Direktvermarktung. Renew's Spezial. Ausgabe 70. Berlin. Februar 2014

AGEB (2013): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihe von 2008 bis 2012; Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Projektnummer, 23/11; Berlin, November 2013

BGR (2014): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Energiestudie 2014. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen, Hannover. Dezember 2014

BINE (2008): BINE Informationsdienst: Solare Wärme – vom Kollektor zur Hausanlage, FIZ, Karlsruhe, 2008

Bundesnetzagentur (2014): Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen Monitoringbericht 2014, Bonn, 14. November 2014

BTGA (2014): BTGA Almanach 2014, Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e.V., Bonn 2014

DESTATIS (2014): Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihe ab 1980. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. September 2014

DGS (2008): Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V.: Leitfaden Photovoltaische Anlagen. 3. Auflage. Berlin. 2008

FNR (2009): Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Holzpellets – komfortabel, effizient, zukunftssicher. 6. Überarbeitete Auflage. Gülzow. 2009

FNR (2013): Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Pelletheizungen Marktübersicht, 7. überarbeitete Auflage. Gülzow-Prüzen. 2013

Fraunhofer (2011): Fraunhofer-Institut für Solare Energieforschung, Marek Miara u.a.: Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb – Abschlussbericht. Freiburg. 05.05.2011

Fraunhofer (2014): Fraunhofer-Institut für Solare Energieforschung, Marek Miara u.a.: „WP Monitor“ – Feldmessung von Wärmepumpenanlagen – Abschlussbericht. Freiburg. 15.07.2014

IINAS (2013): Uwe R. Fritsche, Hans-Werner Greß: Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2012. Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien GmbH. Darmstadt. Oktober 2013

Mauthner (2013): Franz Mauthner, Werner Weiss: Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2011, AEE Institut für Nachhaltige Technologien. Gleisdorf (Österreich). Mai 2013

Mauthner (2014): Franz Mauthner, Werner Weiss: Solar Heat Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply 2012, AEE Institut für Nachhaltige Technologien. Gleisdorf (Österreich). Juni 2014

Miara: Marek Miara, Constanze Bongs u.a.: Wärmepumpen Heizen – Kühlen – Umweltenergie nutzen. Fraunhofer IRB-Verlag. Stuttgart. 2013

NABU (2001): NABU Bundesverband Naturschutzbund Deutschland e.V.: Leitfaden Ökologische Dämmstoffe – Wärmedämmung für Wohngesundheit und Energieeinsparung, Bonn. 2001

Ochsner: Karl Ochsner: Wärmepumpen in der Heizungstechnik. C.F. Müller Verlag. Heidelberg. 2009

Pistohl: Prof. Dipl.-Ing. Wolfram Pistohl: Handbuch der Gebäudetechnik, Band 1, Werner Verlag. Köln. 2009

Sterner u.a.: Michael Sterner, Ingo Stadler: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration. Springer-Verlag. Berlin. 2014

Stiftung Warentest: Mit Strom Wärme pumpen. Test, Ausgabe 06/2007. Stiftung Warentest. Berlin. 2007

Tiator (2006): Ingolf Tiator: Heizungsanlagen. Vogel Buchverlag, 3. Auflage. Würzburg. 2006

Tiator (2014): Ingolf Tiator, Mike Schenker: Wärmepumpen Wärmepumpenanlagen, Vogel Buchverlag, 2. Auflage. Würzburg 2014

UBA (2014-1): Texte 53/2014: Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas insbesondere aus Schiefergaslagerstätten – Teil 2. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Juli 2014

UBA (2014-2): Climate Change 29/2014 – Emissionsbilanz Erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. November 2014

WKSb (2011): Wärmeschutz – Klimaschutz – Schallschutz – Brandschutz. Ausgabe 65.2011. Saint-Gobain Isover G+H AG. Ludwigshafen. 2011

Internet

AGEB (2014-1): Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: Auswertungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2013, Stand: September 2014; http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_10092014_05112014_ov.pdf, Zugriffsdatum: 23.11.2014

AGEB (2014-2): Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20141216_brd_stromerzeugung1990-2014.pdf. Zugriffsdatum: 29.12.2014

AGEB (2015): Stromerzeugung nach Energieträgern 1990-2014 (Stand 27.02.2015): <http://www.ag-energiebilanzen.de/>. Zugriffsdatum: 27.03.2015

BDEW (2015-1): Erdgastechnik – Factsheets. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/995E4F45B9B94A65C1257823004550D3/\\$file/BDEW_Factsheets_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/995E4F45B9B94A65C1257823004550D3/$file/BDEW_Factsheets_final.pdf), Zugriffsdatum: 02.01.2015

BDEW (2015-2): Erdgasverbrauch in Deutschland 2000-2014. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/9F0B3AEB36061207C1257AFA0051FB27/\\$file/Erdgasverbrauch%20Entwicklung%202000_2014_online_o_jaehrlich_Ki_20012015.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/9F0B3AEB36061207C1257AFA0051FB27/$file/Erdgasverbrauch%20Entwicklung%202000_2014_online_o_jaehrlich_Ki_20012015.pdf)
Zugriffsdatum: 28.03.2015

BDEW (2015-3): Entwicklung Bio-Erdgaseinspeisung 2006-2013. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/E0413CD104E25FA4C12579200037EA4A/\\$file/Entwicklung%20Bio-Erdgaseinspeisung%202006_2015%2009Mai2014_o_jaehrlich_Ki.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/E0413CD104E25FA4C12579200037EA4A/$file/Entwicklung%20Bio-Erdgaseinspeisung%202006_2015%2009Mai2014_o_jaehrlich_Ki.pdf).
Zugriffsdatum: 28.03.2015

BMWi (2014): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Zentrale Vorhaben Energiewende für die 18. Legislaturperiode; <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/0-9/10-punkte-energie-agenda.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de.rwb=true.pdf>, Zugriffsdatum: 13.10.2014

BSW Solar (2015): Bundesverband der Solarwirtschaft: Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie).

http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2015_3_BSW_Solar_Faktenblatt_Solarwaerme.pdf, Zugriffsdatum: 27.03.2015

Bundesnetzagentur (2015): Photovoltaikanlagen: Datenmeldungen sowie EEG-Vergütungssätze. Bundesnetzagentur, Bonn:

http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1412/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze_node.html#doc405794bodyText3,

Zugriffsdatum: 27.03.2015

BWP (2014): Bundesverband Wärmepumpen e.V.:

http://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bwppublication/2014-01-24_BWP-PI_Absatzzahlen_2013.pdf, Zugriffsdatum: 09.10.2014

C.A.R.M.E.N. (2014): Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.:

<http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/graphiken>, Zugriffsdatum: 30.12.2014

C.A.R.M.E.N. (2015): Der Holzpellet-Preis-Index, Jahresmittelwerte. Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.:

<http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/jahresmittelwerte>, Zugriffsdatum: 02.04.2015

DEPI (2014): Deutsches Pellet-Institut: <http://www.depi.de/de/infothek/grafiken/>,

Zugriffsdatum: 30.12.2014

DEPV (2014): Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V.: Zertifizierung von Holzpellets, http://www.depv.de/de/holzpellets/was_sind_pellets/normen_pellets/,

Zugriffsdatum: 30.12.2014

Destatis (2015-1): Statistisches Bundesamt: „Strompreis: Private Verbraucher besonders stark von Preisanstieg betroffen“, veröffentlicht am 10.10.2014:

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/ImFokus/Preise/EntwicklungStrompreis.html>.

Zugriffsdatum 03.04.2015

Destatis (2015-2): Statistisches Bundesamt: „Verbraucherpreise Februar 2015: + 0,1% gegenüber Februar 2014“. Pressemitteilung Nr. 092 vom 12.03.2015:

https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/03/PD15_092_611.html, Zugriffsdatum: 03.04.2015

Duden: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Waermedaemmung>

Zugriffsdatum: 02.01.2015

DWD: Deutscher Wetterdienst, Strahlungskarten der Mittelwerte 1981 -2010) für Deutschland:http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_gutachten&T15805338371147076754824gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimagutachten%2FSolarenergie%2FDownload_node.html%3F_nnn%3Dtrue, Abrufdatum: 17.01.2015

Enev-Info: Begründung zum Verordnungstext (EnEV 2002): <http://www.enev-info.de/enev-begruendung.pdf>, Zugriffsdatum vom 29.11.2014

Erdgas.Info (2015): Das Informationsportal rund um Erdgas.
<http://www.erdgas.info/erdgasheizung/erdgas-solar/>. Zugriffsdatum: 28.03.2015

Erdwärme-Region: Geothermie RheinMainNeckar GmbH: http://www.erdwaerme-region.de/index.php?function=cms_show&id=66, Zugriffsdatum: 15.02.2015

EuPD (2013): Photovoltaik-Preismonitor Deutschland – Ergebnisse 1. Quartal. EuPD Research im Auftrag des Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Bonn. 2013, online verfügbar unter:
http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/130218_EuPD_Preismonitor_q1_13.pdf,
Zugriffsdatum: 29.03.2015

FIAN: Bitter Coal – Ein Dossier über Deutschlands Steinkohleimporte.
http://kohleimporte.de/fileadmin/user_upload/bittercoal_1_15_13.pdf, Zugriffsdatum:
31.03.2015

IWU (2014-1): Gradtagszahlen in Deutschland, Stand: 06.05.2014. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt:
http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gradtagszahlen_Deutschland.xls, Zugriffsdatum: 02.01.2015

IWU (2014-2): Kumulierter Energieaufwand und CO2 Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 17.12.2014:
http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf
Zugriffsdatum: 17.03.2015

Fraunhofer ISE (2015): Fraunhofer-Institut für Solare Energieforschung: Ergebnisse des Projektes „WP-Monitor“: <https://wp-monitor.ise.fraunhofer.de/german/index/ergebnisse.html>,
Zugriffsdatum: 14.02.2015

KfW (2014): Merkblatt Bauen, Wohnen, Energie sparen – Energieeffizient bauen, 153 Kredit:
[https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/6000003103_M_153.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/6000003103_M_153.pdf) sowie Anlage zum Merkblatt Programm Energieeffizient

Bauen (153) [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/6000003104_M_Anlage_153.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/6000003104_M_Anlage_153.pdf), Abruf vom 30.11.2014

Prowildlife: Die Schlacht um Holzpellets:

http://www.prowildlife.de/sites/default/files/FS_Holzpellets.pdf, Abruf vom 24.03.2015

Quaschning u.a. (2014): Prof. Dr. Volker Quaschning, Johannes Weniger, Tjarko Tjaden: Chancen des photovoltaischen Eigenverbrauchs für die Energiewende in Deutschland.

Vortrag vom 13.03.2014 beim 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein. http://volker-quaschning.de/publis/vortraege/2014-03-13_Staffelstein-PV_Quaschning.pdf, Zugriffsdatum: 01.04.2015

Spektrum: Pumpen für die Ewigkeit. <http://www.spektrum.de/news/pumpen-fuer-die-ewigkeit/1222444>. Zugriffsdatum: 31.03.2015

Spiegel-Online (2009): Folgen des Pellet-Booms: „Der Waldboden blutet aus“. Erschienen: 31.01.2009 <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/folgen-des-pellet-booms-der-waldboden-blutet-aus-a-604361.html>, Zugriffsdatum 31.03.2015

Spiegel-Online (2010): Uranförderung im Niger: Der gelbe Fluch. Erschienen: 02.04.2010 <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/uranfoerderung-in-niger-der-gelbe-fluch-a-686763.html>. Zugriffsdatum: 31.03.2015

Stadtwerke Buchholz: Erdgas Hausanschlüsse <http://www.stadtwerke-buchholz.de/privatkunden/erdgas-hausanschluss.php>. Zugriffsdatum: 15.03.2015

Viessmann (2015): Viessmann AG. Produktdatenblatt Viessmann Vitosorp 200 Gas-Adsorptions-Heizgerät [http://www.viessmann.de/content/dam/vi-brands/DE/Produkte/Gas-Brennwertkessel/Vitosorp-200-F/DB-5516035_Vitosorp_200-F.pdf](http://www.viessmann.de/content/dam/vi-brands/DE/Produkte/Gas-Brennwertkessel/Vitosorp-200-F/DB-5516035_Vitosorp_200-F.pdf/jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/DB-5516035_Vitosorp_200-F.pdf), Zugriffsdatum: 29.03.2015

WDR: Industrie verschweigt Gefahren durch radioaktive Rückstände

<http://www1.wdr.de/themen/archiv/oelquellen-industrie100.html>, Zugriffsdatum: 31.03.2015

Gesetze, Richtlinien und Verordnungen

Amtsblatt der EG (2003): Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L1, S. 65-71, Brüssel, 04.01.2003

Bundesgesetzblatt (2001): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 16.11.2001, BGBl Jahrgang 2001, Teil I, Nr. 59 (S. 3085-3102), Bonn, 21.11.2001

Bundesgesetzblatt (2004): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 02.12.2004, BGBl Jahrgang 2004, Teil I, Nr. 64 (S. 3146-3162), Bonn, 07.12.2004

Bundesgesetzblatt (2007): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24.07.2007, BGBl Jahrgang 2007, Teil I, Nr. 34 (S. 1519-1567), Bonn, 26.07.2007

Bundesgesetzblatt (2008): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG), BGBl Jahrgang 2008, Teil I, Nr. 36 (S. 1658-1665), Bonn, 18.08.2008

Bundesgesetzblatt (2009): Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29.04.2009, BGBl Jahrgang 2009, Teil I, Nr. 23 (S. 954-989), Bonn, 30.04.2009

Bundesgesetzblatt (2013): Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18.11.2013, BGBl Jahrgang 2013, Teil I, Nr. 67 (S. 3951-3990), Bonn, 21.11.2013

NBauO: Niedersächsische Bauordnung vom 03.12.2012; Veröffentlicht im Niedersächsischen Vorschrifteninformationssystem (NI-VORIS) unter: <http://www.nds-voris.de/jportal/?quelle=jlink&query=BauO+ND&psml=bsvorisprod.psml&max=true&aiz=true>.
Abruf vom 08.02.2015

Normen

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

DIN 4108 Beiblatt 2: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN V 4108 Beiblatt 2:2006-03. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele. Beuth Verlag. Berlin. 2003

DIN V 4701-10 (2003): DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN V 4701-10 Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen, Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Beuth Verlag. Berlin. 2003

DIN 12831 (2003): DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Deutsche Fassung EN 12831:2003. Beuth Verlag. Berlin. 2003

DIN 12831 Beiblatt 1 (2008): DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Nationaler Anhang NA. Beuth Verlag. Berlin. 2008

DIN 18599-1: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN V 18599-1 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Beuth Verlag. Berlin. 2011

VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds. Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Düsseldorf. 2001

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Stromerzeugung nach Energieträgern	CIII
Anhang 2: Anforderungen der EnEV 2009.....	CIV
Anhang 3: Höhenplan Grundstück „Buchholz“	CVI
Anhang 4: Grundriss Hausplanung.....	CVII
Anhang 5: Auszüge aus der Primär/Endenergiebedarfsberechnung	CVIII
Anhang 6: Parameter der Heizlastberechnung	CX
Anhang 7: Auszüge aus der Heizlastberechnung.....	CXII
Anhang 8: Anteile Heizsysteme bei Neubauten	CXV
Anhang 9: Marktentwicklung Pelletheizungen / Pelletpreise	CXVI
Anhang 10: Erdwärmenutzung – Abschätzung LBEG.....	CXVII
Anhang 11: Erdgasreserven	CXVIII
Anhang 12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.....	CXIX

Anhang 1: Stromerzeugung nach Energieträgern

Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern																											
Energieträger	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014 ¹⁾		
	Mrd. kWh																										
Braunkohle	170,9	158,3	154,5	147,5	145,1	142,5	144,3	141,7	139,4	136,0	148,3	154,8	158,0	159,2	158,0	154,1	151,1	155,1	150,6	145,6	145,9	150,1	160,7	160,9	156,0	156,0	
Kernenergie	152,5	147,4	158,8	153,5	151,2	154,1	161,6	170,3	161,6	170,0	169,6	171,3	164,8	165,1	167,1	163,0	164,8	134,9	140,5	148,8	134,9	140,6	108,0	99,5	97,3	96,9	
Steinkohle	140,8	149,8	141,9	146,2	144,6	147,1	152,7	143,1	153,4	143,1	143,1	138,4	134,6	145,5	140,8	134,1	137,9	142,0	124,6	107,9	117,0	112,4	116,4	121,7	109,9	109,9	
Erdgas	35,9	36,3	33,0	32,8	36,1	41,1	45,6	48,1	50,7	51,8	49,2	55,5	56,3	62,9	63,0	72,7	75,3	78,1	89,1	80,9	89,3	86,1	76,4	67,5	58,5	58,5	
Mineralprodukte	10,8	14,8	13,2	10,1	10,1	9,1	8,1	7,4	6,7	6,3	5,9	6,1	8,7	10,3	10,8	12,0	10,9	10,0	9,7	10,1	8,7	7,2	7,6	7,2	5,0	5,0	
Erneuerbare	19,7	17,5	20,5	21,2	23,0	25,1	23,0	24,2	26,3	29,1	37,9	36,9	46,1	45,6	56,6	62,5	71,6	88,3	93,2	94,9	104,8	123,8	143,8	152,4	157,4	157,4	
darunter																											
- Windkraft onshore	k.A.	0,1	0,3	0,6	0,9	1,5	2,0	3,0	4,5	5,5	9,5	10,5	15,8	18,7	25,5	27,2	30,7	39,7	40,6	37,8	48,9	50,7	50,8	51,2	50,8	51,2	
- Windkraft offshore																											
- Wasserkraft ²⁾	19,7	15,9	18,6	19,0	20,2	21,6	18,8	19,0	19,0	20,7	24,9	23,2	23,7	17,7	20,1	19,6	20,0	21,2	20,4	19,0	21,0	17,7	22,1	23,0	20,8	20,8	
k.A.	0,3	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,6	3,3	4,5	6,6	8,2	11,1	14,8	19,8	23,1	26,3	29,5	32,8	39,7	41,2	42,8	42,8	42,8	
- Biomasse	k.A.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,6	1,3	2,2	3,1	4,4	6,6	11,7	19,6	26,4	31,0	35,2	35,2	
- Photovoltaik	k.A.	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,2	2,3	3,3	3,9	4,5	4,7	4,3	4,7	4,8	5,0	5,4	6,1	6,1	
- Hausmüll ³⁾	19,3	16,2	16,3	15,8	17,4	17,7	17,4	17,4	19,1	20,0	22,6	21,4	18,2	20,3	21,2	24,1	25,4	26,6	24,7	21,4	26,8	25,6	25,7	26,2	26,2	26,2	
Übrige Energieträger																											
Bruttoerzeugung insgesamt	549,9	540,2	538,2	527,1	528,5	536,8	552,7	552,3	557,2	556,3	576,6	586,4	586,7	608,8	617,5	622,6	639,6	640,6	640,7	595,6	633,1	613,1	630,1	633,2	610,4	610,4	
Stromflüsse aus dem Ausland	31,9	30,4	28,4	33,6	35,9	39,7	37,4	38,0	38,3	40,6	45,1	43,5	46,2	45,8	44,2	53,4	46,1	44,3	40,2	40,6	42,2	49,7	44,2	38,4	39,7	39,7	
Stromflüsse ins Ausland	31,1	31,0	33,7	32,8	33,6	34,9	42,7	40,4	38,9	39,6	42,1	44,8	45,5	53,8	51,5	61,9	65,9	63,4	62,7	54,9	59,9	56,0	67,3	72,2	73,7	73,7	
Stromtauschsaldo Ausland	+0,8	-0,6	-5,3	+0,9	+2,3	+4,8	-5,3	-2,3	-0,6	+1,0	+3,1	-1,3	+0,7	-8,1	-7,3	-8,5	-19,8	-19,1	-22,5	-14,3	-17,7	-6,3	-23,1	-33,8	-34,1	-34,1	
Brutto-Haustromverbrauch ⁴⁾	550,7	539,6	532,9	528,0	530,8	541,6	547,4	550,0	556,6	557,3	579,6	585,1	587,4	600,7	610,2	614,1	619,8	621,5	618,2	581,3	615,4	606,8	607,1	599,4	576,3	576,3	
Veränderung gegenüber Vorjahr in %	X	-2,0	-1,3	-0,9	+0,5	+2,0	+1,1	+0,5	+1,2	+0,1	X	+1,0	+0,4	+2,3	+1,6	+0,6	+0,9	+0,3	-0,5	-6,0	+5,9	-1,4	+0,0	-1,3	-3,8	-3,8	
Struktur der Bruttoerzeugung in %																											
Braunkohle	31,1	29,4	28,7	28,0	27,6	26,6	26,1	25,7	25,0	24,4	25,7	26,4	26,9	26,0	25,6	24,8	23,6	24,2	23,6	24,5	23,0	24,5	25,5	25,4	25,6	25,6	
Kernenergie	27,7	27,3	29,5	29,2	28,6	28,7	29,2	30,8	29,1	30,7	29,5	29,3	28,1	27,1	27,1	26,2	26,2	21,9	23,2	22,6	20,2	22,2	17,6	15,8	15,4	15,9	
Steinkohle	25,6	27,7	26,4	27,7	27,4	27,4	27,6	25,9	27,5	25,7	24,8	23,6	22,9	24,1	22,8	21,5	21,6	22,2	19,4	18,1	18,5	18,3	18,5	19,2	18,0	18,0	
Erdgas	6,5	6,7	6,1	6,2	6,8	7,7	8,3	8,7	9,1	9,3	8,5	9,5	9,6	10,3	10,2	11,7	11,8	12,2	13,9	13,6	14,1	14,0	12,1	10,7	9,6	9,6	
Mineralprodukte	2,0	2,7	2,5	1,9	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	1,5	1,7	1,7	1,9	1,7	1,6	1,5	1,7	1,4	1,2	1,2	1,1	0,8	0,8	
Erneuerbare	3,6	3,2	3,8	4,0	4,4	4,7	4,2	4,4	4,7	5,2	6,6	6,6	7,9	7,5	9,2	10,0	11,2	13,8	14,5	15,9	16,6	20,2	22,8	24,1	25,8	25,8	
darunter																											
- Windkraft onshore	k.A.	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0	1,6	1,8	2,7	3,1	4,1	4,4	4,8	6,2	6,3	6,5	6,0	8,0	8,0	8,0	8,4	8,4	
- Windkraft offshore																											
- Wasserkraft ²⁾	3,6	2,9	3,5	3,6	3,8	4,0	3,4	3,4	3,4	3,7	4,3	4,0	4,0	2,9	3,3	3,1	3,1	3,3	3,2	3,2	3,3	2,9	3,5	3,6	3,4	3,4	
k.A.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,6	0,8	1,1	1,3	1,8	2,3	3,1	3,6	4,4	4,7	5,3	6,3	6,5	7,0	7,0	
- Biomasse	k.A.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,1	1,8	3,2	4,2	4,9	5,8	5,8	
- Photovoltaik	k.A.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0
- Hausmüll ³⁾	3,5	3,0	3,0	3,0	3,3	3,2	3,1	3,2	3,4	3,6	3,9	3,6	3,1	3,3	3,4	3,9	3,9	4,1	3,9	3,6	4,2	4,2	4,1	4,1	4,1	4,1	
Übrige Energieträger																											
Bruttoerzeugung insgesamt	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
in %																											
nachrichtlich: Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Deckung des Stromverbrauchs	X	3,2	3,8	4,0	4,6	4,9	4,4	4,7	5,0	5,7	6,6	6,7	7,8	7,6	9,3	10,2	11,6	14,2	15,1	16,3	17,0	20,4	23,7	25,4	27,3	27,3	

Stand: 12. Dezember 2014

Abweichungen in den Summen durch Rundungen
¹⁾ Vorkläufige Angaben, z.T. geschätzt. ²⁾ Erzeugung in Lauf- und Speicherkraftwerken sowie Erzeugung aus natürlichem Zufluss in Pumpspeicherkraftwerken. ³⁾ Nur Erzeugung aus biogenem Anteil des Hausmülls (ca. 50 %). ⁴⁾ Einschließlich Netzeigenleistung und Eigenverbrauch.
 Quellen: Statistisches Bundesamt; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW); AG Energieblanzen e.V.

Abbildung 20: Stromerzeugung Deutschland 1990-2014, Quelle: AGEB (2014-2)

Anhang 2: Anforderungen der EnEV 2009

Zeile	Bauteil/System	Referenzausführung / Wert (Maßeinheit)	
		Eigenschaft (zu Zeilen 1.1 bis 3)	
1.1	Außenwand, Geschossdecke gegen Außenluft	Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
1.2	Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen (außer solche nach Zeile 1.1)	Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
1.3	Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
		Referenzausführung / Wert (Maßeinheit)	
1.4	Fenster, Fenstertüren	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_w = 1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_L = 0,60$
1.5	Dachflächenfenster	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_w = 1,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_L = 0,60$
1.6	Lichtkuppeln	Wärmedurchgangskoeffizient	$U_w = 2,70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
		Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	$g_L = 0,64$
1.7	Außentüren	Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 1,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
2	Bauteile nach den Zeilen 1.1 bis 1.7	Wärmebrückenzuschlag	$\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
3	Luftdichtheit der Gebäudehülle	Bemessungswert n_{50}	Bei Berechnung nach <ul style="list-style-type: none"> • DIN V 4108-6 : 2003-06: mit Dichtheitsprüfung • DIN V 18599-2 : 2007-02: nach Kategorie I
4	Sonnenschutzvorrichtung	keine Sonnenschutzvorrichtung	
5	Heizungsanlage	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeerzeugung durch Brennwertkessel (verbessert), Heizöl EL, Aufstellung: <ul style="list-style-type: none"> - für Gebäude bis zu 2 Wohneinheiten innerhalb der thermischen Hülle - für Gebäude mit mehr als 2 Wohneinheiten außerhalb der thermischen Hülle • Auslegungstemperatur 55/45 °C, zentrales Verteilsystem innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche, innen liegende Stränge und Anbindeleitungen, Pumpe auf Bedarf ausgelegt (geregelt, Δp konstant), Rohrnetz hydraulisch abgeglichen, Wärmedämmung der Rohrleitungen nach Anlage 5 • Wärmeübergabe mit freien statischen Heizflächen, Anordnung an normaler Außenwand, Thermostatventile mit Proportionalbereich 1 K 	
6	Anlage zur Warmwasserbereitung	<ul style="list-style-type: none"> • zentrale Warmwasserbereitung • gemeinsame Wärmebereitung mit Heizungsanlage nach Zeile 5 • Solaranlage (Kombisystem mit Flachkollektor) entsprechend den Vorgaben nach DIN V 4701-10 : 2003-08 oder DIN V 18599-5 : 2007-02 • Speicher, indirekt beheizt (stehend), gleiche Aufstellung wie Wärmeerzeuger, Auslegung nach DIN V 4701-10 : 2003-08 oder DIN V 18599-5 : 2007-02 als <ul style="list-style-type: none"> - kleine Solaranlage bei $A_{S1} < 500 \text{ m}^2$ (bivalenter Solar-speicher) - große Solaranlage bei $A_{S1} \geq 500 \text{ m}^2$ • Verteilsystem innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche, innen liegende Stränge, gemeinsame Installationswand, Wärmedämmung der Rohrleitungen nach Anlage 5, mit Zirkulation, Pumpe auf Bedarf ausgelegt (geregelt, Δp konstant) 	
7	Kühlung	keine Kühlung	
8	Lüftung	zentrale Abluftanlage, bedarfsgeführt mit geregelter DC-Ventilator	

Abbildung 21: Ausführung des Referenzgebäudes gemäß EnEV 2009, Quelle: Bundesgesetzblatt (2009), S. 960 f

Zeile	Gebäudetyp		Höchstwert des spezifischen Transmissionswärmeverlusts
1	Freistehendes Wohngebäude	mit $A_N \leq 350\text{m}^2$	$H'_T = 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
		mit $A_N > 350\text{m}^2$	$H'_T = 0,50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
2	Einseitig angebautes Wohngebäude		$H'_T = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
3	alle anderen Wohngebäude		$H'_T = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
4	Erweiterungen und Ausbauten von Wohngebäuden gemäß § 9 Absatz 5		$H'_T = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Abbildung 22: Höchstwerte Transmissionswärmeverlust gemäß EnEV 2009, Quelle: Bundesgesetzblatt (2009), S. 962

Anhang 3: Höhenplan Grundstück „Buchholz“

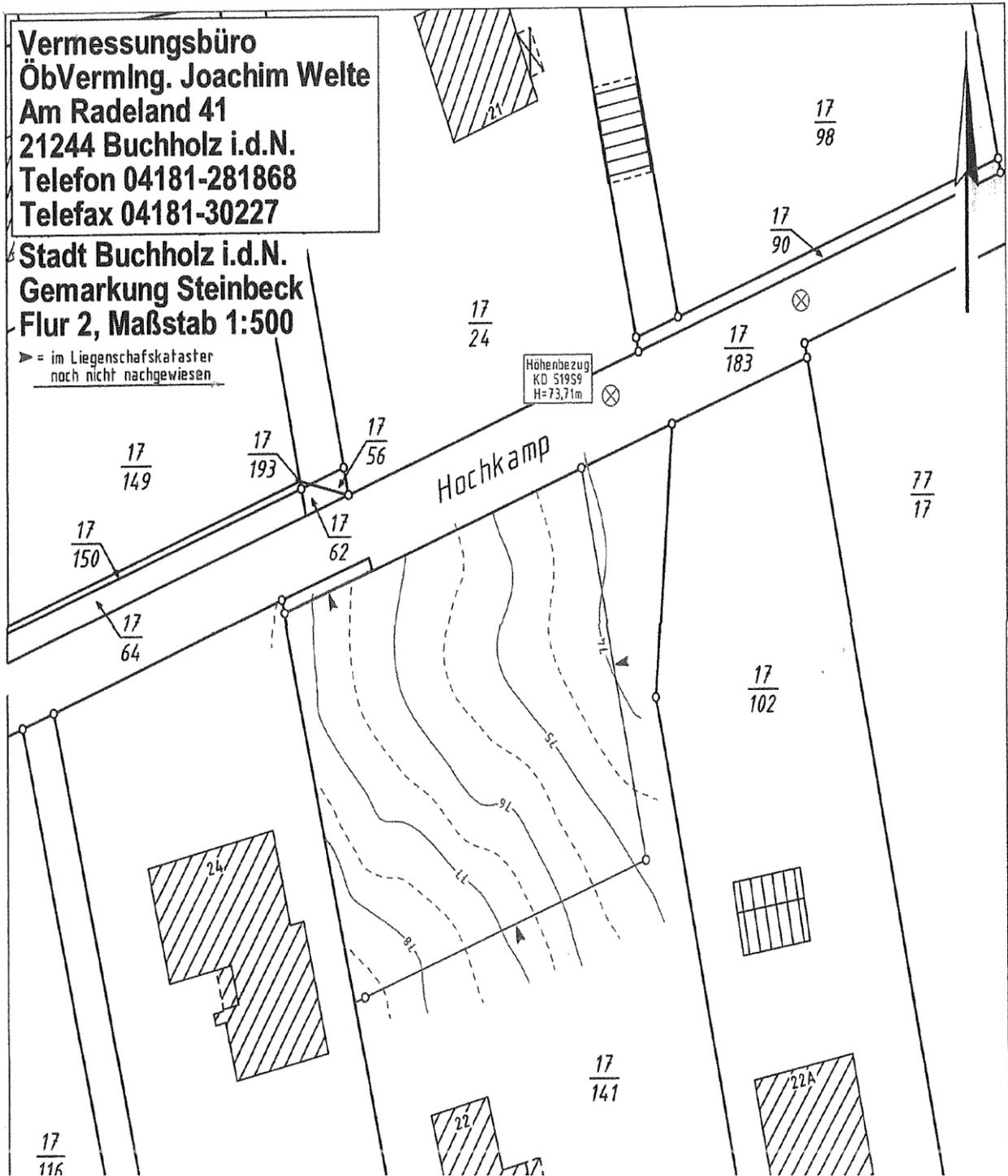
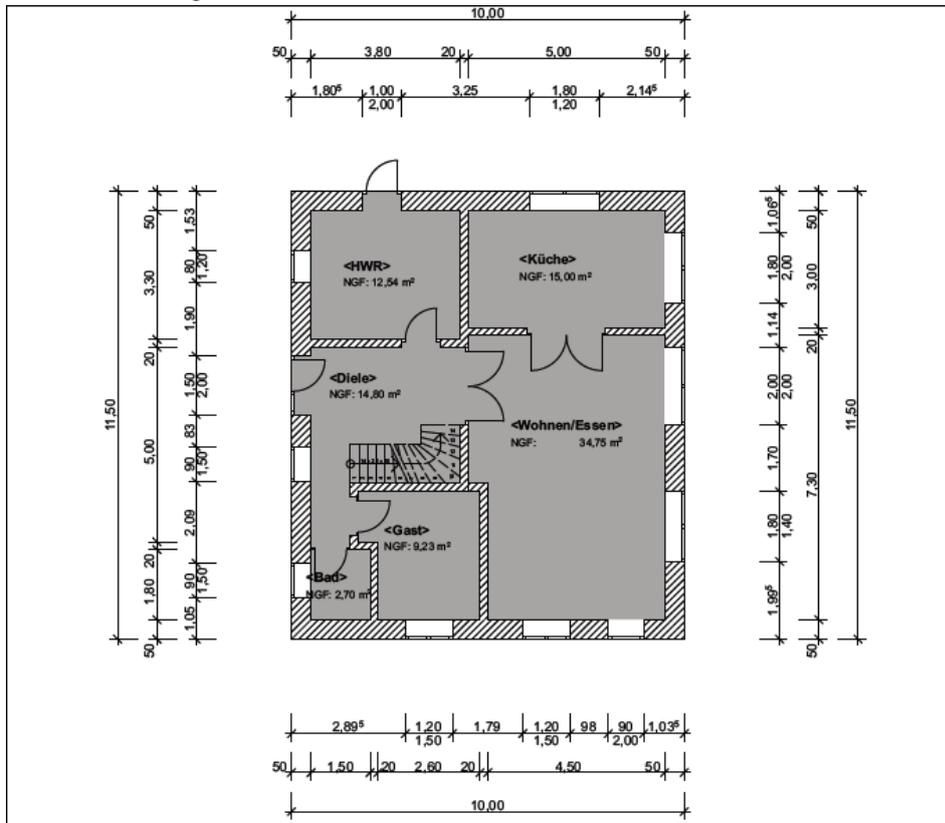


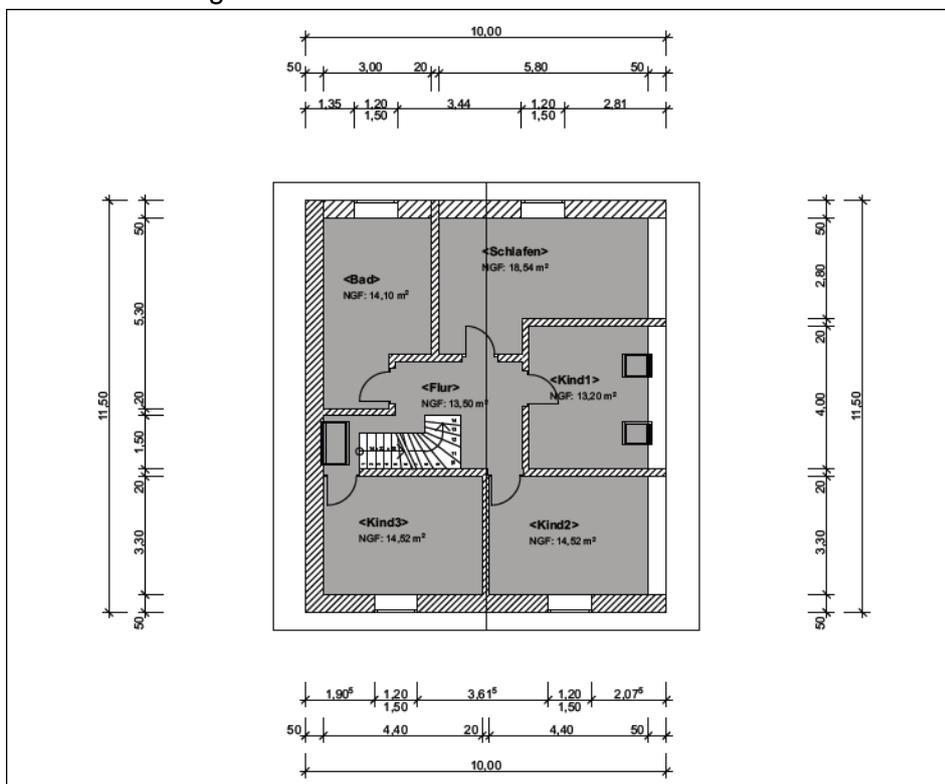
Abbildung 23: Höhenplan Grundstück Hochkamp

Anhang 4: Grundriss Hausplanung

Grundriss Erdgeschoss



Grundriss Obergeschoss



Anhang 5: Auszüge aus der Primär-/Endenergiebedarfsberechnung

Bei den nachfolgenden Abbildungen handelt es sich um Auszüge aus den Berechnungen des Primär-/Endenergiebedarfs (Kapitel 3.2.1) mit dem Programm „Energieberater 18599“.

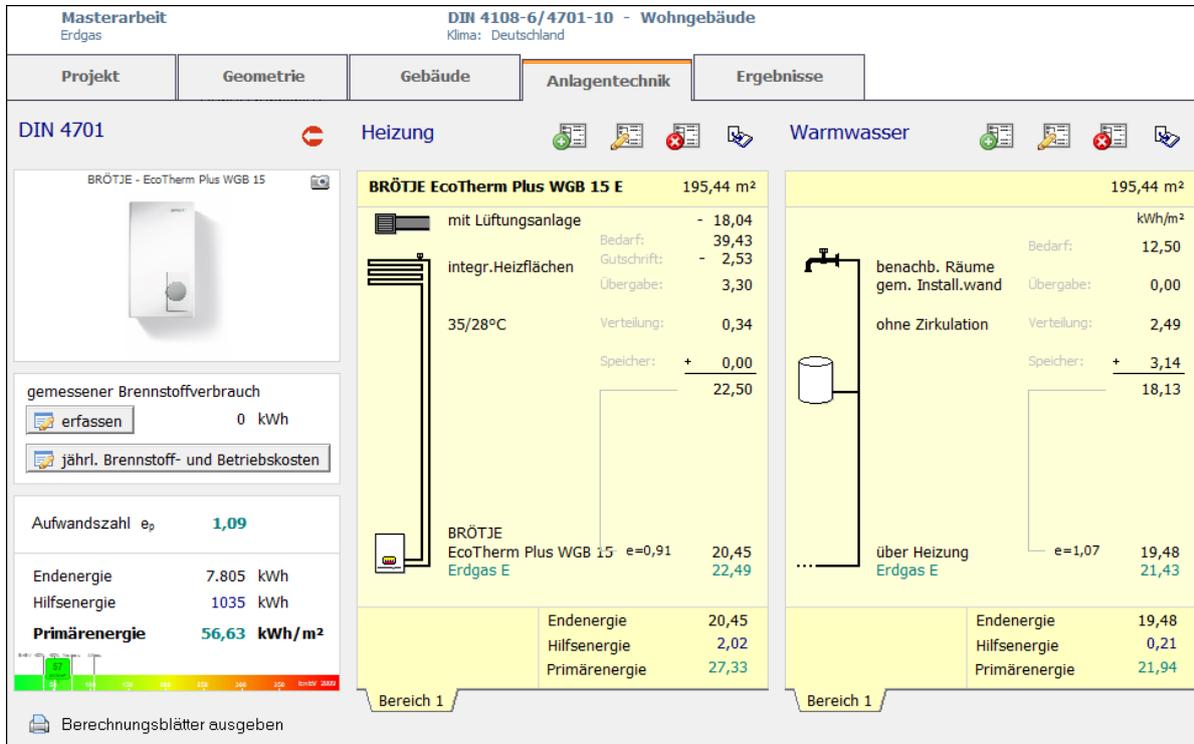


Abbildung 24: Übersicht Anlagentechnik Erdgas-Heizung

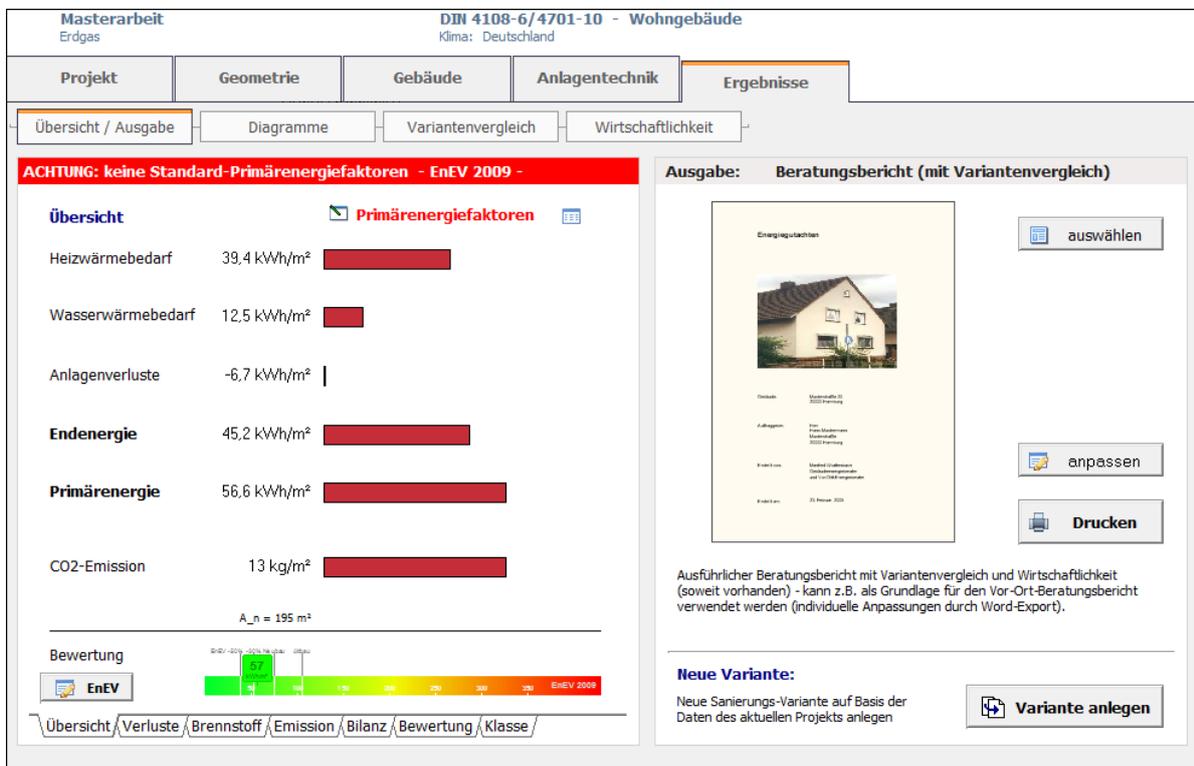


Abbildung 25: Übersicht Endenergiebedarf / Primärenergiebedarf Erdgasheizung

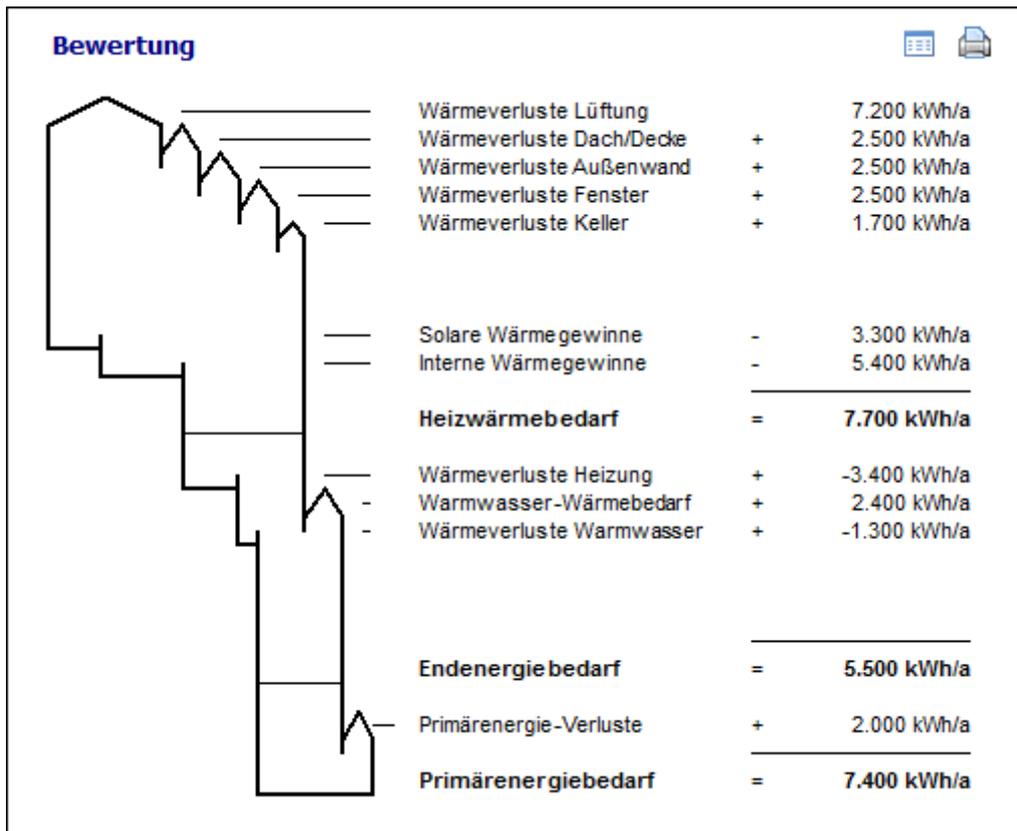


Abbildung 26: Energieflussbild Erdgas + Solarthermie

Projekt: Masterarbeit - Pelletheizung_opt_mit_Sol-Therm

KfW-Anforderungen

"Energieeffizient Bauen"

	Ist-Wert	Referenzgebäude (EnEV ₂₀₀₉)	KfW-EH 70 (EnEV ₂₀₀₉)	KfW-EH 55 (EnEV ₂₀₀₉)	KfW-EH 40 (EnEV ₂₀₀₉)
Jahres-Primärenergiebedarf q_p [kWh/(m ² a)]	18,95	74,97 ¹⁾	52,48	41,23	29,99
Transmissionswärmeverlust H'_T [W/(m ² K)]	0,245	0,354 ²⁾	0,300	0,247	0,194
Transmissionswärmeverlust H'_T [W/(m ² K)]	0,245	0,400 ³⁾	0,400	0,400	0,400

¹⁾ Jahres-Primärenergiebedarf für das entsprechende Referenzgebäude nach EnEV 2009 Anlage 1 Tabelle 1.
²⁾ Transmissionswärmeverlust für das entsprechende Referenzgebäude nach EnEV 2009 Anlage 1 Tabelle 1.
³⁾ Höchstwert des Transmissionswärmeverlusts nach EnEV 2009 Anlage 1 Tabelle 2.

Berechnung nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10

Abbildung 27: Pelletheizung + Solarthermie - Erfüllung KfW-Kriterien

Anhang 6: Parameter der Heizlastberechnung

Parameter zur Berechnung der Norm-Heizlast für das Mustergebäude gemäß DIN EN 12831:2003 und DIN EN 12831 Beiblatt 1 2008-07

1. Gebäudespezifische Daten:

a) Allgemeine Gebäudedaten

- Gebäudebeschreibung s. Abschnitt 3.1
- Raumvolumen
- Größe der Wandflächen (vertikal und horizontal)
- U-Werte gemäß Abschnitt 3.1.4

b) Wärmebrückenzuschlag:

Der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} [W/m²K] wird gemäß Tabelle 5 gemäß DIN 12831 Beiblatt 1 (2008) wie folgt festgelegt: 0,05 W/m²K (mit bauseitiger Ausführung der Bauteilanschlüsse nach DIN 4108, Beiblatt 2)

c) Lüftung

- Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz: $n_{50} = 1,5$ /h
Für das Gebäude trifft die Kategorie Ia gemäß Tabelle 9 aus DIN 12831 Beiblatt 1 (2008) zu (nach EnEV errichtete Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen)¹³³
- Gleichzeitig wirksamer Lüftungswärmeanteil $\zeta = 0,5$
- Wärmebereitstellungsgrad des verwendeten Wärmerückgewinnungssystems: $\eta_{WRG} = 80$ %
- Luftvolumenströme:
 - o Bad und WC: 1 h⁻¹
 - o sonstige Räume: 0,5 h⁻¹

2. Umgebungsspezifische Daten

- a) Höhenkorrekturfaktor: $\varepsilon = 1,0$ (Gebäudehöhe ist < 10 m)
- b) Abschirmungskoeffizient e: Das Gebäude liegt im Bereich moderater Abschirmung. Je nach Anzahl der dem Wind ausgesetzten Fassaden werden gemäß Tabelle 10 die Werte 0,02 und 0,03 eingesetzt¹³⁴
- c) Wärmeverlust ans Erdreich:

$$H_{T, ig} = f_{g1} * f_{g2} * (\sum k A_k * U_{equiv, k}) * G_W \quad (\text{DIN 12831, Ziffer 7.1.3 Gleichung 8})$$

$H_{T, ig}$ = Wärmeverlust an das Erdreich

$f_{g1} = 1,45$ (Korrekturfaktor für die jährliche Schwankung der Außentemperatur gemäß DIN 12831 Beiblatt 1 (2008), Ziffer 3.4.3)

f_{g2} = der Reduktionsfaktor für die Temperaturdifferenz, zwischen Norm-Außentemperatur und dem Jahresmittel der Außentemperatur, der seinerseits wie folgt ermittelt wird:

¹³³ Vgl. DIN 12831 Beiblatt 1 (2008), S 27

¹³⁴ Vgl. ebenda, S. 27

$$f_{g2} = \frac{\theta_{\text{int},i} - \theta_{\text{m},e}}{\theta_{\text{int},i} - \theta_e}$$

Bei 20°C Raumtemperatur: **$f_{g2} = 0,38$**

Bei 24°C Raumtemperatur: **$f_{g2} = 0,46$**

A_k : Fläche des Bauteils mit Bodenberührung (wird je Raum gemessen)

$U_{\text{equiv},k}$: der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteiles (k) in Watt durch Quadratmeter und Kelvin ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), ermittelt anhand der Bodencharakteristik und Parameter B' .

Parameter B' : $B' = \frac{A_G}{0,5 * P}$ (DIN 12831, Gleichung (9))

A_G : Fläche der Bodenplatte in m^2 : $10\text{m} \times 11,5\text{m} = 115\text{m}^2$

P : Umfang der Bodenplatte in m: $2 \times 10\text{m} + 2 \times 11,5\text{m} = 43\text{m}$

$B' = 5,35$

$U_{\text{equiv},k} = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (aus Tabelle 4, DIN 12831-2003 bei $z = 0,00 \text{ m}$ (Tiefe der Bodenplatte))

$G_w = 1$ (Korrekturfaktor für den Einfluss des Grundwassers, bei Abstand Grundwasserspiegel zur Fundamentplatte: $\geq 3 \text{ m} = 1,00$)

3. Meteorologische Daten

- Norm-Außentemperatur:

Auswahl der Norm-Außentemperatur des nächstgelegenen Messpunktes:

Ort	PLZ	Klimazonen nach DIN 4710	Außentemperatur θ_e' [°C]	Jahresmittel der Außentemperatur $\theta_{\text{m},e}$ [°C]
Hamburg	20144	3	-12	8,5

Tabelle 53: Norm-Außentemperatur / Jahresmittel Außentemperatur Hamburg-Fuhlsbüttel¹³⁵

- Korrektur der Außentemperatur in Abhängigkeit von der Zeitkonstante:
 - o Gebäudezeitkonstante $\tau = 189 \text{ h}$
 - o Daher wurde gemäß Tabelle 2 aus DIN 12831 Beiblatt 1 (2008) die Norm-Außentemperatur θ_e' um 2 K auf -10°C korrigiert¹³⁶
 - o **$\theta_e = -10^\circ\text{C}$**
- Jahresmittel der Außentemperatur: **$\theta_{\text{m},e} = 8,5^\circ\text{C}$**

4. Nutzerspezifische Daten

- Raumtemperaturen ($\theta_{\text{int},i}$)
 - o Bad und WC: 24°C
 - o Sonstige Räume: 20°C
- Zusätzliche Aufheizleistung:
 - o Unterbrechung der Heizleistung für 2 Stunden
 - o Wiederaufheizzeit: 2 Stunden

Gemäß Tabelle 4 aus DIN 12831 liegt bei dem angesetzten U-Wert der Bodensplatte von $0,25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ der Wert **$U_{\text{equiv},bf}$ bei $0,17 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$**

¹³⁵ Vgl. ebenda, S. 7ff

¹³⁶ Vgl. ebenda, S 18

Anhang 7: Auszüge aus der Heizlastberechnung

Formblatt G1 - ausführliches Verfahren		DIN EN 12831	
Projekt-Nr. / Bezeichnung			
Gebäudedaten		Datum Seite G1	
Kenngroßen			
Gebäudetyp <input checked="" type="checkbox"/> Einfamilienhaus <input type="checkbox"/> Mehrfamilienhaus, Nicht-Wohngebäude		Gebäudelage <input type="checkbox"/> gute Abschirmung <input checked="" type="checkbox"/> moderate Abschirmung <input type="checkbox"/> keine Abschirmung	
Gebäudemassen / Speicherfähigkeit <input type="checkbox"/> leicht $C_{\text{wirk}} \quad 28895,00 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ <input type="checkbox"/> mittelschwer Optionale Angabe <input checked="" type="checkbox"/> schwer aus DIN V 4108-6		Luftdichtheit der Gebäudehülle <input checked="" type="checkbox"/> sehr dicht <input type="checkbox"/> dicht <input type="checkbox"/> wenig dicht	
Temperaturen			
Norm-Außentemperatur $\theta_e \quad -10 \text{ }^\circ\text{C}$ Jahresmittel $\theta_{m,e} \quad 9 \text{ }^\circ\text{C}$		Innentemperaturen nach <input type="checkbox"/> Norm <input checked="" type="checkbox"/> Vereinbarung siehe Formblatt V	
Geometrie			
Breite b_{Geb}	10,00 m	Geschossanzahl n	1 -
Länge l_{Geb}	11,50 m	Gebäudehöhe h_{Geb}	8,90 m
Grundfläche A_{Geb}	115,00 m ²		
Lüftung			
Luftdurchlässigkeitswert aus Gebäudetyp und Luftdichtheit der Gebäudehülle		$n_{50} \quad 1,5 \text{ h}^{-1}$	
Gleichzeitig wirksamer Lüftungswärmeanteil		$\zeta_v \quad 0,50 -$	
Wirkungsgrad des Wärmerückgewinnungssystem (Herstellerangaben)		$\eta_v \quad 0,80 -$	
Zusatz-Aufheizleistung			
Berechnung <input checked="" type="checkbox"/> raumweise <input type="checkbox"/> global Beheiztes Volumen $V_{H,\text{Geb}} \quad \text{m}^3$ Wärmeverlustkoeffizient $\Sigma_{HT,e} \quad \text{W/K}$		Absenkephase Absenkdauer $t_{\text{Ab}} \quad 2,00 \text{ h}$ Luftwechsel $n_{\text{Ab}} \quad 1 \text{ h}^{-1}$ Temperaturabfall <input type="checkbox"/> Angenommen $\Delta\theta_{\text{RH}} \quad \text{K}$	
		Aufheizphase Wiederaufheizzeit $t_{\text{RH}} \quad 2 \text{ h}$ Luftwechsel $n_{\text{RH}} \quad 1,00 \text{ h}^{-1}$	
		Wiederaufheizfaktor $f_{\text{RH}} \quad \text{W/m}^2$	

Abbildung 28: Seite G1 - Gebäudedaten

Formblatt G2 - ausführliches Verfahren							DIN EN 12831		
Projekt-Nr. / Bezeichnung			Musterhaus "Masterarbeit"						
Vereinbarungen			Datum						Seite G2
Sortierung nach				<input checked="" type="checkbox"/> Geschoss		<input type="checkbox"/> Wohneinheit			
Raum-Nr. / -Name	$\Phi_{T,e}$	Φ_T	$\Phi_{V,min}$	$\Phi_{V,inf}$	$\Phi_{V,su}$	$\Phi_{V,m,inf}$	$\Phi_{HL,Netto}$	Φ_{RH}	Φ_{HL}
1 / HWR	237,70	237,70		28,78	31,98		298,46	46,43	344,88
2 / Küche	302,03	302,03		34,43	38,25		374,71	55,53	430,24
3 / Wohn- und Esszimmer	531,47	531,47		79,75	88,61		699,83	128,65	828,48
4 / Gast	113,23	77,42		14,20	23,66		115,28	34,36	149,64
5 / WC	117,47	172,28		7,02	15,61		194,91	11,33	206,24
6 / Diele	209,15	189,66		22,64	37,74		250,04	54,79	304,83
101 / Bad	298,25	400,63		29,63	65,84		496,10	59,15	555,25
102 / Schlafen	325,14	274,32		39,66	44,06		358,04	68,64	426,68
103 / Kind 1	185,31	185,31		17,45	29,08		231,84	48,87	280,71
104 / Kind 2	271,80	271,80		29,99	33,32		335,11	53,76	388,87
105 / Kind 3	271,80	271,80		29,99	33,32		335,11	53,76	388,87
106 / Flur	166,11	114,56		19,66	32,77		166,99	49,98	216,96
Summe	3029,45	3028,96		353,20	474,24				

Abbildung 29: Seite G2 - Vereinbarungen

Anhangsverzeichnis

Formblatt R - ausführliches Verfahren										DIN EN 12831					
Projekt-Nr. / Bezeichnung					Musterhaus "Masterarbeit"										
Raum-Heizlast					Datum					Seite R					
Wohneinheit		Geschoss		OG	Raum-Nr. / -Name			102 / Schlafzimmer							
Innentemperatur		θ_{int}	20 °C		Lüftung										
Geometrie (netto)					Mindest-Luftwechsel			n_{min}	0,5 h ⁻¹						
Raumbreite		b_R	6,18 m		Luftwechselrate			n_{50}	1,5 h ⁻¹						
Raumlänge		l_R	3,00 m		Koeffizient Abschirmklasse			e	0,03 -						
Raumfläche		A_R	18,54 m ²		Höhe über Erdreich			h	0,00 m						
Geschosshöhe		h_G	2,75 m		Höhen-Korrekturfaktor			ϵ	1 -						
Deckendicke		d	0,25 m		Zuluft-Volumenstrom			V_{SU}	21,60 m ³ /h						
Raumhöhe		h_R	2,33 m		-Temperatur			θ_{SU}	14 °C						
Raumvolumen		V_R	43,20 m ³		-Temp.-Reduktionsfaktor			$f_{V,SU}$	0,2 -						
					Abluft-Volumenstrom			V_{ex}	0,00 m ³ /h						
Erdreich					-Temperatur			$\theta_{mech,inf}$	- °C						
Tiefe unter Erdreich		z	0,00 m		-Temp.-Reduktionsfaktor			$f_{V,mech,inf}$	- -						
Erdreichberührter Umfang		P	43,00 m		Zusatzheizung:			<input type="checkbox"/>	global		<input type="checkbox"/>	Nebenrechnung			
B'-Wert		B'	5,35 m		Wiederaufheizfaktor			f_{RH}	3,46 W/m ²						

Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite	Länge / Höhe	Bruttofläche	Abzugsfläche	Nettofläche	grenz an	angrenzende Temperatur	Korrekturfaktor	U-Wert	Korrekturwert Wärmebrücken	Korrigierter U-Wert	Wärmeverlust-Koeffizient	Transmissions-Wärmeverlust		
																n	b
			0,00 m		0,00 m ²			g / b	°C	$f_{s1} \times f_{s2} \times G_w$	0,00 W/m ² K			W/K	W		
Ö	AW	1	6,34	2,50	15,85	1,80	14,05	e		1,00	0,130	0,05	0,18	2,53	75,87		
Ö	AF	1	1,20	1,50	1,80		1,80	e		1,00	0,800	0,05	0,85	1,53	45,90		
S	AW	1	3,40	1,00	3,40		3,40	e		1,00	0,130	0,05	0,18	0,61	18,36		
S	DS	1	3,40	2,12	7,21		7,21	e		1,00	0,200	0,05	0,25	1,80	54,06		
H	DE	1	3,00	5,82	17,46		17,46	e		1,00	0,200	0,05	0,25	4,37	130,95		
N	IW	1	4,40	2,75	12,10		12,10	ij	24,00	-0,13	1,000	0,05	1,05	-1,69	-50,82		
							Hte	325,14									
					Summe		43,92										
Transmissionswärmeverlust												H_T / Φ_T		H_T	9,14	Φ_T	274,32
Mindest-Luftwechsel										V_{min}							
natürliche Infiltration										V_{inf}	3,89 m ³ /h		39,66				
mechanischer Zuluftstrom										$V_{Zul,mech}$	4,32 m ³ /h		44,06				
Abluftvolumenüberschuss										$V_{mech,inf} + V_{mech,inf}$							
Thermisch wirksamer Luftvolumenstrom										V_{therm}	8,21 m³/h						
Lüftungswärmeverlust												H_V / Φ_V		H_V	2,79	Φ_V	83,72
Netto-Heizlast												$\Phi_{HL,Netto}$		spez. 19,31 W/m ²	spez. 8,29 W/m ²	358,04	
Zusatz-Aufheizleistung												Φ_{RH}	64,21				
Norm-Heizlast												Φ_{HL}	422,25				

Abbildung 30: Berechnung der Raum-Heizlast, Beispielraum Schlafzimmer

Anhang 8: Anteile Heizsysteme bei Neubauten

a) Primäre Heizsysteme

Jahr	Anzahl Wohngebäude (abzgl. Fernwärme)	Öl	Gas	Wärmepumpe	Holz (bis 2010 unter „sonstige“)	Solarthermie	Sonstige
1993	162.247	33,3%	63,6%	0,1%	0,0%	0,0%	3,1%
1994	208.300	33,1%	64,4%	0,1%	0,0%	0,0%	2,4%
1995	203.093	30,8%	66,9%	0,1%	0,0%	0,0%	2,3%
1996	185.756	29,1%	68,7%	0,1%	0,0%	0,0%	2,1%
1997	212.466	24,8%	69,2%	0,2%	0,0%	0,0%	5,8%
1998	215.832	23,1%	70,9%	0,3%	0,0%	0,1%	5,7%
1999	229.014	20,7%	72,8%	0,4%	0,0%	0,1%	6,1%
2000	211.608	20,3%	76,8%	0,7%	0,0%	0,1%	2,2%
2001	170.755	18,0%	77,6%	1,1%	0,0%	0,2%	3,2%
2002	158.290	16,7%	76,7%	2,0%	0,0%	0,3%	4,5%
2003	151.775	14,3%	79,0%	2,5%	0,0%	0,3%	4,2%
2004	163.451	13,1%	79,5%	3,2%	0,0%	0,3%	4,2%
2005	139.219	12,4%	78,4%	4,3%	0,0%	0,3%	4,9%
2006	139.421	8,9%	75,9%	8,4%	0,0%	0,4%	6,9%
2007	114.964	7,4%	69,6%	14,4%	0,0%	0,5%	8,7%
2008	90.164	6,1%	66,5%	19,3%	0,0%	0,6%	8,1%
2009	78.082	4,4%	60,0%	26,5%	0,0%	0,9%	9,1%
2010	79.646	3,4%	55,7%	30,6%	0,0%	0,9%	10,3%
2011	90.727	2,6%	56,0%	31,2%	4,3%	0,7%	5,9%
2012	94.079	2,0%	56,1%	32,3%	5,2%	0,6%	4,3%
2013	95.959	2%	54,5%	34,6%	5,4%	0,7%	3,7%

Tabelle 54: Marktanteile Heizsysteme an Neubauten (exkl. Fernwärme), Quelle: Destatis (2014)

b) Sekundäre Heizsysteme (ab 2011)

Jahr	Sekundäres Heizsystem Anzahl Wohngebäude mit sekundärem Heizsystem	Anteil Gebäude mit sekundärem Heizsystem	Prozentualer Anteil an Gesamtwohnungsneubau					
			Solarthermie	Holz	Wärmepumpe	Erdgas	Strom	sonstige
2011	32.411	35,7%	21,3%	9,4%	1,4%	0,9%	1,7%	1,1%
2012	41.858	44,5%	24,8%	13,0%	1,4%	1,3%	2,8%	1,5%
2013	42.461	44,2%	20,1%	16,2%	1,0%	0,8%	4,9%	1,1%

Tabelle 55: Marktanteile sekundäre Heizsysteme, Quelle: Destatis (2014)

Anhang 9: Marktentwicklung Pelletheizungen / Pelletpreise

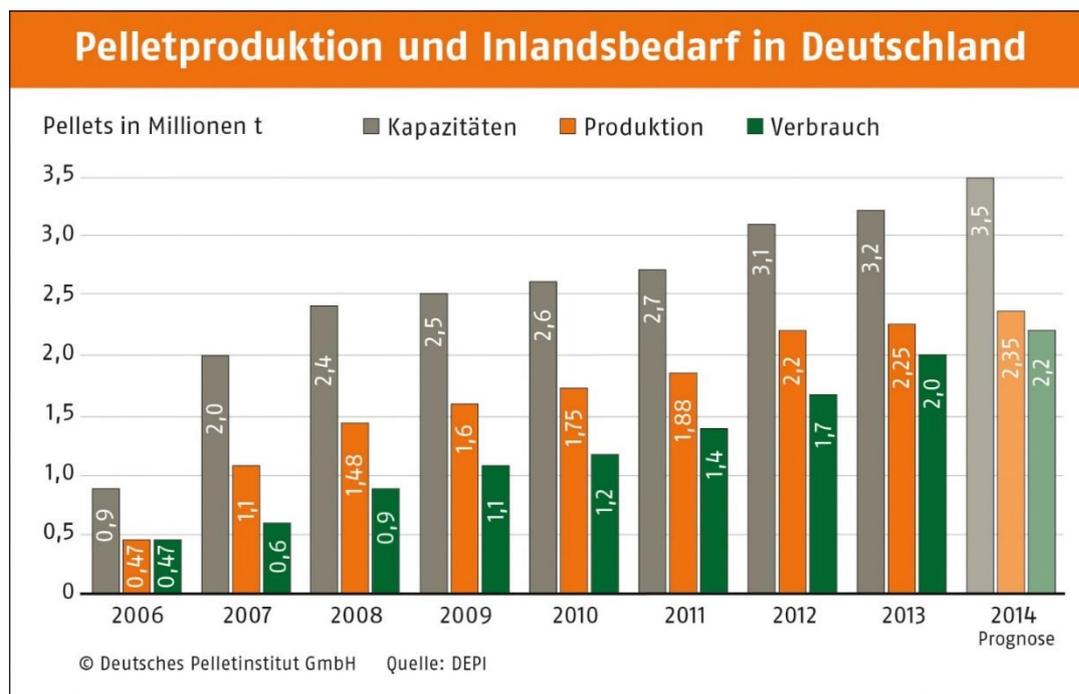


Abbildung 31: Pelletproduktion und Verbrauch in Deutschland, Quelle: DEPI (2014)

Preisentwicklung bei Holzpellets										
Lieferung im Umkreis von 50 Kilometer (alles inklusive)										
Liefermenge	Euro pro Tonne					Euro pro MWh				
	Sackware	2 Tonnen	5 Tonnen	10 Tonnen	20 Tonnen	Sackware	2 Tonnen	5 Tonnen	10 Tonnen	20 Tonnen
2002			183,17					37,38		
2003			182,92					37,33		
2004			177,19					36,16		
2005		204,94	177,35	167,53	161,29		41,82	36,19	34,19	32,92
2006		244,07	216,10	205,54	199,07		49,81	44,10	41,95	40,63
2007	270,49	238,04	204,47	196,08	188,95	55,20	48,58	41,73	40,02	38,56
2008	267,99	222,08	193,21	184,82	177,41	54,69	45,32	39,43	37,72	36,21
2009	291,58	251,71	224,06	215,05	208,35	59,51	51,37	45,73	43,89	42,52
2010	291,68	256,11	228,45	218,77	211,89	59,53	52,27	46,62	44,65	43,24
2011	297,94	268,91	241,41	231,05	224,38	60,80	54,88	49,27	47,15	45,79
2012	298,52	270,45	242,58	231,86	224,49	60,92	55,19	49,51	47,32	45,81
2013	327,57	304,54	277	265,1	257,65	66,85	62,15	56,53	54,1	52,58
2014	324,58	291,71	264,45	252,93	244,88	66,24	59,53	53,97	51,62	49,98

Abbildung 32: Preisentwicklung Pellets, Quelle: C.A.R.M.E.N. (2015)

Anhang 10: Erdwärmenutzung – Abschätzung LBEG



Landesamt für
Bergbau, Energie
und Geologie

Geothermie - geht das bei mir?

Standort:

Ost: 32556980

Nord: 5909928

Gemeinde: Buchholz i.d. Nordheide

Haustyp: Passivhaustandard
KfW 40, Passiv,- Effizienzhaus 55

Wohnfläche: 160 qm

Kollektor

Der Standort Ihres Gebäudes ist für einen Erdwärmekollektor geeignet. Die Entzugsleistung bei 1800 Jahresbetriebsstunden der Heizung beträgt ca. 20-30 W/qm.

Der Bau einer Erdwärmekollektoranlage ist an diesem Standort unter Beachtung folgender Bedingung möglich:

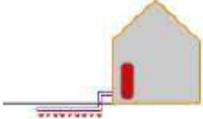
- Der Einbau muss mindestens 1 m oberhalb des höchsten Grundwasserspiegels erfolgen oder oberhalb bindiger Schichten (Schichtdicke ≥ 2 m) über dem genutzten Grundwasserleiter.

Kollektorfläche:

Bezogen auf die aus energetischer Sicht vertretbare Wärmeentzugsleistung aus dem Boden sollte für Ihren Haustyp und Ihre beheizte Wohnfläche die abgeschätzte notwendige Kollektorfläche ca. 110 qm bis 170 qm betragen.

Kosten (ca.):

Nach einer Preiserhebung in 2010 bei ausgewählten niedersächsischen Anbietern betragen die Kosten ca. 20 € - 25 € pro qm (bezogen auf den Bau eines 300 qm großen Kollektors mit einem Standard-Flächenkollektor). Die Kosten beziehen sich auf Standardbedingungen. Besondere Bauhindernisse, Schwierigkeiten bei der Baustelleneinrichtung etc. wurden nicht berücksichtigt. Unter der Berücksichtigung Ihres Standortes Ihres Gebäudes und Ihrer Wohnfläche bzw. Ihres Energieverbrauchs berechneten Kollektorfläche müssen Sie mit Kosten von ca. 2800 € bis 3400 € rechnen.



Sonde

Der Bau einer Erdwärmesondenanlage ist an diesem Standort unter Beachtung folgender Bedingungen möglich:

- Der Abstand zur Grundstücksgrenze von 5m, sowie die im Leitfaden aufgeführten Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb von Erdwärmesondenanlagen sind einzuhalten.

Sondenmeter:

Bezogen auf die aus energetische Sicht vertretbare Wärmeentzugsleistung aus dem Untergrund bis in eine Tiefe von 100m sollten für Ihren Haustyp und Ihre beheizte Wohnfläche insgesamt ca: 70 bis 80 Meter Doppel U-Sonden verwendet werden.

Diese aufsummierten Meter Sondenlänge können auf eine oder mehrere Sonden aufgeteilt werden. Gemäß VDI 4640 sollte eine Sondenlänge von 40m nicht unterschritten werden. Vom Anlagenplaner ist zu empfehlen, ob kürzere oder längere Sonden an Ihrem Standort energetisch günstiger sind.

Kosten (ca.):

Nach einer Preiserhebung im Juni 2010 bei ausgewählten niedersächsischen Bohrfirmen betragen die Kosten bei Sand- und Lehmboden (Lockergestein) ca. 48 € - 60 € pro Meter (1./3. Quartil). Bei Bohrungen im Fels (Festgestein Bodenklassen 6 und 7) betragen die Kosten ca. 58 € bis 67 € pro Meter. Die Meterpreise sind bezogen auf den Bau zweier 100m langen Sonden, pro Meter Bohrung, mit Ausbau zu einer Standard Doppel-U-Sonde. Die Kosten beziehen sich auf Standardbedingungen. Besondere Bohrhindernisse, Schwierigkeiten bei der Baustelleneinrichtung etc. wurden nicht berücksichtigt. Der Meterpreis wurde mit der für Ihren Gebäudebedarf ermittelten Sondenmeterlänge multipliziert.

Bei den für Ihren Standort und Haustyp/Wohnfläche berechneten Sondenmetern müssen Sie mit Kosten für die Sondenanlage von ca. 3400 € bis 4200 € bei Sand- und Lehmboden (Lockergestein) rechnen.

Bei Fels (Festgestein Bodenklassen 6 und 7) müssen Sie mit Kosten für die Sondenanlage von 4100 € bis 4700 € rechnen.

Abbildung 33: Beurteilung Bodennutzung für Erdwärme, Quelle: <http://nibis.lbeg.de/geothermie/>

Anhang 11: Erdgasreserven

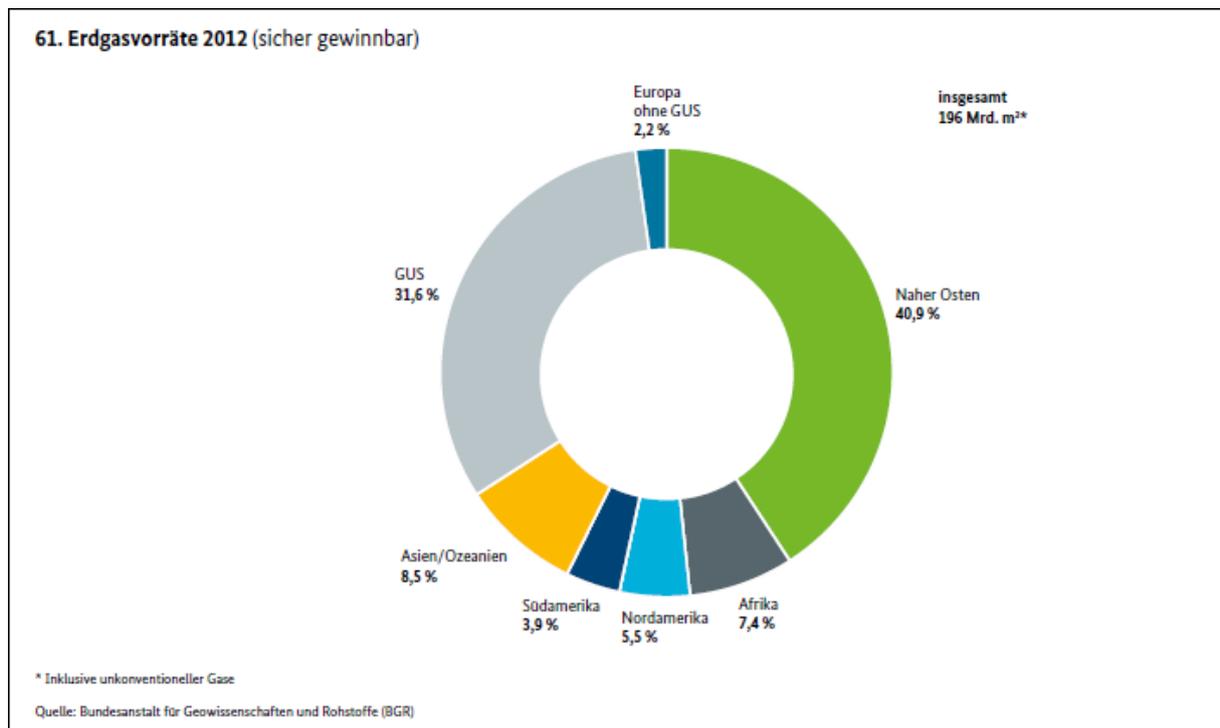


Abbildung 34: Verteilung Erdgasvorräte, Quelle: BGR (2014, S. 38)

Anhang 12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

In den folgenden Tabellen werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen aus Kapitel 5.5.3 detailliert dargestellt:

Szenario: KLEIN	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamtergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamtkosten	Bewertung	Gesamtkosten	Bewertung	
Heizungssystem						
Erdgas	5,1	25.532 €	9,0	32.246 €	9,5	14,35
Pellets	7,4	32.920 €	4,0	40.349 €	6,0	13,15
Luft-Wärmepumpe	5,75	26.316 €	8,5	31.975 €	10,0	15,5
Sonde-Wärmepumpe	6,65	30.730 €	6,0	35.705 €	8,0	14,15
Erdkollektor-WP	6,3	27.963 €	7,5	33.254 €	9,0	15,05
Erdgas-Solarthermie	7,15	28.724 €	7,0	34.314 €	8,5	14,9
Pellets-Solarthermie	8,1	36.044 €	2,0	42.318 €	5,0	12,1
Luft-WP + PV	7,1	25.971 €	8,5	31.034 €	10,0	17,1
Sole-WP + PV	8,3	29.943 €	6,5	34.145 €	9,0	16,55
Erdkollektor-WP + PV	7,8	27.246 €	8,0	31.788 €	10,0	17,3
Erdgas-Ads.-WP	6,3	27.745 €	6,5	33.904 €	9,0	14,55
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	7,15	32.262 €	5,5	37.867 €	7,0	13,15

Szenario: GROSS	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamtergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamtkosten	Bewertung	Gesamtkosten	Bewertung	
Heizungssystem						
Erdgas	3,4	30.072 €	7,0	38.745 €	6,5	9,65
Pellets	6,7	37.763 €	2,0	47.282 €	3,0	9,2
Luft-Wärmepumpe	4,3	30.837 €	6,5	38.446 €	7,0	11,05
Sonde-Wärmepumpe	5,7	34.416 €	4,5	40.981 €	5,5	10,7
Erdkollektor-WP	5,1	31.940 €	6,0	38.946 €	6,5	11,35
Erdgas-Solarthermie	5,45	33.051 €	5,5	40.507 €	6,0	10,7
Pellets-Solarthermie	7,4	40.851 €	1,0	49.199 €	2,0	8,9
Luft-WP + PV	5,9	30.343 €	7,0	37.271 €	7,5	13,15
Sole-WP + PV	7,35	33.285 €	5,0	38.911 €	6,5	13,1
Erdkollektor-WP + PV	6,85	31.002 €	6,5	37.148 €	7,5	13,85
Erdgas-Ads.-WP	4,85	31.736 €	6,0	39.617 €	6,5	10,6
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	5,7	36.515 €	3,0	43.956 €	4,5	8,95

Anhangsverzeichnis

Szenario: PASSIV	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamtergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamtkosten	Bewertung	Gesamtkosten	Bewertung	
Heizungssystem						
Erdgas	5,1	26.184 €	9,5	33.180 €	9,0	13,85
Pellets	7,15	33.341 €	5,0	40.952 €	5,5	12,4
Luft-Wärmepumpe	5,75	26.752 €	9,5	32.598 €	9,5	15,25
Sonde-Wärmepumpe	6,65	31.299 €	6,5	36.519 €	7,5	13,65
Erdkollektor-WP	6,3	28.536 €	8,0	34.073 €	9,0	14,8
Erdgas-Solarthermie	7,15	29.274 €	7,5	35.101 €	8,5	14,65
Pellets-Solarthermie	7,85	36.453 €	3,0	42.904 €	5,0	11,85
Luft-WP + PV	7,35	26.227 €	9,5	31.393 €	10,0	17,1
Sole-WP + PV	8,3	30.384 €	7,0	34.769 €	8,5	16,05
Erdkollektor-WP + PV	7,8	27.763 €	8,5	32.524 €	9,5	16,8
Erdgas-Ads.-WP	6,3	28.330 €	8,5	34.741 €	8,5	14,3
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	7,15	33.020 €	5,5	38.953 €	6,5	12,65

Szenario: EnEV	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamtergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamtkosten	Bewertung	Gesamtkosten	Bewertung	
Heizungssystem						
Erdgas	3,15	30.799 €	7,0	39.785 €	6,0	9,15
Pellets	6,7	39.106 €	2,0	49.204 €	2,0	8,7
Luft-Wärmepumpe	4,05	31.995 €	6,0	40.103 €	6,0	10,05
Sonde-Wärmepumpe	5,45	34.918 €	4,0	41.699 €	5,5	10,2
Erdkollektor-WP	5,1	32.568 €	5,5	39.845 €	6,0	10,85
Erdgas-Solarthermie	5,2	33.884 €	5,0	41.700 €	5,5	9,95
Pellets-Solarthermie	7,4	42.206 €	1,0	51.138 €	1,0	8,4
Luft-WP + PV	5,65	31.827 €	6,0	39.404 €	6,5	11,9
Sole-WP + PV	7,35	33.917 €	5,0	39.821 €	6,0	12,85
Erdkollektor-WP + PV	6,6	31.816 €	6,0	38.319 €	7,0	13,1
Erdgas-Ads.-WP	4,6	32.345 €	6,0	40.488 €	6,0	10,1
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	5,45	37.603 €	2,0	45.513 €	3,0	7,45

Anhangsverzeichnis

Szenario: BIOGAS	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamtergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamtkosten	Bewertung	Gesamtkosten	Bewertung	
Heizungssystem						
Erdgas	6,15	29.821 €	7,5	38.386 €	7,0	13,4
Pellets	7,05	35.124 €	4,0	43.504 €	4,5	11,3
Luft-Wärmepumpe	5,15	28.316 €	8,5	34.837 €	8,5	13,65
Sonde-Wärmepumpe	6,3	32.380 €	6,0	38.066 €	7,0	12,8
Erdkollektor-WP	5,95	29.741 €	7,5	35.798 €	8,0	13,7
Erdgas-Solarthermie	7,5	32.154 €	6,0	39.223 €	6,5	13,75
Pellets-Solarthermie	7,75	38.228 €	2,0	45.445 €	3,0	10,25
Luft-WP + PV	6,75	27.884 €	8,5	33.762 €	9,0	15,5
Sole-WP + PV	7,95	31.397 €	6,5	36.217 €	8,0	15,2
Erdkollektor-WP + PV	7,45	28.925 €	8,0	34.184 €	9,0	15,95
Erdgas-Ads.-WP	6,75	31.702 €	6,0	39.568 €	6,5	13
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	7,5	35.560 €	4,0	42.588 €	5,0	12

Szenario: Ökostrom	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamtergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamtkosten	Bewertung	Gesamtkosten	Bewertung	
Heizungssystem						
Erdgas	5,25	27.822 €	8,5	35.525 €	8,0	13
Pellets	7,8	35.753 €	3,0	44.405 €	4,0	11,3
Luft-Wärmepumpe	9,2	29.782 €	7,5	36.936 €	7,5	16,7
Sonde-Wärmepumpe	9,6	33.647 €	5,0	39.880 €	6,0	15,1
Erdkollektor-WP	9,5	31.034 €	6,5	37.650 €	7,0	16,25
Erdgas-Solarthermie	7,3	31.368 €	6,5	38.097 €	7,0	13,55
Pellets-Solarthermie	8,5	38.926 €	2,0	46.444 €	3,0	11
Luft-WP + PV	9,35	30.211 €	7,0	37.094 €	7,5	16,6
Sole-WP + PV	9,75	33.248 €	5,0	38.866 €	6,5	15,5
Erdkollektor-WP + PV	9,65	30.964 €	6,5	37.102 €	7,5	16,65
Erdgas-Ads.-WP	6,7	30.214 €	7,0	37.439 €	7,5	13,45
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	7,55	34.939 €	4,0	41.699 €	5,5	12,65

Anhangsverzeichnis

Szenario: Inflation Allgemein (4%)	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamt- ergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamt- kosten	Bewer- tung	Gesamt- kosten	Bewer- tung	
Heizungssystem						
Erdgas	4,5	30.731 €	7,0	42.717 €	5,0	10
Pellets	7,05	39.059 €	2,0	52.544 €	1,0	8,55
Luft-Wärmepumpe	5,15	31.377 €	6,5	41.871 €	5,5	11,15
Sonde-Wärmepumpe	6,3	35.050 €	4,0	44.199 €	4,0	10,3
Erdkollektor-WP	5,95	32.584 €	5,5	42.332 €	5,0	11,2
Erdgas-Solarthermie	6,55	33.720 €	5,0	44.083 €	4,5	10,8
Pellets-Solarthermie	7,75	41.616 €	1,0	53.229 €	1,0	8,75
Luft-WP + PV	6,75	30.349 €	7,0	39.490 €	6,5	13,5
Sole-WP + PV	7,95	33.402 €	5,0	40.880 €	5,5	13,2
Erdkollektor-WP + PV	7,45	31.126 €	6,5	39.297 €	6,5	13,95
Erdgas-Ads.-WP	5,7	32.834 €	5,5	44.013 €	4,5	10,2
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	6,55	37.239 €	3,0	47.613 €	3,0	9,05

Szenario: Inflation Strom (4%)	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamt- ergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamt- kosten	Bewer- tung	Gesamt- kosten	Bewer- tung	
Heizungssystem						
Erdgas	4,5	28.068 €	9,0	36.599 €	7,5	12,25
Pellets	7,05	36.016 €	4,0	45.554 €	3,0	10,55
Luft-Wärmepumpe	5,15	31.018 €	7,0	41.046 €	5,5	11,4
Sonde-Wärmepumpe	6,3	34.690 €	5,0	43.375 €	4,5	11,05
Erdkollektor-WP	5,95	32.225 €	6,5	41.507 €	5,5	11,95
Erdgas-Solarthermie	6,55	31.648 €	6,5	39.323 €	6,5	12,55
Pellets-Solarthermie	7,75	39.217 €	3,0	47.718 €	2,0	10,25
Luft-WP + PV	6,75	29.990 €	8,0	38.665 €	6,5	14
Sole-WP + PV	7,95	33.043 €	6,0	40.055 €	6,0	13,95
Erdkollektor-WP + PV	7,45	30.767 €	7,5	38.472 €	7,0	14,7
Erdgas-Ads.-WP	5,7	30.483 €	7,5	38.611 €	6,5	12,2
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	6,55	35.243 €	4,5	43.026 €	4,5	10,55

Anhangsverzeichnis

Szenario: Inflation Erdgas (4%)	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamt- ergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamt- kosten	Bewer- tung	Gesamt- kosten	Bewer- tung	
Heizungssystem						
Erdgas	4,5	29.000 €	8,0	38.739 €	6,5	11,25
Pellets	7,05	35.124 €	4,0	43.504 €	4,5	11,3
Luft-Wärmepumpe	5,15	28.316 €	8,5	34.837 €	8,5	13,65
Sonde-Wärmepumpe	6,3	32.380 €	6,0	38.066 €	7,0	12,8
Erdkollektor-WP	5,95	29.741 €	7,5	35.798 €	8,0	13,7
Erdgas-Solarthermie	6,55	31.691 €	6,0	39.422 €	6,5	12,3
Pellets-Solarthermie	7,75	38.228 €	2,0	45.445 €	3,0	10,25
Luft-WP + PV	6,75	27.884 €	8,5	33.762 €	9,0	15,5
Sole-WP + PV	7,95	31.397 €	6,5	36.217 €	8,0	15,2
Erdkollektor-WP + PV	7,45	28.925 €	8,0	34.184 €	9,0	15,95
Erdgas-Ads.-WP	5,7	31.026 €	6,5	39.859 €	6,0	11,45
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	6,55	35.132 €	4,0	42.772 €	5,0	10,55

Szenario: Inflation Pellets (4%)	Ökologischer Vergleich	Wirtschaftlicher Vergleich				Gesamt- ergebnis
		20 Jahre		30 Jahre		
		Gesamt- kosten	Bewer- tung	Gesamt- kosten	Bewer- tung	
Heizungssystem						
Erdgas	4,5	27.234 €	9,0	34.683 €	8,5	12,75
Pellets	7,05	37.090 €	3,0	48.020 €	2,0	9,55
Luft-Wärmepumpe	5,15	28.316 €	8,5	34.837 €	8,5	13,65
Sonde-Wärmepumpe	6,3	32.380 €	6,0	38.066 €	7,0	12,8
Erdkollektor-WP	5,95	29.741 €	7,5	35.798 €	8,0	13,7
Erdgas-Solarthermie	6,55	30.696 €	7,0	37.136 €	7,5	13,3
Pellets-Solarthermie	7,75	39.370 €	2,0	48.068 €	2,0	9,75
Luft-WP + PV	6,75	27.884 €	8,5	33.762 €	9,0	15,5
Sole-WP + PV	7,95	31.397 €	6,5	36.217 €	8,0	15,2
Erdkollektor-WP + PV	7,45	28.925 €	8,0	34.184 €	9,0	15,95
Erdgas-Ads.-WP	5,7	29.572 €	7,5	36.519 €	7,5	12,7
Erdgas-Ads.-WP + Sol.Therm	6,55	34.212 €	4,5	40.659 €	6,0	11,3

Tabelle 56: Ergebnisse Sensitivitätsanalysen detailliert