



KWK-Inno.Net Krefeld KWK-Modellkommune



Arbeitspaket 3.3

*Ökonomische und ökologische Potentialanalyse für Stadtgebiete ohne
Gasnetz mittels alternativer Brennstoffe*

C. Newiadomsky, F. Alsmeyer

Das Projekt wird gefördert von der Europäischen Union im Rahmen des Förderprogramms „Investition in Wachstum und Beschäftigung“.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ziel2.NRW

Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung



EFRE.NRW

Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

Abschlussbericht zum Förderprojekt KWK-Inno.Net Krefeld, KWK-Inno.Net Krefeld,
KWK-Modellkommune, Arbeitspaket 3.3
Krefeld, Juli 2019

Förderprojekt	KWK-Modellkommune, Phase 3 Umsetzungsphase KWK-Inno.Net Krefeld
Fördernummer	64.65-69 Kraft-Wärme-Kopplung 1053 B
Projektleitung	SWK E ² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement der Hochschule Niederrhein Prof. Dr.-Ing. Frank Alsmeyer ¹
Projektbearbeitung	Dipl.-Ing. Janine Bruchmann Charlotte Newiadomsky, M.Sc.

¹ Korrespondenzautor. E-Mail: frank.alsmeyer@hs-niederrhein.de

Vorbemerkung

Die in diesem Bericht verwendeten weiblichen Formen von Personenbezeichnungen beziehen die der Gruppe zugehörigen, männlichen Personen grundsätzlich mit ein.

Das Kompetenzzentrum SWK-Energiezentrum E² der Hochschule Niederrhein hat sich im Mai 2017 zum SWK E² – Institut für Energietechnik und Energiemanagement weiterentwickelt. In der Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern ändert sich nichts.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Untersuchungsgebiet.....	8
3	Methodik.....	10
3.1	Datengrundlagen der ökonomischen und ökologischen Analyse	11
3.1.1	Datengrundlage ökonomische Betrachtung	11
3.1.2	Datengrundlage Wärmebedarf	16
3.1.3	Datengrundlage ökologische Betrachtung	18
3.2	Berechnungen	18
3.2.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung - Kapitalwertmethode.....	18
3.2.2	Ermittlung des Brennstoffbedarfs und der CO ₂ -Emissionen.....	19
3.2.3	Ermittlung der Stromeinspeisevergütung für die Anlagenbetreiberin ..	21
3.3	Datengrundlage Brennstoffalternativen	23
3.3.1	Erdgas.....	23
3.3.2	Lokal produziertes Biogas.....	24
3.3.3	Flüssiggas	26
3.3.4	Heizöl	28
3.3.5	Holzpellets.....	30
3.3.6	Holzhackschnitzel	33
4	Ergebnisse	37
4.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht der Vermieterinnen.....	38
4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht der Mieterinnen	44
4.3	Ökologische Potentialanalyse: CO ₂ -Emissionen	47
5	Zusammenfassung	50
6	Literatur	52
7	Anhang.....	i

7.1	Übersicht der Leistungs- und Grundpreise je Energieträger und Versorgeri
7.2	Ergebnistabellen der Kapitalwertmethode aus Sicht der Mieterinnen..... ii
7.3	Ergebnisdiagramme der Kapitalwertmethode aus Sicht der Mieterinnenv

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der statistischen Bezirke mit und ohne Gasnetz (Bruchmann, Rubin und Renner 2014)	9
Abbildung 2: Kategorisierung der Wohngebäude	17
Abbildung 3: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter vor 1919.....	46
Abbildung 4: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter 1919 - 1948.....	v
Abbildung 5: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter 1949 - 1978.....	vi
Abbildung 6: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter 1979 - 1986.....	vii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittliche Kosten der Investitionen in Heizungsanlagen	14
Tabelle 2: Kalkulatorische Zinssätze für die Wirtschaftlichkeitsanalyse	15
Tabelle 3: Wärmebedarfe für unterschiedliche Baujahre und Wohnungsgrößen nach Smolka.....	20
Tabelle 4: Wirkungsgrade entsprechend der Heizungsanlage und des Brennstoffes	21
Tabelle 5: Brennstoffspezifische CO ₂ -Emissionswerte	21
Tabelle 6: Kosten Heizungsanlage mit Erdgas	24
Tabelle 7: Kosten Heizungsanlage mit Biogas	26
Tabelle 8: Kosten Heizungsanlage mit Flüssiggas	28
Tabelle 9: Kosten Heizungsanlage mit Heizöl	30
Tabelle 10: Kosten Heizungsanlage mit Holzpellets	33
Tabelle 11: Heizwerte verschiedener Baumarten in kWh/kg (LWF 2014)	34
Tabelle 12: Eigenschaften von Holzhackschnitzeln (Biomasseverband OÖ 2017) ..	35
Tabelle 13: Kosten Heizungsanlage mit Holzhackschnitzeln.....	36
Tabelle 14: Exemplarische Kapitalwerte der Investitionsalternativen für Wohngebäude mit 6 - 50 Mietwohnungen aus Sicht der Vermieterinnen; gasbefeuerte Anlagen dienen	

nur dem Vergleich und sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet; Werte sind rechnerisch ermittelt, sind aber in der dargestellten Genauigkeit nicht belastbar 40

Tabelle 15: Exemplarische Kapitalwerte der Investitionsalternativen für ein Wohngebäude mit 6 Mietwohnung à 79,4 m² aus Sicht der Vermieterinnen mit einer installierten Leistung von 50 kW; gasbefeuerte Anlagen dienen nur dem Vergleich und sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet; Werte sind rechnerisch ermittelt, sind aber in der dargestellten Genauigkeit nicht belastbar..... 41

Tabelle 16: Jährliche Stromerzeugung in MWh in einem BHKW bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs für ein 6-Parteien-Haus je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²) 43

Tabelle 17: Jährliche Gesamteinnahmen (€/MWh) durch Stromeinspeisung für ein 6-Parteien-Haus je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²) 44

Tabelle 18: Durchschnittliche Stromverbräuche je Haushaltsgröße und Einsparung der Stromkosten durch den vergünstigten Stromtarif des KWK-Inno.Net Krefeld im Vergleich zum Tarif meinSWK DIREKT Strom 47

Tabelle 19: Wärme- und Brennstoffbedarfe für BHKW und Brennwärmtank (BWK) je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²) 48

Tabelle 20: Jährliche CO₂-Emissionen [kg/a] für BHKW und BWK je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²)..... 49

Tabelle 21: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr vor 1919 ii

Tabelle 22: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr zwischen 1919 und 1948..... iii

Tabelle 23: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr zwischen 1949 und 1978..... iii

Tabelle 24: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr zwischen 1979 und 1986..... iv

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit(en)	Bedeutung
K	€	Kosten
K _v	€	Variable Kosten
K _f	€	Fixe Kosten
P _{inst}	kW	installierte Leistung

Abkürzung	Bedeutung
€	Währungszeichen für Euro
a	Jahr
AfA	Absetzung für Abnutzung
AG	Aktiengesellschaft
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BWK	Brennwertkessel
bzw.	Beziehungsweise
CH ₄	Chemisches Zeichen für Methan
CO	Chemisches Zeichen für Kohlenmonoxid
CO ₂	Chemisches Zeichen für Kohlendioxid
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien
et al.	lat.: et alii (Maskulinum), et alae (Femininum), et alia (Neutrum) für Deutsch „und andere“
etc.	et cetera
e.V.	eingetragener Verein
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe

gGmbH	Gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
inst.	installiert
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWK-G	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung
LPG	engl.: Liquefied Petroleum Gas
m ²	Einheit: Quadratmeter
N ₂ O	Chemisches Zeichen für Lachgas
NGL	engl.: Natural Gas Liquids
NO _x	Allgemeines chemisches Zeichen für Stickoxide
NRW	Nordrhein-Westfalen
SWK	Stadtwerke Krefeld
TFZ	Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe
u.a.	unter anderem
UG	Unternehmergeellschaft
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Das im Jahr 2017 novellierte Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz unterstreicht die Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) im Rahmen der Energiewende und bei der Umsetzung der politischen Energie- und Klimaziele. Die Technologie könnte auch langfristig einen festen Platz im Energiesystem haben, da auch regenerativ erzeugte Brennstoffe eingesetzt werden können. Die Studie „Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in NRW“ belegt, dass gerade Nordrhein-Westfalen (NRW) mit seinen vielfältigen Ballungsräumen im Bereich KWK über enorme Ausbaupotenziale verfügt (Eikmeier et al. 2011). Um diese Potenziale zu nutzen, hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen im Oktober 2012 die Kommunen aufgerufen, den KWK-Ausbau vor Ort zu fördern. Die Stadt Krefeld ist diesem Aufruf gefolgt und hat gemeinsam mit den Stadtwerken Krefeld (SWK AG) und dem SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement (ehemals: SWK-Energiezentrum E² der Hochschule Niederrhein, SWK E²) das Forschungsprojekt *KWK-Inno.Net Krefeld* initiiert.

Ziel des Projektes ist die Umsetzung eines virtuellen Kraftwerks aus wirtschaftlich orientiert betriebenen Mini-Blockheizkraftwerken in Krefeld und die Übertragung des Konzeptes auf weitere Kommunen in NRW. Das Konzept *KWK-Inno.Net Krefeld* wurde für Wohngebäude in Krefeld entwickelt, um Anwohnerinnen, deren Wohngebäude nicht im Fernwärmeeinzugsgebiet liegen, eine KWK-Wärmeversorgung zu ermöglichen. Die Aufgaben des SWK E² sind die Unterstützung kommunaler Entscheidungsträgerinnen bei der Identifizierung ihres KWK-Ausbaupotenzials und die ökologische und ökonomische Bewertung der geplanten Maßnahmen sowie möglicher ergänzender Technologien aus Sicht der Kundinnen.

Da für die angestrebte Umsetzung der eingeplanten KWK-Systeme Bezirke mit geringer Ausbreitung des Gasnetzes nicht betrachtet werden, wird im vorliegenden Bericht die ökologische und ökonomische Bewertung zum Einsatz alternativer Brennstoffe als Erdgas für Brennwertkessel und Blockheizkraftwerke untersucht. Hiermit können Kommunen die ökonomisch und ökologisch erzielbaren Einsparpotentiale bei der Umsetzung des Konzeptes abschätzen.

2 Untersuchungsgebiet

Da die im Konzept KWK-Inno.Net Krefeld geplante Umsetzung von dezentralen KWK-Anlagen auf einer leitungsgebundenen Gasversorgung basiert, muss für die Gebiete außerhalb des Gasnetzes auf alternative Brennstoffe zurückgegriffen werden (vgl. Kapitel 3).

Das Stadtgebiet Krefelds gliedert sich in neun Stadtbezirke. Zusätzlich gibt es insgesamt 19 Stadtteile, die in mehrere statistische Bezirke aufgeteilt sind. Aufgrund der verfügbaren Daten für die statistischen Bezirke wurden sie als Betrachtungsgebiete definiert (Bruchmann, Rubin und Renner 2014).

Abbildung 1 zeigt die statistischen Bezirke der Stadt Krefeld farblich codiert nach der Verfügbarkeit der interessierenden Energienetze: rot markiert sind Bezirke mit Fernwärmenetz, welche aus der Betrachtung des Gesamtprojektes herausgenommen werden müssen. Gelb markiert sind statistische Bezirke mit Gasnetz, hellgelb mit teilweiser Verfügbarkeit eines Gasnetzes und grau mit geringer Ausbreitung des Gasnetzes. Die Unterscheidung zwischen den hellgelben und grauen Bezirken wurde ohne ein hartes Kriterium vollzogen. Es wurde betrachtet, in welchem Umfang ein Gasnetz dort vorliegt. Sind größere, nicht flächendeckende Bereiche eines statistischen Bezirks mit einem Gasnetz verbunden, wurden diese hellgelb markiert. Eine graue Markierung erhielten die statistischen Bezirke, in denen keine oder nur kleine, lokale Gasnetze zur Verfügung stehen (Bruchmann, Rubin und Renner 2014).

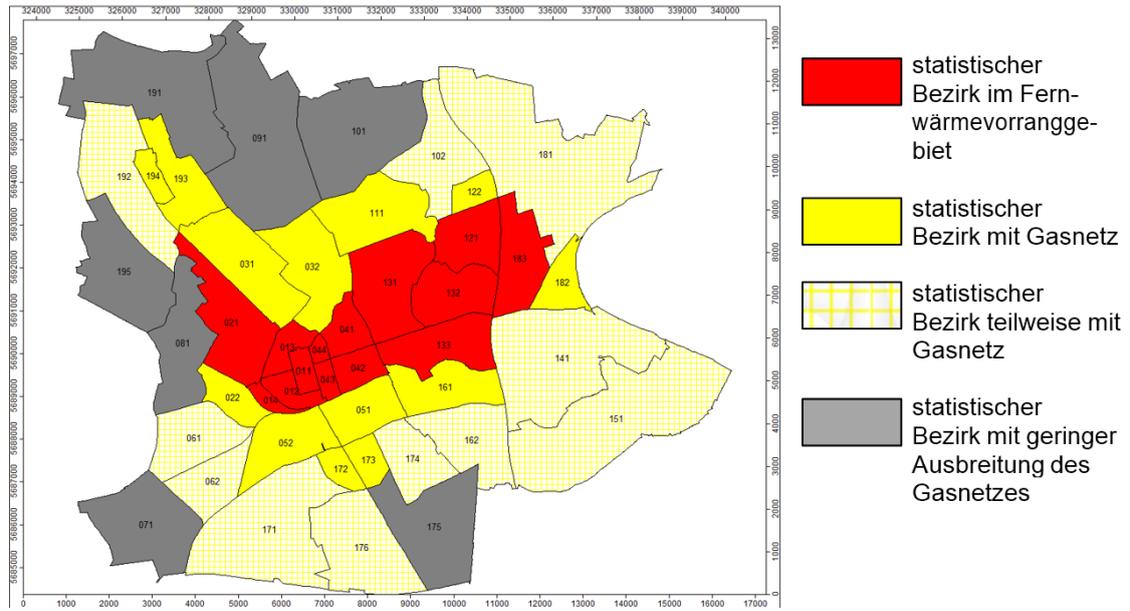


Abbildung 1: Übersicht der statistischen Bezirke mit und ohne Gasnetz (Bruchmann, Rubin und Renner 2014)

3 Methodik

Für die ökonomische und ökologische Potentialanalyse für die statistischen Bezirke ohne Gasnetz werden die Kosten für die Installation, ein eventuell notwendiges Lager und den Betrieb von Anlagen mit alternativen Brennstoffen mit den Kosten für die konventionellen (erdgasbetriebenen) Anlagen verglichen. Für die ökologischen Untersuchungen werden die CO₂-Emissionen der alternativen Brennstoffe unter Einbeziehung der entsprechenden Anlagentypen mit denen des Erdgases verglichen. So kann der Unterschied einer alternativen Brennstoffversorgung analysiert werden. Anschließend lassen sich mit den Ergebnissen die ökologischen Vorteile durch die Nutzung alternativer Brennstoffe im Vergleich zu erdgasbetriebenen Anlagen in Hinblick auf die Emissionen darstellen.

Bei den untersuchten alternativen Brennstoffen zu Erdgas² handelt es sich um

1. Biogas,
2. Flüssiggas,
3. Heizöl,
4. Holzpellets und
5. Holzhackschnitzel.

Der Fokus der Analyse liegt auf diesen alternativen Brennstoffen, weil sie nicht leitungsgebunden sind und in zusätzlichen Lagertanks bzw. Lagern gespeichert werden können.

Zusätzlich zu den jeweiligen Investitionen werden die möglichen Förderungen der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie die Abschreibungszeiträume nach der Tabelle für Absetzung für Abnutzung (AfA-Tabelle) berücksichtigt (Kapitel 3.1).

Hierbei ist zu beachten, dass bei den Investitionskosten die durchschnittlichen Kosten für die notwendige Lagerinstallation angesetzt werden, die über eine umfassende Literaturrecherche ermittelt wurden. Aufgrund der gebäudespezifischen

² Im nachfolgenden Bericht werden die alternativen Brennstoffe zu Erdgas nur noch „Brennstoffalternativen“ genannt.

Gegebenheiten, der benötigten Größe des Lagers und der Art der gewünschten Brennstoffzuführung ist bei Bedarf eine individuelle Berechnung der Investitionsaufwendungen notwendig (siehe Kapitel 3.1 und 3.2).

Die Investition in die Heizungsanlagen mit Brennstoffalternativen wird mit den Kosten für eine Heizungsanlage mit Erdgasbefeuerung verglichen. Da handelsübliches Erdgas für Heizungsanlagen nur leitungsgebunden zur Verfügung steht und eine Lagerung in einem Tank nicht am Markt erhältlich ist, werden bei der Analyse für den Fall der Erdgasbefeuerung nur die reinen Investitionen für den Austausch der Heizungsanlage selbst und für die Wartung berücksichtigt. Die Kosten für die Verlegung von Leitungen zur Einbindung in das Erdgasnetz werden nicht berücksichtigt. Unterschieden wird hierbei zusätzlich zwischen dem Konzept der KWK-Inno.Net Krefeld, einer konventionellen Heizungsanlage (Brennwertkessel), die mit Erdgas von der SWK AG befeuert wird und einer konventionellen Heizungsanlage (Blockheizkraftwerk, BHKW) mit Erdgas von einem Fremdanbieter.

Da Heizungsanlagen eine Nutzungsdauer von mehr als 10 Jahren (Betrachtungszeitraum) haben, wird ein Restwert nach AfA-Abschreibungstabelle berücksichtigt³.

3.1 Datengrundlagen der ökonomischen und ökologischen Analyse

Als Datengrundlage für den Kostenvergleich der Heizungsanlagen mit Brennstoffalternativen werden die Investitionsaufwendungen der verschiedenen Anlagentypen, die Kosten für das benötigte Lager sowie die Kosten für Wartung und Brennstoffe zu Grunde gelegt.

3.1.1 Datengrundlage ökonomische Betrachtung

Die allgemeinen Kosten zur Anschaffung und Betrieb einer Brennwertheizung oder eines Blockheizkraftwerks setzen sich aus sogenannten kapitalgebundenen Kosten,

³ Steuerberaterinnen und Finanzämter haben sich bisher auf 10 Jahre Abschreibung geeinigt, allerdings gilt seit 01.01.2016 eine Abschreibung von 50 Jahren für BHKW-Anlagen, die hauptsächlich für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung genutzt werden. Das betrifft dann hauptsächlich kleine Anlagenbetreiberinnen und Hauseigentümerinnen (BHKW-Infozentrum 2015).

bedarfsgebundenen Kosten, betriebsgebundenen Kosten und Strombezugskosten zusammen (VDI 2012).

Zu den **kapitalgebundenen Kosten** gehören u.a. die Kosten der Brennwertheizung bzw. des BHKW selbst, Anschaffungskosten für zusätzliche BHKW-Module (beispielsweise Pufferspeicher, Solarthermie, Wärmepumpe etc.), hydraulische, stromseitige und abgasseitige Anschlüsse, mögliche bauliche Maßnahmen (z.B. für Lager oder Tanks) oder die Einplanung von Kosten für Unvorhergesehenes (VDI 2012).

Zu den **bedarfsgebundenen Kosten** zählt man die Brennstoffkosten der Brennwertheizung bzw. des BHKW und des Spitzenlastkessels. Da die Brennstoffkosten nicht konstant sind, werden die Kostenkalkulationen mit marktaktuellen Preisen durchgeführt, da zukünftige relative Preisänderungen nur schwer abzuschätzen sind.⁴ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Verbrauch an Brennstoff von der Art der Heizungsanlage (Art des Motors, Art der Turbine etc.), der installierten Leistung, der zu beheizenden Fläche und dem eingesetzten Brennstoff abhängt (VDI 2012).

Zu den **betriebsgebundenen Kosten** zählen die anfallenden Kosten für Wartung und Instandhaltung der Heizungsanlage (VDI 2012).

Zusätzlich können Strombezugskosten anfallen, die jedoch laut VDI 2012 in keiner der drei genannten Kategorien genannt werden.

Diese drei Kostenarten werden im Allgemeinen in fixe und in variable Kosten unterschieden. Die fixen Kosten sind die kapitalgebundenen Kosten, die variablen Kosten sind die bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten.

Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen betriebsgebundenen variablen und fixen Kosten der unterschiedlichen Heizungsanlagen, die für die wirtschaftliche Analyse und zum Vergleich herangezogen werden und im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche ermittelt wurden. Alle Brennstoffe sind für Brennwertkessel und

⁴ Die Preisentwicklungen der letzten Jahre für die einzelnen Brennstoffe werden in den jeweiligen Kapiteln kurz erläutert.

BHKW aufgeführt, mit Ausnahme der Holzhackschnitzel, für die nur Brennwertkessel verfügbar sind. Da es auf dem Markt keine weiteren Anbieter von BHKW mit Holzhackschnitzelbefeuern für Mehrfamilienhäuser gibt, wird diese Art Heizungsanlagen nicht weiter in der Betrachtung berücksichtigt.

Auffällig ist hierbei, dass laut Literatur die variablen Kosten für Blockheizkraftwerke geringer ausfallen als für Brennwertkessel, da dies von den Autoren genau anders herum erwartet wurde.

Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass in Tabelle 1 für den biogasbetriebenen Brennwertkessel die Werte analog zum erdgasbetriebenen Brennwertkessel angenommen werden, da das am Markt angebotene Biogas häufig mit Erdgas vermischt wird (oft im Verhältnis 1:9 für Biogas:Erdgas (Kessler 2019)). Brennwertkessel für den Erdgasbetrieb sind ohne Probleme einstellbar für den Biogasbetrieb, die meisten Brennwertkessel-Anbieter haben bereits serienmäßig die Möglichkeit eingebaut, mit wenigen Handgriffen die Umstellung vornehmen zu können. In dieser Studie wird bei den Anlagen mit Biogasbetrieb von 100% Biogas ausgegangen und entsprechend gerechnet.

Tabelle 1: Durchschnittliche Kosten der Investitionen in Heizungsanlagen

Heizungsanlage	Betriebsgebundene, variable Kosten [€/kW _{inst}]	Fixkosten [€]
gasbetriebener Brennwertkessel (Erdgas)	409 ⁽¹⁾	8.000 ⁽²⁾
gasbetriebener Brennwertkessel (Flüssiggas)	813 ⁽³⁾ (davon 786 € /Jahr und 270 € / 10 Jahre)	18.300 ⁽⁴⁾
gasbetriebener Brennwertkessel (Biogas) [analog Erdgasbefuerung]	409 ⁽¹⁾	8.000 ⁽²⁾
Brennwertkessel (Heizöl)	409 ⁽⁵⁾	15.234 ⁽⁶⁾
Brennwertkessel (Holzpellets)	389 ⁽⁷⁾	35.786 ⁽⁸⁾
Brennwertkessel (Holzhackschnitzel)	783 ⁽⁹⁾	38.036 ⁽¹⁰⁾
BHKW (Erdgas)	234 ⁽¹¹⁾	63.691 ⁽¹¹⁾
BHKW (Flüssiggas)	226 ⁽¹¹⁾	68.026 ⁽⁴⁾
BHKW (Biogas)	260 ⁽¹¹⁾	75.158 ⁽¹¹⁾
BHKW (Heizöl)	238 ⁽¹¹⁾	52.532 ⁽¹¹⁾
BHKW (Holzpellets)	389 ⁽¹²⁾	42.858 ⁽¹³⁾
Quellen: (1) Anondi GmbH 2019; (2) Braun 2019; energieheld GmbH 2018a; Kesselheld GmbH 2018b; (3) Kesselheld GmbH 2018a; easyHeizung GmbH 2018a; FNR 2018; (4) easyHeizung GmbH 2018a; Energie-Experten.org 2018; Kesselheld GmbH 2018a; (5) energieheld GmbH 2018c; (6) Bosch Thermotechnik GmbH 2018; energieheld GmbH 2018c; Nguyen 2019; (7) energieheld GmbH 2018b; (8) TFZ 2018; ÖkoFEN 2018; BHKW-Infozentrum 2015; B-H2 Internet Media 2015; Arnoneit 2018; energieheld GmbH 2018b; FNR 2018; easyHeizung GmbH 2018b; (9) TFZ 2018; (10) TFZ 2018; FNR 2018; (11) ASUE und BHKW-Infozentrum 2014; (12) BHKW-Infozentrum 2015; ÖkoFEN 2018; energieheld GmbH 2018b, (13) B-H2 Internet Media 2015; Arnoneit 2018; energieheld GmbH 2018b; FNR 2018; easyHeizung GmbH 2018b		

Als weitere Datengrundlage werden für die ökonomische Analyse der Brennstoffalternativen die benötigten kalkulatorischen Zinssätze für unterschiedliche Sparanlagen zu Grunde gelegt (siehe Tabelle 2). Diese Werte werden in der Analyse mit der Kapitalwertmethode für die Abzinsungsberechnung benötigt.

Tabelle 2: Kalkulatorische Zinssätze für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

Zinssatz	Sparanlage
2,02 %	10-jährige Bundesanleihe
4,64 %	Maximum in den letzten 10 Jahren der 10-jährigen Bundesanleihe
-0,16 %	Minimum in den letzten 10 Jahren der 10-jährigen Bundesanleihe
3,28 %	Sparbrief über 10 Jahre
4,66 %	Maximum in den letzten 10 Jahren des Sparbriefs über 10 Jahre
1,07 %	Minimum in den letzten 10 Jahren des Sparbriefs über 10 Jahre
6,00 %	unternehmerischer interner Zinssatz der Betreiberin, nur für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht der Betreiberin
Quelle: FMH-Finanzberatung 2019	

Weitere benötigte Daten für die ökonomische Analyse sind die Abschreibungszeiträume der einzelnen Heizungsanlagen nach AfA-Tabelle. Mögliche Förderungen der KfW, der BAFA und des BMWi für die entsprechenden Heizungsanlagen werden später übersichtlich dargestellt, werden aber in die ökonomische Analyse nicht weiter berücksichtigt, da gebäude- und heizungsspezifische Angaben hierfür erforderlich sind.

Die Abschreibungszeiträume der Heizungsanlagen und zugehöriger Bauteile nach AfA-Tabelle (Bundesministerium der Finanzen 2000) betragen

- 10 Jahre für Kraft-Wärmekopplungsanlagen (Blockheizkraftwerke) (siehe Punkt 3.1.4 in der AfA-Tabelle),
- 15 Jahre für die Heizkessel (siehe Punkte 3.1.9 in der AfA-Tabelle) und
- 25 Jahre für Brennstofftanks (siehe Punkt 3.10.3 in der AfA-Tabelle).

Bei den Berechnungen wurde die Umlage auf die Mieterinnen (und damit die Mietmehreinnahmen) berücksichtigt. Laut § 559 Mieterhöhung nach Modernisierungsmaßnahmen (Deutscher Bundestag 2018) dürfen jährlich 11% der Investitionskosten auf die Jahresmiete umgelegt werden. Da jedoch eine Mieterhöhung nach § 559 immer eine Einzelfallentscheidung ist, wurde bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass eine Mieterhöhung nur wie bei einer modernisierenden Instandhaltung erfolgen kann. Von den auf die Kaltmiete umlagefähigen Gesamtkosten der Maßnahme müssen hierfür die Kosten abgezogen werden, die für eine reine Erhaltungsmaßnahme der Heizungsanlage aufgewendet werden müssten (Deutscher Bundestag 2018). Hierbei sind die Kappungsgrenze

(Miete darf sich innerhalb von drei Jahren nicht um mehr als 20 % erhöhen) und / oder der Mietspiegel zu beachten (Hundt 2017).⁵

Die Berechnung der Mieterhöhung bei einer modernisierenden Instandhaltung erfolgt im Allgemeinen nach folgender Gleichung:

$$\text{Umlage auf die Kaltmiete} = \text{umlagefähige Kosten} - \text{Kosten zur Erhaltung der alten Heizungsanlage}$$

Bei den durchgeführten Berechnungen wird von einer Umlage in der vollen Höhe von 11% der umlagefähigen Gesamtkosten der Maßnahme ausgegangen, da angenommen wird, dass die bestehende Heizungsanlage nicht weiter erhalten werden kann. Gleichzeitig wird darauf geachtet, dass die o.g. Kappungsgrenzen nicht überschritten werden.

Da im Rahmen der Untersuchungen nicht von den bestehenden Kaltmieten ausgegangen werden konnte (fehlende Datengrundlage), wurden für die Berechnung der Investitionsumlage auf die Kaltmiete zunächst verschiedene Gebäudewohnflächen definiert (Newiadomsky und Alsmeyer 2017) und die entsprechende Umlage je m² Wohnfläche ermittelt. Ausgehend von den maximal 11% der umlagefähigen Gesamtkosten (s.o.) konnte so die entsprechende minimale Miete vor Installation der neuen Heizungsanlage ermittelt werden.

Bei den anschließenden Berechnungen wird vereinfachend die jährliche Grundmiete nicht erhöht, sondern für den 10-jährigen Betrachtungszeitraum als konstant angenommen.

3.1.2 Datengrundlage Wärmebedarf

Abbildung 2 zeigt die möglichen Kombinationen aus Baujahr, Anzahl der Wohneinheiten und Wohnungsgröße zur Kategorisierung der Gebäude in Abhängigkeit ihres Wärmebedarfs (Newiadomsky und Alsmeyer 2017).

⁵ Bei einer Mieterhöhung ist dabei grundsätzlich zu beachten, dass die Regelungen zur sog. „Mietpreisbremse“ (BGB §§ 556 d – 556 g) und den Regelungen über die Miethöhe (BGB §§ 557 – 561) eingehalten werden.

Nicht berücksichtigt werden die Kombinationen von mehr als 15 Wohneinheiten mit Wohnungsgrößen >100 m². Insgesamt werden demnach 528 unterschiedliche Kombinationen analysiert.

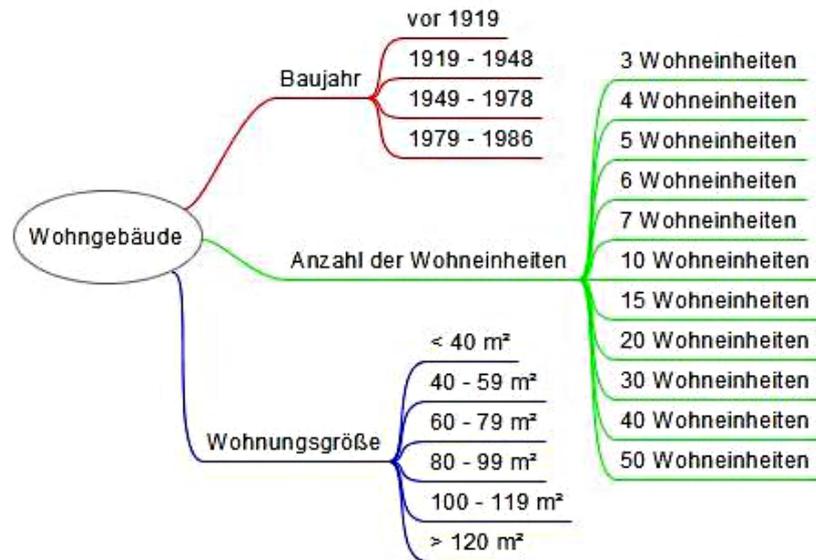


Abbildung 2: Kategorisierung der Wohngebäude

Für die Berechnung aus Sicht der Vermieterin sind u.a. die Anlagenkosten relevant. Hierzu wurden im Vorfeld über eine Bedarfsrechnung vier Heizleistungsstufen (Maximalwert, oberes Quartil, unteres Quartil und Median) ermittelt, welche sich bei den betrachteten Brennwertkesseln und den BHKWs unterscheiden (Brennwertkessel: Maximalwert 910 kW, oberes Quartil 235 kW, Median 127 kW, unteres Quartil 69 kW; BHKW: Maximalwert 182 kW, oberes Quartil 47 kW, Median 25 kW, unteres Quartil 14 kW (Bruchmann, Rubin und Renner 2014).

Für die Berechnung aus Sicht der Mieterinnen ist der Brennstoffbedarf wichtig, der eng mit dem Wärmebedarf zusammenhängt. Dazu wurde für jede Kombinationsmöglichkeit von Wohnungsgrößen und Gebäudealter (Abbildung 2) der benötigte jährliche Wärmebedarf der jeweiligen Wohnung berechnet. Für die Berechnung des jährlichen Wärmebedarfs wird der mittlere Heizwärmebedarf pro Fläche nach Baujahr der Gebäude (Smolka 2008) mit der Wohnungsgröße multipliziert. In Abhängigkeit von diesem Wärmebedarf wurden die Heizkosten inkl. der Mieterhöhung durch die Sanierungsmaßnahme in der Kapitalwertmethode berücksichtigt.

3.1.3 Datengrundlage ökologische Betrachtung

Als Datengrundlage für die ökologische Betrachtung werden die spezifischen Eigenschaften zu den Treibhausgasemissionen der Brennstoffalternativen zu Grunde gelegt, die zunächst über eine Literaturrecherche gesammelt werden. In der Analyse werden nur die Kohlenstoffdioxid (CO₂) -Emissionen bezogen auf die Nutzenergie berücksichtigt, andere umweltrelevante Emissionen wie Feinstaub oder Stickoxide werden nicht betrachtet. Die angewandte Methodik zur ökologischen Betrachtung ist in Kapitel 3.2.2 näher erläutert.

3.2 Berechnungen

3.2.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung - Kapitalwertmethode

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die Kapitalwertmethode genutzt. Diese beschreibt die Wirtschaftlichkeit einer Investition im Vergleich zur Anlageverzinsung am Kapitalmarkt. Die Berechnung der Kapitalwerte in diesem Bericht erfolgt analog zu Newiadomsky und Alsmeyer (2017).

Die Kapitalwerte sind negativ, da sich aus der Wärmeversorgung für die Vermieterin bzw. die Mieterin keine Gewinne ergeben (Newiadomsky und Alsmeyer 2017). Bei den untersuchten BHKW-Anlagen wird der erzeugte Strom von der Vermieterin komplett verkauft und nicht an die Mieterinnen weiter gegeben. Die Kapitalwerte wurden unter Berücksichtigung verschiedener Zinssätze von Sparanlagen zwischen -0,16 % und 4,66 % (Tabelle 2) berechnet. Die Ergebnisse in diesem Bericht wurden mit einem Zinssatz von 2,02 % der 10-jährigen Bundesanleihe berechnet.

Die Kosten der Investitionen setzen sich zusammen aus Anschaffungs-, Installations-, Montage- und Lagerkosten, abgebildet wird das in der Kostenfunktion $K(P_{inst})$

$$K(P_{inst}) = K_v(P_{inst}) + K_f.$$

Hierbei entspricht $K_v(P_{inst})$ den variablen Kosten in Abhängigkeit der installierten Heizleistung P_{inst} . Die Fixkosten entsprechen K_f und beinhalten die Kosten, die

unabhängig von der installierten Heizleistung auftreten (beispielsweise Verrohrungen, Inbetriebnahme oder behördliche Genehmigungen etc.).

3.2.2 Ermittlung des Brennstoffbedarfs und der CO₂-Emissionen

Die brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen werden ausgehend von den Brennstoffeigenschaften und dem jährlichen Brennstoffbedarf für ein Mehrfamilienhaus mit einer zu beheizenden Gesamtwohnfläche von 476 m² (6-Parteienhaus mit einer durchschnittlichen Krefelder Wohnungsgröße von 79,4 m² (Stadt Krefeld 2012) ermittelt. Hierbei werden die verschiedenen Brennstoffe (Erdgas, Heizöl etc.) berücksichtigt.

Tabelle 3 zeigt die jährlichen Wärmebedarfe je Baujahr und Wohnungsgröße nach Smolka (Smolka 2008). Für die Analyse ist nur der Block mit Wohnungsgrößen von 60 - 79 m² von Relevanz, da bei allen 6 Wohnungen von einer durchschnittlichen Wohnungsgröße von 79,4 m² ausgegangen wird.

Tabelle 3: Wärmebedarfe für unterschiedliche Baujahre und Wohnungsgrößen nach Smolka

Wohnungsgröße	Baujahr	Wärmebedarf [kWh / a] (nach Smolka)
< 40 m ²	< 1919	4.572
	1919 – 1948	4.650
	1949 – 1978	4.532
	1979 - 1986	2.899
40 – 59 m ²	< 1919	7.544
	1919 – 1948	7.673
	1949 – 1978	7.478
	1979 - 1986	4.783
60 – 79 m ²	< 1919	10.592
	1919 – 1948	10.773
	1949 – 1978	10.499
	1979 - 1986	6.715
80 – 99 m ²	< 1919	13.640
	1919 – 1948	13.873
	1949 – 1978	13.521
	1979 - 1986	8.648
100 – 119 m ²	< 1919	16.688
	1919 – 1948	16.973
	1949 – 1978	16.542
	1979 - 1986	10.580
>120 m ²	< 1919	19.812
	1919 – 1948	20.150
	1949 – 1978	19.639
	1979 - 1986	12.561

Ausgehend von den Wärmebedarfen werden für die verschiedenen Brennstoff- und Heizungsarten (BHKW vs. BWK) die entsprechenden Brennstoffbedarfe unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade der Heizungsanlagen (Tabelle 4) ermittelt. Bei vorhandenen Wirkungsgradspannen wurde mit dem Mittelwert gerechnet.

Tabelle 4: Wirkungsgrade entsprechend der Heizungsanlage und des Brennstoffes

Brennstoffart	Wirkungsgrad BHKW [%]		Wirkungsgrad BWK [%]
	thermisch	elektrisch	
Erdgas	49 ^a	38	96 ^e
Biogas	37-50 ^b	37-41	96 ^e
Flüssiggas	66-73 ^c	31-33	96 ^e
Heizöl	41-53 ^d	37-42	96 ^e
Holzpellets	47-55 ^e	25-30	95 ^e
Holzhackschnitzel	k.A. ^{ff}	k.A. ^f	88-90 ^g

Quellen: ^a ASUE und Stadt Frankfurt am Main - Energiereferat 2011, ^b Aschmann und Effenberger 2012, ^c (Energiewerkstatt 2019; SenerTec GmbH 2019), ^d Tippkötter 2019, ^e Burkhardt GmbH 2016, ^f keine Angabe möglich, da diese nicht mehr für Haushalte hergestellt werden (vgl. Kapitel 3.3.6), ^g FNR 2013

Anschließend wird je Brennstoff der jährliche Brennstoffbedarf mit der entsprechenden spezifischen CO₂-Emission multipliziert, so dass die Emissionswerte einander gegenüber gestellt werden können (Tabelle 5).

Daraus werden die ökologischen Belastungen in Form von CO₂-Emissionen der verschiedenen Brennstoffalternativen abgeleitet.

Tabelle 5: Brennstoffspezifische CO₂-Emissionswerte

Brennstoff	Erdgas	Biogas	Flüssiggas	Heizöl	Holzpellets	Holzhackschnitzel
CO ₂ -Emission in g/kWh	250 ^a	69 ^b	277 ^a	303 ^a	27 ^a	24 ^a

Quellen: ^a nach IINAS 2016, ^b BDEW 2017

3.2.3 Ermittlung der Stromeinspeisevergütung für die Anlagenbetreiberin

Da im AP 3.2 keine BHKW untersucht wurden, musste die dort angewandte Methode für die vorliegende Ermittlung der Kapitalwerte in AP 3.3 um die Stromeinspeisevergütung ergänzt und zusätzlich angepasst werden.

Für die Berechnung der Gesamteinnahmen durch vollständige Stromeinspeisung durch die untersuchten BHKWs werden folgende Annahmen getroffen: Entsprechend der Berechnungen zur Wirtschaftlichkeitsanalyse mit Brennwertkesseln in Arbeitspaket 3.2 (Newiadomsky und Alsmeyer 2017) wurden für die BHKWs Quartile aus den Leistungsstufen ermittelt (unteres Quartil 14 kW, Median 25 kW, oberes Quartil 47 kW und Maximalwert 182 kW) und die Berechnungen analog durchgeführt.

Da die BHKWs in den genannten Quartilen teilweise zu Überdimensionierungen der Anlagen für ein Wohngebäude mit 6 Wohnungen führen, wurde die Anzahl der Wohnungen in einem Gebäude für die Leistungsstufen mit 47 kW und 182 kW auf 12 bzw. 50 Wohnungen erhöht. So können die durchschnittlich zur Auslegung benötigten ca. 5.000 Vollbetriebsstunden pro Jahr erreicht werden und eine Überdimensionierung ist ausgeschlossen.

Für die Brennstoffe Erdöl, Flüssiggas und Heizöl wird die Vergütung nach KWK-G (Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung) mit zusätzlicher Einnahme durch vermiedene Netzentgelte in Anspruch genommen. Für die Brennstoffe Biogas und Holzpellets wird eine Vergütung nach EEG (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien) in Anspruch genommen.

Je nach Inanspruchnahme einer Vergütung nach KWK-G oder EEG werden unterschiedliche Vergütungen je MWh vergeben. Nach dem KWK-G werden vornehmlich konventionelle, fossile Brennstoffe vergütet, während das EEG nur nachhaltige Brennstoffe vergütet (Deutscher Bundestag 2017, 2015).

Für die Berechnung der Einspeisevergütung nach dem KWK-G wird für die Brennstoffe Erdgas, Flüssiggas sowie Heizöl ein KWK-Zuschlag in Höhe von 8 ct/kWh bei einem maximalen Leistungsanteil von 50 kW elektrisch vergütet. Bei größeren BHKWs verringert sich der KWK-Zuschlag stufenweise (Deutscher Bundestag 2015, § 7 Höhe des Zuschlags für KWK-Strom aus neuen, modernisierten oder nachgerüsteten KWK-Anlagen). Hinzu kommt die Vergütung nach dem KWK-Index in Höhe von derzeit (2. Quartal 2019) 3,58 ct/kWh (EEX 2019). Eine Vergütung der vermiedenen Netzentgelte beläuft sich für Krefeld mit der Netzbetreiberin NGN derzeit auf 1,27 ct/kWh (NGN Netzgesellschaft Niederrhein mbH 2017).

Für die Berechnung der Einspeisevergütung nach dem EEG wird für die Brennstoffe Biogas, Holzpellets und Holzhackschnitzel eine EEG-Vergütung in Höhe von 13,32 ct/kWh für Strom aus Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung und bis einschließlich 150 kW Leistung vergütet. Bei höherer Leistung verringert sich auch hier stufenweise die Vergütung (Deutscher Bundestag 2017, § 42 Biomasse). Hierbei ist zu beachten, dass vermiedene Netzentgelte schon in der EEG-Vergütung mit eingerechnet sind und nicht extra gezahlt werden (Conrads 2019).

3.3 Datengrundlage Brennstoffalternativen

Die Zusammensetzung der Kosten der einzelnen Heizungsanlagen mit den unterschiedlichen Brennstoffen wird im folgenden Kapitel näher erläutert. Da die Kosten für einen Schornsteinfeger immer anfallen, werden sie pauschal auf 159 € pro Jahr festgelegt (FNR 2018). Diese Kosten variieren jedoch je nach Anlagenauslegung und Brennstoff und müssten für die individuelle Berechnung nochmals separat beim örtlichen Schornsteinfeger eingeholt werden.

3.3.1 Erdgas

Heizungsanlagen im Erdgasbetrieb zählen zum Standard in Wohnungen und Häusern. Erdgas (im Fall von Krefeld L-Gas) verfügt über einen hohen Heizwert von 13,2 kWh/kg (Lendt und Cerbe 2016) und liegt damit über den Heizwerten aller betrachteten Brennstoffalternativen. Die Umstellung von L-Gas auf H-Gas erfolgt für Krefeld 2028. Zwei Jahre vor Umstellung werden die Nutzer über das Vorgehen informiert (Scholz, 2017), die Bundesnetzagentur stellt diese Information aber bereits zur Verfügung (BNetzA 2015).

Da Erdgas jedoch nur leitungsgebunden zur Verfügung gestellt werden kann, dient dieser Brennstoff nur für Vergleichszwecke, denn in der Analyse liegt der Schwerpunkt auf Brennstoffalternativen, die in Gebieten ohne oder nur eingeschränktem Anschluss an das Gasnetz zur Verfügung gestellt werden können.

Durch stetige Weiterentwicklungen sind inzwischen verschiedene Arten von Heizungsanlagen bekannt, u.a. Brennwertheizungen, BHKW aber auch Brennstoffzellenheizungen oder Gaswärmepumpen (Nguyen 2019).

Der Erdgaspreis ist seit 2014 stetig gefallen, von 7,2 ct/kWh auf 6,64 ct/kWh in der Grundversorgung. Die Preise bei Vertrags- oder Lieferantenwechsel liegen leicht unter den Preisen für die Grundversorgung (BNetzA und Bundeskartellamt 2018).

Installations-, Wartungs- und laufende Kosten

Die angesetzten Kosten für eine Heizungsanlage mit Erdgasbefeuerung werden ohne zusätzliche Kosten für die Einbindung in ein Gasnetz angegeben. Da ein Brennstofflager für Erdgas in den meisten Fällen nicht möglich ist bzw. die Errichtung unüblich ist und am Markt keine Standardlager erhältlich sind, wird von einer bereits bestehenden Anbindung an das Gasnetz ausgegangen. Aus diesem Grund werden die Kosten für ein Brennstofflager mit 0 € angesetzt.

In Tabelle 6 werden ausführlich die allgemeinen Anschaffungs- und Betriebskosten eines Brennwertkessels und eines BHKW, welche mit Erdgas betrieben werden, aufgeführt. Voraussetzung für die Betriebsführung mit Erdgas ist der bereits liegende Anschluss an das Gasnetz, so dass hierfür keine zusätzlichen Kosten entstehen.

Tabelle 6: Kosten Heizungsanlage mit Erdgas

Kosten	Brennwertkessel ^a	BHKW ^b
Fixkosten		
Heizungsanlage	5.750 €	43.900 €
Brennstofflager	0 €	0 €
Einbindung / Installation	1.250 €	19.800 €
Jährliche Kosten		
Instandhaltung	409 € ^c	234 € ^d
Gesamt	7.000 € + jährlich 409 €	63.700 € + jährlich 234 €
^a Quellen: energieheld GmbH 2018a; Kesselheld GmbH 2018b; ^b Berechnet nach ASUE und BHKW-Infozentrum (2014) mit 25 kW installierter Leistung; ^c Wartungskosten betragen 250 €, hinzu kommen weitere 159 € für den Schornsteinfeger; ^d Wartungskosten betragen 75 €, hinzu kommen weitere 159 € für den Schornsteinfeger		

3.3.2 Lokal produziertes Biogas

Biogas verfügt im Gegensatz zu herkömmlichem Erdgas nur über einen Heizwert von 5,95 kWh/kg (Erdgas mit 13,2 kWh/kg) (Erdmann und Zweifel 2010). Da der Heizwert aber stark von der Erzeugung abhängt, kann dieser auch variieren. Der hier angegebene Heizwert ist als Mittelwert für Biogas zu verstehen. Biogas wird nur in seltenen Fällen zu 100 % in einem bestehenden Gasnetz verteilt (meist handelt es sich hierbei um ein Gemisch aus Erdgas mit einem kleinen Biogas-Anteil (Czycholl, 2016), welches in der Heizungsanlage dieselben Eigenschaften aufweist wie reines Erdgas).

Da Biogas abgesehen vom Heizwert über ähnliche Stoffeigenschaften wie Erdgas verfügt, ist keine andere Brennwerttechnik notwendig und die Kosten für einen Biogas-Brennwertkessel können mit denen eines Erdgas-Brennwertkessels gleichgesetzt werden. Für den Fall, dass Biogas in direkter räumlicher Nähe produziert wird, ist eine 100%-Befeuerung der Heizungsanlagen, z.B. innerhalb eines Nahwärmenetzes, möglich.

Eine Preisentwicklung von lokal produziertem Biogas kann aus der Literatur leider nicht ermittelt werden. Wie bereits eingangs erwähnt, wird konventionelles Biogas im Mischungsverhältnis 1:9 mit Erdgas vermischt (Kapitel 3.1.1). Für die Berechnung wird von einem Grundpreis von 5,65 ct/kWh ausgegangen (Verivox 2018).

Installations-, Wartungs- und laufende Kosten

Die angesetzten Kosten für eine Heizungsanlage mit Biogasbefeuerung werden ohne zusätzliche Kosten für die Einbindung in ein Gasnetz angegeben. Da von der bereits bestehenden Anbindung an ein lokales Biogasnetz ausgegangen wird (wegen der räumlichen Nähe), werden die Kosten für ein Brennstofflager mit 0 € angesetzt.

Für einen **Brennwertkessel im Biogasbetrieb** werden dieselben Kosten wie bei einem erdgasbetriebenen Brennwertkessel angesetzt, da sich die Anlagenteile etc. nicht voneinander unterscheiden.

Nach den Berechnungen der ASUE kostet ein **BHKW im Biogasbetrieb** inklusive der Transportkosten bis Abnahme 54.900 € (ASUE und BHKW-Infozentrum 2014). Für die Einbindung und Installation des BHKW fallen Kosten in Höhe von ca. 20.200 € an, für die jährliche Wartung muss mit Kosten um 101 € gerechnet werden. Insgesamt kostet ein biogasbetriebenes BHKW entsprechend 75.259 € (ASUE und BHKW-Infozentrum 2014)⁶.

⁶ Grund für den starken preislichen Unterschied zwischen einem BHKW für Erdgas und einem BHKW für Biogas liegen an den von den Herstellern genannten Preise und Spezifikationen der jeweiligen BHKW, die in der Broschüre „BHKW-Kenndaten 2014/15“ ab S. 20 aufgeführt sind (ASUE und BHKW-Infozentrum (2014)). Die Kosten für eine ggf. notwendige Brenngasaufbereitung wurden nicht berücksichtigt, da für Biogas von einer ausreichenden Brenngasqualität ausgegangen wird (ASUE und BHKW-Infozentrum (2014), S. 14).

In Tabelle 7 werden ausführlich die allgemeinen Anschaffungs- und Betriebskosten eines Brennwertkessels und eines BHKW, welche mit Biogas betrieben werden, aufgeführt. Für den Betrieb von Biogas-Heizungsanlagen ist kein zusätzliches Lager notwendig, da Biogas für die Versorgung in städtischen Gebieten leitungsgebunden verteilt wird.

Tabelle 7: Kosten Heizungsanlage mit Biogas

Kosten	Brennwertkessel	BHKW ^a
Fixkosten		
Heizungsanlage	5.750 €	54.900 €
Brennstofflager	0 €	0 €
Einbindung / Installation	1.250 €	20.200 €
Jährliche Kosten		
Instandhaltung	409 € ^b	260 € ^c
Gesamt	7.000 € + jährlich 409 €	75.100 € + jährlich 260 €
^a Berechnet nach ASUE und BHKW-Infozentrum 2014 mit 25 kW installierter Leistung; ^b Die Wartungskosten betragen 250 €, hinzu kommen weitere 159 € für den Schornsteinfeger; ^c Die Wartungskosten betragen 101 €, hinzu kommen weitere 159 € für den Schornsteinfeger		

3.3.3 Flüssiggas

Unter dem Begriff Flüssiggas werden alle durch Kühlung oder Kompression verflüssigten Gase bezeichnet, die bei Normaldruck in gasförmigem Zustand sind. Unterschieden wird zwischen LPG (engl. Liquefied Petroleum Gas) und NGL (engl. Natural Gas Liquids). LPG sind kurzkettige Kohlenwasserstoffe wie beispielweise Propan oder Butan, während NGL alle Kohlenwasserstoffe (mit Ausnahme von Methan) enthält, die in Erdgas enthalten sind. Für Brennwertkessel und BHKW wird das LPG genutzt. Erst bei der Bereitstellung für die Heizungsanlage wird LPG wieder in seinen flüssigen Zustand versetzt (Anondi GmbH 2019). Flüssiggas verfügt über einen Heizwert von 12,87 kWh/kg und liegt damit in der selben Größenordnung wie Heizöl oder herkömmliches Erdgas.

Der Flüssiggaspreis ist von 2014 bis 2016 gefallen (von ca. 10 ct/kWh auf 5,5 ct/kWh), stieg seitdem aber wieder um 2,3 ct/kWh an (Bund der Energieverbraucher e.V. 2019).

Installations-, Wartungs- und laufende Kosten

Für die Energieversorgung mit Flüssiggas ist ein Tank notwendig, der jedoch auf unterschiedliche Weise angeschafft und installiert werden kann. Insgesamt kann zwischen einer oberirdischen Aufstellung im Freien, einer unterirdischen Einlagerung und einer Einlagerung in Räumen über Erdgleiche unterschieden werden (Tyczka Totalgaz 2018).

Eine oberirdische Aufstellung eines Flüssiggastanks ist bei einem ausreichenden Platzangebot möglich. Durch eine umgebende Bepflanzung ist zudem ein Sichtschutz möglich. Diese Lagermöglichkeit ist kostengünstig, da nur ein geringer baulicher Aufwand notwendig ist (Bodenplatte zur Aufstellung und Zuleitung ins Gebäude). Die marktüblichen Preise (nur Tank, ohne Anlieferung, Installation, Bodenplatte etc.) schwanken zwischen 1.500 und 3.000 € (co2online gGmbH 2018b; Bund der Energieverbraucher e.V. 2018).

Eine unterirdische Einlagerung ist bei privaten Grundstücken oft die bevorzugte Art der Einlagerung, da sie nur einen geringen Platzbedarf hat. Vorteil bei dieser Art der Einlagerung ist der Schutz gegen äußere Einflüsse und der Möglichkeit einer optisch harmonischeren Anpassung an die Außengestaltung. Da eine Grube für die entsprechende Tankgröße notwendig ist, sind nur geringe Bauarbeiten neben der Installation der Zuleitung in das Gebäude notwendig (Erdaushub, ohne Notwendigkeit einer Bodenplatte). Die marktüblichen Preise (nur Tank inkl. Bodenaushub, ohne Installation, etc.) liegen zwischen 2.000 und 3.500 € (co2online gGmbH 2018a). Bei einer unterirdischen Einlagerung sind von Mehrkosten in Höhe von ca. 500 € auszugehen.

Bei einer Aufstellung des Flüssiggastanks in Räumen über Erdgleiche (z.B. in oberirdischen Garagen) muss beachtet werden, dass die Räume nur von außen zugänglich sein dürfen und eine feuerbeständige Abtrennung von anderen Räumen gewährleistet ist. Auch hier liegen die marktüblichen Preise, wie bei der oberirdischen Aufstellung, zwischen 1.500 und 3.000 € (co2online gGmbH 2018a; Bund der Energieverbraucher e.V. 2018).

In Tabelle 8 werden ausführlich die allgemeinen Anschaffungs- und Betriebskosten eines Brennwertkessels und eines BHKW, welche mit Flüssiggas betrieben werden, aufgeführt.

Tabelle 8: Kosten Heizungsanlage mit Flüssiggas

Kosten	Brennwertkessel	BHKW
Fixkosten		
Heizungsanlage ^a	14.500 €	46.950 €
Brennstofflager	3.800 € ^b	3.800 € ^b
Einbindung / Installation	- ^c	17.300 €
Jährliche Kosten		
Instandhaltung	786 € + 270 € / 10 Jahre ^d	226 € ^e
Gesamt	18.300 € + jährlich 813	68.050 € + jährlich 226 €

^a Komplettpaket mit Transport, Bauarbeiten für das Fundament bzw. die Grube, Rohrgraben und Installation ohne Warmwasserspeicher (easyHeizung GmbH 2018a; Energie-Experten.org 2018).
^b Preis gilt für einen Tank (inkl. Installation) der Größe ab 200 m² bzw. 4.850 Liter (Kesselheld GmbH 2018a).
^c Da bei der Heizungsanlage bereits die Kosten für die Einbindung / Installation mit angegeben sind, werden diese Kosten an dieser Stelle nicht erneut angegeben.
^d Die Wartungskosten betragen 786 € (davon 159 € Schornsteinfeger), hinzu kommen weitere 270 € alle 10 Jahre für eine Wasserdruckprüfung durch den TÜV und zusätzliche Gastankreinigungskosten (100 € / 2 Jahre für oberirdische Gastanks und 150 € / 5 Jahre für unterirdische Gastanks)
^e Die Wartungskosten betragen 67 € und 159 € für den Schornsteinfeger

3.3.4 Heizöl

Heizöl hat einen Brennwert von 12,6 kWh/kg. Der Anteil von Heizöl am Wärmemarkt liegt bei ca. 30% (Institut für Wärme und Oeltechnik 2018). Am Markt sind unterschiedliche Arten von Heizöl erhältlich, für Heizungsanlagen nutzt man aber das sogenannte „extra leichtflüssige“ (EL) Heizöl. Dieses wird laut Heizölnorm (DIN 51603-1 und DIN SPEC 51603-6) nochmal in drei weitere Kategorien unterteilt: Standardheizöl EL, schwefelarmes Heizöl EL und alternatives bzw. Bioheizöl.

Der Heizölpreis in Deutschland ist im Zeitraum von 2012 bis 2016 stetig gefallen (von 88,1 ct/l auf 48,9 ct/l). Anschließend ist er wieder auf 56,6 ct/l (2017) und auf 68,9 ct/l (2018) gestiegen und stagniert derzeit (68,4 ct/l in 2019) (MWV 2019).

Installations-, Wartungs- und laufende Kosten

Die Kosten für einen **heizölbetriebenen Brennwertkessel** selbst liegen bei durchschnittlich 7.600 € (Heizungsanlage inkl. Warmwasserspeicher) (energieheld GmbH 2018c; Nguyen 2019; Bosch Thermotechnik GmbH 2018). Für die Errichtung des Heizöllagers wird von einem Durchschnittswert von 3.700 € ausgegangen (energieheld GmbH 2018c; Nguyen 2019). Hierbei muss bei individuellen Berechnungen berücksichtigt werden, dass Öltanks ober- wie unterirdisch installiert werden können und entweder aus Kunststoff oder Stahl bestehen. Je nach gewünschtem Aufstellort und Art des Öltanks variieren die Kosten zwischen 500 (Batterietank mit 1.000 L Volumen) und 4.000 € (Öltank aus Stahl inkl. Installation) (energieheld GmbH 2018c; Nguyen 2019). Für die ökonomische Bewertung wird der Durchschnittswert der recherchierten Öltankarten berücksichtigt (3.700 €). Hinzu kommen weitere Kosten für die Verrohrung und Einbindung der Heizungsanlage in die Gebäudetechnik, die durchschnittlich mit 4.000 € angesetzt werden (energieheld GmbH 2018c). Hinzu können bei Bedarf zusätzliche Kosten für einen hydraulischen Abgleich entstehen, die zwischen 500 und 1.500 € liegen können. Die jährliche Wartung der Ölheizung beläuft sich auf Kosten in Höhe von 250 € (energieheld GmbH 2018c).

Anders sieht es bei den Kosten für ein **Heizöl-BHKW** aus. Laut den Berechnungen der ASUE betragen die Kosten für das BHKW selbst inkl. Anlieferung 35.700 € (ASUE und BHKW-Infozentrum 2014). Die Einbindung der Heizungsanlage bzw. Installation werden mit weiteren Kosten in Höhe von 13.150 € beziffert, während die jährliche Instandhaltung 238 € kostet (ASUE und BHKW-Infozentrum 2014). Die Kosten für das Brennstofflager liegen für ein Mehrfamilienhaus mit 6 Wohnungen und einer Gesamtwohnfläche von 476 m² bei 3.700 €.

In Tabelle 9 werden ausführlich die allgemeinen Anschaffungs- und Betriebskosten eines Brennwertkessels und eines BHKW, welche mit Heizöl betrieben werden, aufgeführt.

Tabelle 9: Kosten Heizungsanlage mit Heizöl

Kosten	Brennwertkessel	BHKW
Fixkosten		
Heizungsanlage	7.600 €	35.700 €
Brennstofflager	3.700 €	3.700 €
Einbindung / Installation	4.000 € ^a	13.150 €
Jährliche Kosten		
Instandhaltung	409 € ^b	238 € ^c
Gesamt	15.300 € + jährlich 409 €	52.550 € + jährlich 238 €
^a zuzüglich Kosten für einen hydraulischen Abgleich (bei Bedarf): 500 – 1.500 €; ^b Die Wartungskosten betragen 250 €, hinzu kommen weitere 159 € für den Schornsteinfeger; ^c Die Wartungskosten betragen 79 €, hinzu kommen weitere 159 € für den Schornsteinfeger		

3.3.5 Holzpellets

Holzpellets werden aus Sägemehl bzw. Holzabfällen, zunehmend auch aus frischem Holz, hergestellt. In einer Pelletieranlage werden diese Ausgangsstoffe in kleine Stäbchen gepresst und erhitzt, bis das enthaltene Lignin sich verflüssigt und als Klebemittel fungieren kann. Teilweise werden jedoch zusätzlich auch noch weitere Bindemittel hinzugegeben. Holzpellets sind im Vergleich zum konventionellen Brennstoff Erdgas wesentlich umweltverträglicher, da es sich bei dem Ausgangsmaterial um einen nachwachsenden Rohstoff handelt. Zudem werden Holzpellets zu einem stabilen, niedrigen Preis verkauft. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass der Heizwert von Holzpellets bei 4,9 kWh/kg (Hermann und Weber 2011) liegt, während der Heizwert von Erdgas bei 13,2 kWh/kg liegt. Es sind also im Vergleich zu Erdgas mehr Holzpellets notwendig, um dieselbe Menge Energie bereitstellen zu können.

Nachteil von Holzpellets sind die für die Lagerung notwendigen Investitionen für einen Lagerraum (ggü. eines Brennstoffes, der ebenfalls gelagert werden kann, wie z.B. Heizöl oder Flüssiggas). Zudem verfügen BHKW, die mit Holzpellets betrieben werden, nur über einen Gesamtwirkungsgrad im mittleren Bereich (77 – 80 % (Burkhardt GmbH 2016)). Durch die Nutzung der Holzpellets ist das BHKW kostenintensiver (rund 15 – 20 % höherer Anschaffungspreis als bei einem Standard-BHKW, welches mit Erdgas betrieben wird (Kesselheld GmbH 2018c)).

Bei den Heizungsanlagen ist zwischen halbautomatischen und vollautomatischen Anlagen zu unterscheiden. Halbautomatische Anlagen verfügen über einen

Vorratsbehälter, der von Hand zu befüllen ist. Vollautomatische Anlagen sind mit einem Tank oder dem Lagerraum verbunden und die Zuführung zur Brennkammer der Heizungsanlage erfolgt ohne manuelle Eingriffe.

Der Holzpelletpreis in Deutschland ist im Zeitraum von 2013 bis 2016 von 273 €/t auf 231 €/t gefallen (forstpraxis.de 2018). Seither ist er wieder auf ca. 350 €/t angestiegen (2019) (C.A.R.M.E.N. e.V. 2019b).

Installations-, Wartungs- und laufende Kosten

Generell ist für den Betrieb von Holzpellet-Heizungsanlagen ein Holzpelletlager notwendig, in welchem im Idealfall der Jahresvorrat eingelagert werden kann. Für die Auslegung des Pelletlagers kann von einem Richtwert von 1,3 m³ Lagerraum pro Tonne Pellets ausgegangen werden. Es kann zwischen unterschiedlichen Arten von Pelletlagern gewählt werden: Lagerraum, Silo oder Erdtank. Zusätzlich ist bei automatischer Befüllung ein Fördersystem von der Lagerstätte zur Heizungsanlage notwendig.

Der Lagerraum kann entweder in einem leer stehenden Kellerraum in der Nähe der Heizungsanlage installiert oder durch den Umbau beispielsweise eines Öltankraums zur Verfügung gestellt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Pelletlagerung im Dachraum. Die Kosten für ein konventionelles Pelletlager liegen zwischen 1.000 und 6.500 €, abhängig von der benötigten Lagergröße (DAA 2018; FNR 2013; energieheld GmbH 2018b). Im Gegensatz dazu kostet der Umbau eines Öltankraums nur 500 bis 1.000 € (energieheld GmbH 2018c). Dies ist aber nur möglich, sofern die benötigte Lagerkapazität in dem Raum auch untergebracht werden kann.

Sogenannte Sack- oder Gewebesilos stehen für unterschiedliche Lagerkapazitäten zur Verfügung und können auch außerhalb des Gebäudes aufgestellt werden. Es muss jedoch die Nähe zum Heizraum gewährleistet sein, um zusätzliche Kosten für die Transportwege einzusparen. Die Kosten für ein entsprechendes Silo liegen zwischen 1.000 und 5.800 € (B-H2 Internet Media 2015). Die Montage und ein Fördersystem sind hierbei noch nicht miteinbezogen.

Die Kosten für Pellet-Erdtanks liegen zwischen 3.800 und 9.000 € (zuzügl. Montage). Sie sind daher die teuerste Alternative für die Pelletlagerung (B-H2 Internet Media

2015; energieheld GmbH 2018b). Dies liegt unter anderem an den notwendigen Baumaßnahmen für die Grube außerhalb des Gebäudes. Auch hier ist die Nähe zum Heizraum erforderlich, um die Transportwege kurz zu halten.

Für die ökonomischen Bewertungen wurde für beide Heizungsarten der durchschnittliche Preis für Pelletsilos als Brennstofflager angenommen (1.850 €) (FNR 2018; energieheld GmbH 2018b; easyHeizung GmbH 2018b; Armoneit 2018; B-H2 Internet Media 2015).

Die Kosten für einen **holzpelletbetriebenen Brennwertkessel** selbst liegen bei durchschnittlich 19.100 €(energieheld GmbH 2018b). Je nach Bedarf kommen weitere Kosten für die Warmwasserbereitung (durchschnittlich 2.500 € (Raatschen Heizung 2019)), einen Pufferspeicher (durchschnittlich 2.200 € (energieheld GmbH 2018b; FNR 2013; Bosch Thermotechnik GmbH 2018; Armoneit 2018; DAA 2018) oder Kombispeicher für Heizung und Trinkwasser (durchschnittlich 3.800 € (energieheld GmbH 2018b; Armoneit 2018; Bosch Thermotechnik GmbH 2018)) dazu. Die Kosten für die Montage und Inbetriebnahme der Anlage liegen bei durchschnittlich 6.200 € (energieheld GmbH 2018b; FNR 2013; Armoneit 2018; Bosch Thermotechnik GmbH 2018; DAA 2018). Nicht zu vergessen ist das notwendige Pelletlager mit Austragungssystem, welches je nach Lagerart und Größe in den Kosten variiert (s.o.). Die jährlichen Kosten für die Instandhaltung der Pelletheizung beläuft sich auf Kosten in Höhe von durchschnittlich 389 € (230 € für Wartung und 159 € für den Schornsteinfeger) (energieheld GmbH 2018b; FNR 2013; Armoneit 2018; Bosch Thermotechnik GmbH 2018).

Anders sehen die Kosten bei einem mit **Holzpellets betriebenen BHKW** aus. Da es bisher nur einen Anbieter für holzpelletbetriebene BHKW für Wohngebäude gibt (ÖkoFEN 2018), können auch nur diese Preise für die Betrachtung herangezogen werden. Laut dem Anbieter kostet das Gesamtsystem (ohne Installation) zwischen 24.000 € und 35.000 €. Für die ökonomische Betrachtung wird der Mittelwert herangezogen.

Laut den Berechnungen der ASUE betragen die Kosten für die Einbindung der Heizungsanlage bzw. Installation 11.500 € (ASUE und BHKW-Infozentrum 2014),

während die Kosten für die jährliche Instandhaltung bei durchschnittlich 389 € liegen (159 € Schornsteinfeger und 230 € für Wartung) (energieheld GmbH 2018b; FNR 2013; Bosch Thermotechnik GmbH 2018; Armoneit 2018).

Die Kosten für das notwendige Pelletlager mit Austragungssystem, welches je nach Lagerart und Größe in den Kosten variiert (s.o.) wird bei den Berechnungen mit 1.853 € angesetzt.

In Tabelle 10 werden ausführlich die allgemeinen Anschaffungs- und Betriebskosten eines Brennwertkessels und eines BHKW, welches mit Holzpellets betrieben wird, aufgeführt.

Tabelle 10: Kosten Heizungsanlage mit Holzpellets

Kosten	Brennwertkessel	BHKW
Fixkosten		
Heizungsanlage	27.800 € ^a	29.500 € ^b
Brennstofflager ^c	1.850 €	1.850 €
Einbindung / Installation	6.200 € ^d	11.500 € ^c
Jährliche Kosten		
Instandhaltung	389 €	389 €
Gesamt	35.850 € + jährlich 389 €	42.850 € + jährlich 389 €
^a Ermittelt durch Regressionsberechnung für Brennwertkessel nach Daten des TFZ 2018 ^b Mittelwert der angegebenen Investitionskosten des Herstellers ÖkoFEN (ÖkoFEN 2018) ^c Durchschnittlicher Marktpreis für Pelletsilos (FNR 2018; energieheld GmbH 2018b; easyHeizung GmbH 2018b; Armoneit 2018; B-H2 Internet Media 2015), Lagergröße für beide Anlagen identisch angenommen ^d Kosten Schornstein, Montage und Installation der Anlage		

3.3.6 Holzhackschnitzel

Bei Holzhackschnitzeln handelt es sich um zerkleinertes Holz. Wesentliche Einflussfaktoren des Heizwertes von Holzhackschnitzeln sind die Holzart, der Wassergehalt und die Holzdichte, so dass der Heizwert zwischen 2,16 (bei 50% Wassergehalt) und 5,2 kWh/kg (0% Wassergehalt) liegen kann (LWF 2014).

Für die Lagerung wird im Vergleich zu Holzpellets wesentlich mehr Platz benötigt, da Holzhackschnitzel wegen der höheren Restfeuchte über einen geringeren Heizwert verfügen (im Mittel 3,4 kWh/kg für Laub- und Nadelholz mit 30% Restfeuchte

(Wesselak et al. 2017), Holzpellets verfügen über einen Heizwert von 4,9 kWh/kg (Hermann und Weber 2011). Der Heizwert der Holzhackschnitzel ist jedoch stark von dem Ausgangsmaterial abhängig. Daher werden speziell bei den Berechnungen mit Holzhackschnitzeln verschiedene Holzarten mit ihren spezifischen Eigenschaften (u.a. Baumart, Wassergehalt, Heizwerte, etc.) unterschieden. Im Rahmen dieser Studie werden die Berechnungen allerdings mit dem durchschnittlichen Heizwert von 3,4 kWh/kg für Laub- und Nadelholz durchgeführt.

Eine Übersicht bietet Tabelle 11, in welcher die Heizwerte der unterschiedlichen Holzarten und mit verschiedenen Wassergehalten gegenüber gestellt sind.

Tabelle 11: Heizwerte verschiedener Baumarten in kWh/kg (LWF 2014)

Wassergehalt [%]	0	15	20	30	50
Fichte	5,20	4,32	4,02	3,44	2,26
Kiefer	5,20	4,32	4,02	3,44	2,26
Buche	5,00	4,15	3,86	3,30	2,16
Eiche	5,00	4,15	3,86	3,30	2,16
Pappel	5,00	4,15	3,86	3,30	2,16

Der Raumbedarf für die Lagerung von Holzhackschnitzeln unterscheidet sich in Abhängigkeit von dem Wassergehalt und der Baumart, da sich hierdurch das spezifische Volumen der Holzhackschnitzel verändert. Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 20 % bei der Holzart Pappel haben ein Gewicht von 181 kg/Srm⁷, diese Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 0% jedoch nur ein Gewicht von 164 kg/Srm. Entsprechend ist der Heizwert bei geringerem Wassergehalt höher. Eine Übersicht hierzu gibt Tabelle 12.

⁷ 1 Srm = Schüttraummeter entspricht 1 m³ Raum für eine lose geschüttete Holzmenge.

Tabelle 12: Eigenschaften von Holzhackschnitzeln (Biomasseverband OÖ 2017)

Baumart	mittleres Atro- gewicht kg/fm	Wassergehalt = 0%					Wassergehalt = 20%				
		H-TS* 100%	Gesamt Gewicht kg/Srm				H-TS* <100%	Gesamt Gewicht kg/Srm			
				Srm/t	kWh/kg	kWh/Srm			Srm/t	kWh/kg	kWh/Srm
Pappel/Weide	410	164	164	6,10	5,00	820	145	181	5,53	3,86	698
Tanne	410	164	164	6,10	5,28	866	147	184	5,43	4,09	753
Fichte	430	172	172	5,81	5,28	908	154	193	5,19	4,09	787
Erle	490	196	196	5,10	5,00	980	171	214	4,67	3,86	828
Kiefer	510	204	204	4,90	5,28	1077	181	227	4,41	4,09	927
Lärche	550	220	220	4,55	5,28	1161	198	247	4,04	4,09	1011
Ahorn	600	240	240	4,17	5,00	1200	216	270	3,71	3,86	1042
Rotbuche	670	268	268	3,73	5,00	1340	227	283	3,53	3,86	1095
Esche	670	268	268	3,73	5,00	1340	237	296	3,38	3,86	1143
Birke	640	256	256	3,91	5,00	1280	225	281	3,56	3,86	1087
Eiche	680	272	272	3,68	5,00	1360	239	298	3,35	3,86	1152
Weißbuche	750	300	300	3,33	5,00	1500	250	312	3,20	3,86	1206

Für die Berechnungen wird von Holzhackschnitzeln (als Gemisch aus Laub- und Nadelholz) mit einer Restfeuchte von 30 % und einem Heizwert von 3,4 kWh/kg ausgegangen.

Der Preis für Holzhackschnitzel in Deutschland ist seit 2016 nahezu konstant geblieben. Anfang 2019 ist der Preis kurz angezogen auf 31 €/MWh, um daraufhin auf ca. 24 €/MWh zu fallen (C.A.R.M.E.N. e.V. 2019a).

Installations-, Wartungs- und laufende Kosten

Hackschnitzelheizanlagen (Brennwertkessel) werden in einem Leistungsspektrum von 10 kW bis in den 3-stelligen MW-Bereich eingesetzt. Schon längere Zeit werden sie als Heizkraftwerke in landwirtschaftlichen und gewerblichen Betrieben sowie im kommunalen und industriellen Bereich eingesetzt (FNR 2018). Es gibt verschiedene Verbrennungsprinzipien, wobei im Kleinanlagenbereich etwa 66 % der Hersteller Rostfeuerung, 25 % der Hersteller Unterschubfeuerung und die restlichen Hersteller Anlagen mit Quereinschubfeuerung ohne Rost herstellen. Natürlich gibt es weitere Varianten wie beispielsweise Rüttelroste oder Kipproste, um eine Auflockerung des Glutbetts zu ermöglichen und ein entsprechend besserer Ausbrand ermöglicht wird (hauptsächlich notwendig für Brennstoffe wie z.B. verunreinigte Hackschnitzel aus der Landschaftspflege oder Kompostieranlagen) (FNR 2018).

Die Kosten für einen mit Holzhackschnitzeln betriebenen Brennwertkessel betragen durchschnittlich 25.100 € (inkl. Pufferspeicher, Durchschnittswert für Anlagen der

Nennleistungen zwischen 10 – 60 kW) (TFZ 2018; FNR 2018) und schwanken entsprechend der Leistung und Ausstattung.

Die Kosten für die Einbindung und Installation der Gesamtheizanlage betragen durchschnittlich 6.500 €, während die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten bei 783 € liegen (505 € Wartung der Feuerung, 159 € Schornsteinfeger, 119 € Reinigung/Betrieb) (TFZ 2018).

Eine Kostentabelle zu einem BHKW kann nicht aufgestellt werden, da diese Art Anlagen nicht (mehr) für Haushalte zur Verfügung gestellt werden. Einziger Anbieter war die Firma ÖkoFen aus Österreich, ansonsten werden derzeit nur Anlagen mit nachgeschaltetem BHKW angeboten (z.B. von der Spanner Re² GmbH (Spanner Re² GmbH 2018)).

Die Kosten für ein Holzhackschnitzzellager liegen bei etwa 6.500 € (FNR 2018). Im Vergleich zu üblicher Lagerlogistik ist es bei Holzhackschnitzeln nicht zweckmäßig den Jahresbedarf zu bevorraten, so dass das Lagersilo so groß dimensioniert werden sollte, dass eine Wagen- bzw. Containerladung zusätzlich zu einer Restmenge Hackschnitzel für 10 – 14 Tage eingelagert werden kann (FNR 2018).

Wie zuvor bereits bei den Holzpellets erwähnt, sollte darauf geachtet werden, dass das Brennstofflager in räumlicher Nähe zur Heizungsanlage installiert ist, um unnötige Transportwege und zusätzliche Kosten zu vermeiden.

In Tabelle 13 werden ausführlich die allgemeinen Anschaffungs- und Betriebskosten eines Brennwertkessels, welches mit Holzhackschnitzeln betrieben wird, aufgeführt.

Tabelle 13: Kosten Heizungsanlage mit Holzhackschnitzeln

Kosten	Brennwertkessel
Fixkosten	
Heizungsanlage ^a	25.100 €
Brennstofflager	6.500 € ^b
Einbindung / Installation ^c	6.500 €
Jährliche Kosten	
Instandhaltung ^d	783 €
Gesamt	38.100 € + jährlich 783 €
^a Durchschnittliche Kosten einer Hackschnitzelheizung mit Pufferspeicher, Erhebung für das Jahr 2011 nach Originalrechnungen (FNR 2018; TFZ 2018) ^{b, c} Quelle: FNR 2018 ^d Beinhaltet Wartung der Feuerung, Reinigung (TFZ 2018) und Schornsteinfeger (159 €) (FNR 2018)	

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die unterschiedlichen Zinssätze in allen Betrachtungen lediglich die absoluten Werte der Kapitalwerte ändern, nicht aber die Verhältnisse der Kapitalwerte der Investitionsalternativen zueinander, so dass in diesem Bericht nur die Ergebnisse des aktuellen Zinssatzes aus dem Jahr 2017 der zehnjährigen Bundesanleihe aufgeführt werden. Der Betrachtungszeitraum für die Berechnung des Kapitalwertes wird mit 10 Jahren angesetzt. Der Betrachtungszeitraum entspricht somit der Vertragslaufzeit im Konzept KWK-Inno.Net Krefeld zwischen der Betreiberin und der Vermieterin der Wohnanlage.

Im Besonderen ist anzumerken, dass es sich bei dem Konzept KWK-Inno.Net Krefeld um ein Contracting-Konzept handelt, bei welchem die Gebäudeinhaberinnen lediglich den Platz für die Anlage zur Verfügung stellen müssen. Es entstehen für die Gebäudeinhaberin weder eine Investition für die Anlage an sich, noch laufende Kosten für Wartung oder Instandhaltung, da diese Kosten im Konzept KWK-Inno.Net Krefeld von der Stadtwerke Krefeld AG übernommen wird. Im Gegenzug erhalten die Mieterinnen der Wohnungen im Gebäude einen speziellen Stromtarif (BDEW 2010), wie es bei traditionellem Contracting üblich ist. Im Zuge des Contracting erhält die Stadtwerke Krefeld AG die Erlaubnis der Gebäudeinhaberin, die Anlage im Rahmen des Konzeptes zu nutzen und in ein virtuelles Kraftwerk einzubinden. Weitere Details zum Konzept sind den Berichten zu den Arbeitspaketen 1 und 2 zu entnehmen, die von der SWK Energie GmbH bearbeitet werden.

Da bisher in Krefeld keine weiteren Contracting-Partner zur Verfügung stehen, die die Anlagen strommarktgeführt und nicht wärmegeführt⁸ fahren, ist ein direkter Vergleich mit weiteren Contracting-Partnern nicht einfach möglich. Hinzu kommt, dass man bei Preisanfragen bei den anderen Contracting-Anbietern in Krefeld die Rückmeldung erhält, dass der Contracting-Preis stark von dem individuellen Anschluss abhängt und keine pauschale Antwort hierzu gegeben werden kann.

Aus diesem Grund entsprechen die in der Analyse herangezogenen Vergleichsanlagen Heizanlagen ohne Contracting-Vertrag. Hierbei trägt die

⁸ BHKWs werden herkömmlicherweise wärme-, strom- oder netzgeführt gefahren. Das vorgestellte Konzept KWK-Inno.Net Krefeld strebt aber eine strommarktgeführte Betriebsweise an.

Gebäudeinhaberin die komplette Investition und kommt für die laufenden Kosten wie Instandhaltung und Wartung selbst auf bzw. legt diese Kosten anteilig auf die Mieterinnen um. Die Mieterinnen erhalten im Rahmen der Analysen den günstigsten Standardtarif der Krefelder Stadtwerke. In der Realität steht den Mieterinnen natürlich die freie Anbieterwahl zur Verfügung.

Eine Analyse der Gebäude- und Wohnstrukturen der geeigneten Quartiere in Krefeld zeigte im Rahmen des 2014 erstellten Feinkonzeptes, dass Mietwohnungen das größte Potenzial zur Umsetzung des Konzeptes aufweisen (Bruchmann, Rubin und Renner 2014).

4.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht der Vermieterinnen

Die Investitionen erfolgen gemäß Annahme aus Eigenkapital. Der durch die Sanierungsmaßnahme erstattungsfähige Steuervorteil für die Eigentümerin der Immobilie wird nicht berücksichtigt, da dieser vom individuellen Steuersatz abhängt. Eine Berücksichtigung könnte dazu führen, dass die Investition in einen Brennwertkessel unabhängig vom Brennstoff in einer Einzelfallbetrachtung im Vergleich zu KWK-Inno.Net Krefeld einen wirtschaftlichen Vorteil aufweist. Ein wirtschaftlicher Vorteil wäre dann vom individuellen Steuersatz abhängig. Dieser Vorteil ist abhängig von den Vermögens- und Lebensumständen der Eigentümerin und kann daher an dieser Stelle nicht einkalkuliert werden.

Betrachtung nach Wärmebedarfs- bzw. Leistungskategorien

Für jede Kombination aus Baujahr und Wohnungsgröße ergeben sich unterschiedliche Kapitalwerte. Um die Vielzahl von Ergebnissen übersichtlich zusammenzufassen und dabei eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des AP 3.2 zu ermöglichen, wurden 4 exemplarische Kategorien gebildet, für die die Kapitalwerte der Investitionsalternativen in Tabelle 14 aufgeführt sind. Sie korrespondieren in etwa mit den Heizleistungsstufen, die in AP 3.2 über eine Bedarfsrechnung ermittelt wurden (Bruchmann, Rubin und Renner 2014) und unterscheiden sich bei den betrachteten Brennwertkesseln und den BHKWs (Brennwertkessel: Maximalwert 910 kW, oberes Quartil 235 kW, Median 127

kW, unteres Quartil 69 kW; BHKW: Maximalwert 182 kW, oberes Quartil 47 kW, Median 25 kW, unteres Quartil 14 kW).

Der Kapitalwert des Konzeptes KWK-Inno.Net Krefeld beträgt aus Sicht der Vermieterin 0 €, da die Kosten für die Anlage und Wartung bzw. Instandhaltung von den Stadtwerken Krefeld im Rahmen eines Contracting-Vertrages übernommen werden. Zudem ist keine Angabe zum Kapitalwert eines BHKW mit Heizöl in der maximalen Leistungsstufe angegeben, da in diesem Leistungsbereich keine weiteren Angaben aus der Literatur entnommen werden konnten.

Hierbei sei angemerkt, dass ein Brennwertkessel (unabhängig vom eingesetzten Brennstoff) wesentlich geringeren Invest verursacht als ein entsprechendes BHKW. Durch die Verrechnung mit der Stromeinspeisevergütung bei den BHKWs ist dies allerdings in Tabelle 14 nicht sichtbar. Ein Brennwertkessel mit Flüssiggas verursacht bis zu einer installierten Leistung von 127 kW nahezu doppelt so hohe Kosten wie ein Brennwertkessel mit Heizöl, Erdgas oder Biogas (Tabelle 14). Bei diesen Berechnungen wurden alle Fixkosten berücksichtigt und über 10 Jahre abgeschrieben. Diese Werte kommen unter anderem dadurch zustande, dass bei Befuerung mit Erdgas bzw. Biogas im Gegensatz zu Flüssiggas, Heizöl, Holzpellets und Holzhackschnitzeln keine Lagerkosten zu berücksichtigen sind. Allerdings können diese nicht ohne Versorgungsinfrastruktur in Betrieb genommen werden, deren Kosten hier nicht berücksichtigt werden.

Durch eine Investition in ein BHKW, unabhängig vom Brennstoff und von der benötigten Heizleistung, werden ebenfalls höhere Kosten erzeugt. Durch die vollständige Einspeisung des erzeugten Stroms in das Versorgungsnetz mit den entsprechenden Einspeisevergütungen kann die Investition innerhalb von 10 Jahre teilweise wieder erwirtschaftet werden bzw. sogar ein Gewinn erzielt werden, wie die positiven Zahlenwerte der Kapitalwertberechnung in Tabelle 14 zeigen. So kann mit allen BHKWs in allen Leistungsstufen, außer beim Betrieb mit Flüssiggas (dort erst ab einer Leistungsstufe von 47 kW), Gewinn erwirtschaftet werden und die Investition in die Anlage teilweise refinanziert werden.

Den mit Abstand höchsten Gewinn erwirtschaften BHKWs mit Biogasbetrieb, gefolgt von BHKWs mit Holzpelletbetrieb (Tabelle 14).

Tabelle 14: Exemplarische Kapitalwerte der Investitionsalternativen für Wohngebäude mit 6 - 50 Mietwohnungen aus Sicht der Vermieterinnen; gasbefeuerte Anlagen dienen nur dem Vergleich und sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet; Werte sind rechnerisch ermittelt, sind aber in der dargestellten Genauigkeit nicht belastbar

	Kategorie 1^a Gebäudebaujahr 1979 – 1986 (unteres Quartil)	Kategorie 2^a Gebäudebaujahr 1919 – 1948 (Median)	Kategorie 3^a Gebäudebaujahr <1919 (oberes Quartil)	Kategorie 4^a Gebäudebaujahr 1949 – 1978 (Maximalwert)
KWK-Inno.Net Krefeld*	0,- €	0,- €	0,- €	0,- €
Brennwertkessel mit Erdgas*	-1.205	-1.576	-2.268	-6.588
Brennwertkessel mit Biogas [analog Erdgasbefuerung]	-1.205	-1.576	-2.268	-6.588
Brennwertkessel mit Flüssiggas	-2.082	-2.154	-2.288	-3.127
Brennwertkessel mit Heizöl	-1.706	-1.744	-1.814	-2.250
Brennwertkessel mit Holzpellets	-3.216 €	-3.903 €	-4.822 €	-8.258 €
Brennwertkessel mit Holzhackschnitzel	-3.822 €	-4.140 €	-4.730 €	-8.445 €
BHKW mit Erdgas* (vom Fremdanbieter)^b	8.780 €	16.543 €	43.724 €	249.264 €
BHKW mit Biogas^b	52.850 €	99.696 €	196.731 €	816.893 €
BHKW mit Flüssiggas^b	-5.293 €	-5.352 €	1.837 €	81.047 €
BHKW mit Heizöl^b	13.474 €	22.789 €	52.235 €	keine Angabe ^c
BHKW mit Holzpellets^b	31.848 €	60.871 €	135.580 €	523.830 €
^a Kategorie 1 - 4 angelehnt an die Quartile aus Bericht AP 3.2: Leistungsstufen Brennwertkessel: Maximalwert 910 kW, oberes Quartil 235 kW, Median 127 kW, unteres Quartil 69 kW; Leistungsstufen BHKW: Maximalwert 182 kW, oberes Quartil 47 kW, Median 25 kW, unteres Quartil 14 kW) ^b Für die Berücksichtigung der Stromeinspeisevergütungen bei den BHKWs wurden die Wärmebedarfe entsprechend der verschiedenen installierten Leistungen hochgerechnet, so dass ca. 5.000 Vollastbetriebsstunden erreicht werden. Dementsprechend wurden die Berechnungen für Gebäudegrößen zwischen 6 und 50 Wohnungen durchgeführt (Kapitel 3.2.3). ^c Für die Berechnungen in diesem Leistungsbereich können keine Angaben aus der Literatur entnommen werden (ASUE und BHKW-Infozentrum 2014)				

Abhängigkeit vom Baujahr

In Abhängigkeit vom Baujahr entstehen der Anlagenbetreiberin die nachfolgenden Kapitalwerte für BHKWs (Tabelle 15), die exemplarisch für ein Wohngebäude mit 6 Mietwohnung à 79,4 m² Größe (durchschnittliche Wohnungsgröße Krefelds) berechnet wurden. Hier wurden zusätzlich zur installierten Anlagenleistung die verschiedenen Gebäudebaujahre und die entsprechenden Wärmebedarfe der Wohnungen berücksichtigt. Eine Förderung nach EEG wird pauschal für 20 Jahre gewährt (Deutscher Bundestag 2017, § 25 Beginn, Dauer und Beendigung des Anspruchs), während eine

Förderung nach KWK-G nur bis 60.000 Vollbenutzungstunden (für Anlagen bis 50 kW) gewährt wird (Deutscher Bundestag 2015, § 8 Dauer der Zuschlagzahlung für neue, modernisierte oder nachgerüstete KWK-Anlagen).

Aufgrund der zusätzlichen Einnahme durch eine Stromeinspeisevergütung nach KWK-G oder EEG ist es teilweise möglich, die Investition für die Heizungsanlage in der Abschreibungslaufzeit von 10 Jahren wieder reinzuholen und zusätzlichen Gewinn zu erwirtschaften.

Tabelle 15: Exemplarische Kapitalwerte der Investitionsalternativen für ein Wohngebäude mit 6 Mietwohnung à 79,4 m² aus Sicht der Vermieterinnen mit einer installierten Leistung von 50 kW; gasbefeuerte Anlagen dienen nur dem Vergleich und sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet; Werte sind rechnerisch ermittelt, sind aber in der dargestellten Genauigkeit nicht belastbar

	Baujahr < 1919	Baujahr 1919 - 1948	Baujahr 1949 - 1978	Baujahr 1979 - 1986
BHKW mit Erdgas* (vom Fremdanbieter)^a	4.785 €	5.151 €	4.597 €	-3.078 €
BHKW mit Biogas	40.299 €	41.451 €	39.709 €	15.597 €
BHKW mit Flüssiggas	-7.309 €	-7.289 €	-7.404 €	-11.279 €
BHKW mit Heizöl	9.286 €	9.670 €	9.089 €	1.041 €
BHKW mit Holzpellets	24.232 €	24.931 €	23.874 €	9.243 €

^a Diese Berechnung wurde zusätzlich durchgeführt, um das Ergebnis für Preise weiterer Wettbewerber zur Erdgasversorgung zu betrachten.

Fördermittel

Bei den Berechnungen wurden keine möglichen Förderungen über z.B. die KfW berücksichtigt, da hierbei gebäudespezifische und individuelle Berechnungen angestellt werden müssen. Im Folgenden wird aber in einer Übersicht zusammengefasst, welche Fördermöglichkeiten Immobilieninhaberinnen zur Verfügung stehen. Für die Nutzung dieser Förderungen müssen allerdings noch individualisierte Berechnungen (unter Berücksichtigung von z.B. Art des Gebäudes, Art der zu installierenden Heizungsanlage, gewünschten Leistung, Einspeisung von z.B. Strom in das öffentliche Netz etc.) durchgeführt werden. So könnte es sich nach Abschluss der Förderberechnung ergeben, dass die Investitionskosten wesentlich geringer ausfallen als bisher dargestellt. Zudem besteht auch für Heizungsanlagen mit

Brennstoffalternativendie Möglichkeit, im Rahmen eines Contracting-Vertrages die Investitionskosten auf den Contractor zu verschieben.

Grob kann unterschieden werden zwischen verschiedenen gesetzlichen Förderinstrumenten zur Ergänzung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und zur Ergänzung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Fördermittel über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zu beantragen. Diverse Förderprogramme sind ebenfalls ausgeschrieben, bei denen auf Antrag eine Förderung bewilligt werden kann, sofern die Voraussetzungen für eine Förderung zutreffen.

Speziell für BHKW gibt es ein Förderprogramm für die Neuerrichtung einer Mini-KWK-Anlage. Es handelt sich hierbei um einen Investitionszuschuss für den Leistungsbereich bis einschließlich 20 kW_{el} in Bestandbauten (Basisförderung). Für besonders energieeffiziente Anlagen kann zudem eine Bonusförderung beantragt werden (sog. Stromeffizienzbonus⁹ und Wärmeeffizienzbonus¹⁰).

Voraussetzung für eine Förderung ist u.a., dass die Anlage nicht in einem Gebiet mit einem Anschluss- und Benutzungsgebot für Fernwärme liegen und die Anlage über einen Wartungsvertrag betreut wird. Weitere Voraussetzungen können bei der BAFA eingeholt werden (BAFA 2015).

Im sogenannten Marktanzreizprogramm (MAP) werden Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energie im Wärmemarkt gefördert, hierbei allerdings hauptsächlich Biomasseanlagen, Tiefengeothermieanlagen und Nahwärmenetze (die mit Wärme aus erneuerbaren Energien gespeist werden). Es können Zuschüsse der BAFA für kleine Anlagen beantragt werden und KfW-Darlehen für große Anlagen, wie beispielsweise Biomasse-Heizkraftwerke (BAFA 2015). In Kombination mit dem Anreizprogramm Energieeffizienz können zusätzlich weitere Zuschüsse genutzt werden.

⁹ Stromeffizienzbonus (60 % der Basisförderung); hoher elektrischer Wirkungsgrad (>31-35% je nach Leistung)

¹⁰ Wärmeeffizienzbonus (25 % der Basisförderung); bei Einsatz von Abgaswärmetauscher

Bis Ende 2018 gilt die Richtlinie für das Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE), welches Fördermittel über die BAFA oder die KfW zur Verfügung stellt. Gefördert wird im Heizungspaket die Erneuerung der Heizungsanlage und die darauf abgestimmte Optimierung der Wärmeverteilung inklusive hydraulischem Abgleich. Diese Förderung in Form einer Prämie ist, im Hinblick auf die untersuchten Anlagen in diesem Bericht, relevant für Biomasse-Anlagen. Durch die BAFA wird ein Zuschuss von 20% der Förderung aus dem Marktanzreizprogramm zusätzlich zu einer Prämie von pauschal 600 € bereitgestellt (Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. 2017).

Einspeisevergütung für den vom BHKW erzeugten Strom

Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen exemplarisch die durch ein BHKW erzeugten Strommengen bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs sowie die Einnahmen für eine vollständige Stromeinspeisung für ein 6-Parteien-Haus mit einer durchschnittlichen Wohnfläche von 79,4 m² je Wohnung.

Die Berechnung für die jährliche Stromerzeugung mit einem BHKW erfolgt auf Basis der berechneten Brennstoffbedarfe für die Deckung des Wärmebedarfs und dem elektrischen Wirkungsgrad der Anlage (Tabelle 4).

Tabelle 16: Jährliche Stromerzeugung in MWh in einem BHKW bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs für ein 6-Parteien-Haus je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²)

Baujahr	Erdgas	Biogas	Flüssiggas	Heizöl	Holzpellets
< 1919	49,3	56,5	24,9	51,7	34,3
1919 - 1948	50,1	57,4	25,3	52,6	34,9
1949 - 1978	48,9	56,0	24,7	51,2	34,0
1979 - 1986	31,3	35,8	15,8	32,8	21,7

Die Gesamteinnahmen durch vollständige Stromeinspeisung durch die untersuchten BHKWs werden entsprechend Kapitel 3.2.3 berechnet.

Es stellt sich heraus, dass die jährlichen Vergütungen für Anlagen, die mit Biogas oder mit Holzpellets betrieben werden, am höchsten ausfallen, wobei die Vergütung für Gebäude von 1979 – 1986 geringer ausfallen als für Gebäude älteren Jahrgangs. Bei

den über das KWK-G vergüteten Brennstoffe werden die höchsten Erträge mit Heizöl erzielt, gefolgt von Erdgas und dann Flüssiggas.

Tabelle 17: Jährliche Gesamteinnahmen (€/MWh) durch Stromeinspeisung für ein 6-Parteien-Haus je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²)

Baujahr	Erdgas	Biogas	Flüssiggas	Heizöl	Holzpellets
< 1919	2.394 €	6.489 €	1.209 €	2.510 €	3.938 €
1919 -1948	2.435 €	6.599 €	1.229 €	2.553 €	4.005 €
1949 - 1978	2.373 €	6.432 €	1.198 €	2.489 €	3.903 €
1979 - 1986	1.518 €	4.114 €	766 €	1.592 €	2.496 €

Dieses Ergebnis hängt natürlich nicht nur von der Brennstoffart, sondern ebenfalls von der erzeugten Strommenge und dem Gebäudealter ab. Ebenfalls sollte man die Investitionskosten für entsprechenden Anlagen in Relation zu den zu erzielenden Einspeisevergütungen sehen.

4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht der Mieterinnen

Mieterinnen können bei einer Zentralheizung ihren Versorger für die Brennstoffe nicht frei wählen. Die Vermieterin trifft diese Auswahl. Hierbei müssen die unterschiedlichen Grund- und Leistungspreise¹¹ der einzelnen Anbieter miteinander verglichen werden. Eine Übersicht über die in der Berechnung berücksichtigten Preise der einzelnen Energieträger, bei leitungsgebundenen Brennstoffen ggf. unterteilt nach Leistungs- und Grundpreisen sowie Boni je Anbieter befindet sich im Anhang (Kapitel 7.1). Die Auswahl der Fremdanbieter wurde analog zum Abschlussbericht für Arbeitspaket 3.2 (Newiadomsky und Alsmeyer 2017) durchgeführt. Hierbei wurden Fremdanbieter mit ähnlichen Preisen wie von der SWK zur Betrachtung herangezogen, um einen fairen Vergleich darstellen zu können. Natürlich ist es der Vermieterin überlassen, welche Anbieterin sie wählt.

¹¹ Der Grundpreis entspricht einem festen, verbrauchsunabhängigen Bereitstellungs- und Verrechnungspreis. Der Leistungspreis entspricht einem verbrauchsabhängigen Entgelt für den höchsten Leistungsmittelwert im Abrechnungszeitraum. Der Arbeitspreis entspricht dem verbrauchsabhängigen Entgelt je Einheit an Energie in Euro je kWh (€/ kWh). Der Leistungspreis kann eine Komponente des Arbeitspreises sein. (Paschotta 2012)

Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Kapitalwerte aller Heizungsanlagen mit Brennstoffalternativen aus Sicht der Mieterin für ein Gebäudebaujahr vor 1919 und für unterschiedliche Wohnungsgrößen. Die Abbildungen für die anderen untersuchten Gebäudealter befinden sich im Anhang (Kapitel 7.3). Da die Umlage der Investkosten gesetzlich limitiert ist und für alle Varianten (außer Contracting) vergleichbar ist, ist die Wärmeversorgung mit dem Konzept KWK-Inno.Net Krefeld für die Endkundin die günstigste Alternative (dunkelblaue Säule in Abbildung 3 für Gebäude und Baujahr vor 1919). In allen Fällen ohne Contracting ist die Umlage durch die Brennstoffkosten bestimmt. Da der Fokus der Untersuchungen in diesem Arbeitspaket aber auf den Brennstoffalternativen liegt (Erdgas wird nun nicht weiter beachtet), lässt sich feststellen, dass Brennwertkessel mit Heizöl¹² die günstigste Alternative darstellen. Gefolgt werden diese Alternativen von Brennwertkesseln, die mit Biogas und mit Holzhackschnitzeln betrieben werden.

Für alle Wohnungsgrößen ergibt sich für alle Gebäudebaujahre dieselbe Reihenfolge. So sind Brennwertkessel und BHKW mit Heizöl sowie nachfolgend Brennwertkessel mit Biogas und Holzhackschnitzeln die günstigeren Alternativen im Vergleich zu beispielsweise einem BHKW mit Biogasbefuerung (Beispiel Brennwertkessel mit Heizöl für Wohnungen unter 40 m² Größe: 3.456 € für ein Gebäudealter vor 1919, 3.495 € für ein Gebäudealter zwischen 1919 und 1948, 3.436 € für ein Gebäudealter zwischen 1949 und 1978 und 2.626 € für ein Gebäudealter von 1979 bis 1986; Tabelle 21 bis Tabelle 24, Kapitel 7.2). Abhängig von der Wohnungsgröße und dem Gebäudebaujahr konnten zwei sehr ungünstige Brennstoffalternativen im Vergleich zu Erdgas festgestellt werden. Für alle Wohnungsgrößen und Baujahre sind BHKW mit Biogasbetrieb und mit Flüssiggasbetrieb die ungünstigsten Alternativen.

¹² Hier muss jedoch immer der aktuell gültige Marktpreis für Heizöl berücksichtigt werden. Im Zeitraum zwischen den Berechnungen und der Veröffentlichung dieses Berichts sind die Preise für Heizöl stark angestiegen.

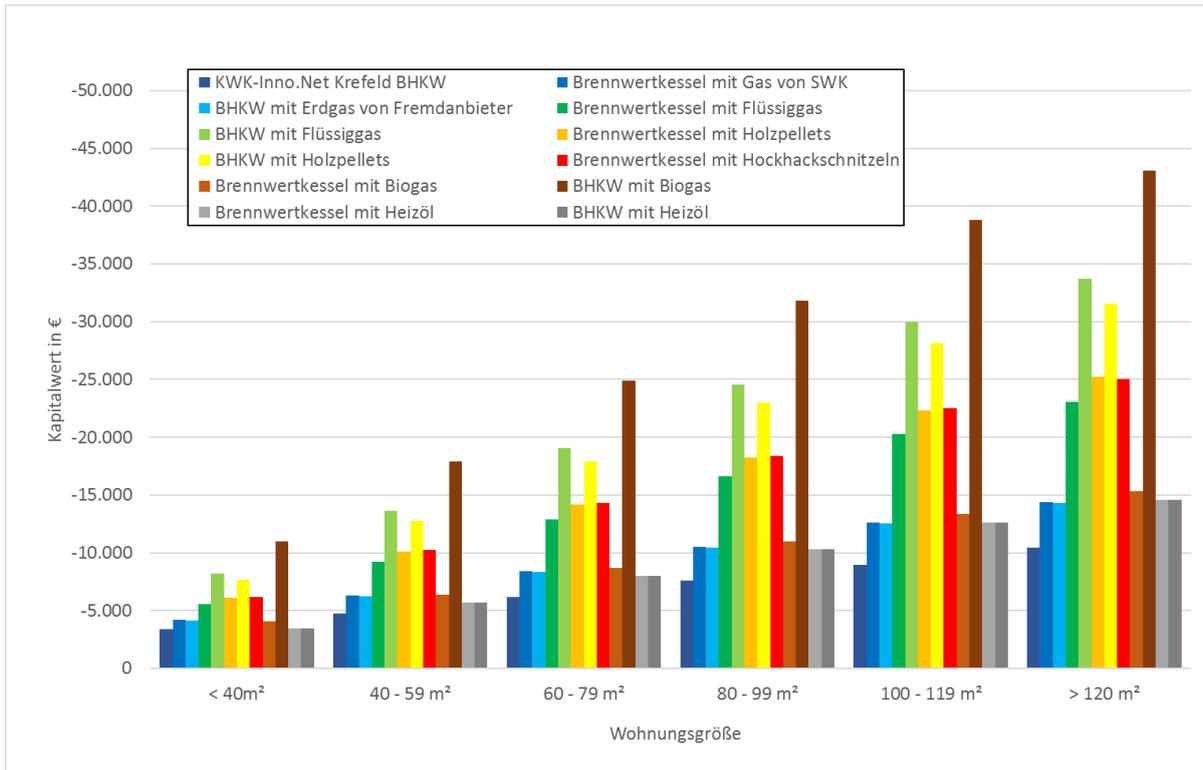


Abbildung 3: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter vor 1919

Zusätzlich zur Wärmeversorgung wird für die Mieterinnen mit dem Konzept KWK-Inno.Net Krefeld ein, im Vergleich zum Standardtarif, um 1 ct/kWh vergünstigter Stromtarif von der SWK angenommen.¹³ Die sich daraus ergebenden Einsparungen (Tabelle 18) sind abhängig von der Personenanzahl im Haushalt. Der günstigste Standardtarif „meinSWK DIREKT Strom“ stellt Strom für einen Arbeitspreis von 26,30 ct/kWh und einen Grundpreis von 8,23 €/Monat zur Verfügung (SWK AG 2017). Abhängig von der Vertragslaufzeit und der gewünschten Preisgarantie können sich diese Preise jedoch ändern. Da Strom aber prinzipiell auch von anderen Anbietern zu ggf. niedrigeren Tarifen bezogen werden könnte, können diese eventuellen Kostenvorteile nicht in den Kosten der Wärmeversorgung berücksichtigt werden. So ist es vorstellbar, dass die Vermieterin ihren Mieterinnen vergünstigten Mieterstrom anbieten kann, sofern es sich bei der installierten Heizungsanlage um ein BHKW handelt. Dieses Beispiel würde den Contracting-Verträgen der SWK im Rahmen des

¹³ Ob dieser Preis dem tatsächlichen Preis der SWK entsprechen wird, konnte zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht abschließend geklärt werden.

Projektes entsprechen, wobei die vergünstigten Konditionen für Mieterstrom dann nicht von der Vermieterin, sondern von der SWK angeboten werden. Alternativ könnte der von dem BHKW erzeugte Strom komplett verkauft und in das öffentliche Netz eingespeist werden. Dies wird im Rahmen dieses Berichtes für alle alternativen Heizungsanlagen angenommen.

Tabelle 18: Durchschnittliche Stromverbräuche je Haushaltsgröße und Einsparung der Stromkosten durch den vergünstigten Stromtarif des KWK-Inno.Net Krefeld im Vergleich zum Tarif meinSWK DIREKT Strom

1-Personen Haushalte	2-Personen Haushalte	3-Personen Haushalte	4-Personen Haushalte	5- Personen Haushalte	6- und mehr-Personen Haushalte
1.798 kWh/a	2.850 kWh/a	3.733 kWh/a	4.480 kWh/a	5.311 kWh/a	5.816 kWh/a
161 €	256 €	335 €	402 €	477 €	522 €
<i>Quelle der Stromverbräuche:(Energieagentur.NRW 2011), Quelle der Strompreise der SWK: (SWK AG 2017)</i>					

Für den Fall, dass einige der Heizungsanlagen mit den betrachteten Brennstoffalternativen im Rahmen eines Contracting-Modells installiert werden, müssen weitere Berechnungen angestellt werden, in welchen die entsprechenden Contracting-Konditionen Berücksichtigung finden. Diese Berechnungen sind nicht Bestandteil dieser Analyse.

Die Tabellen und Diagramme der Kapitalwerte aller alternativen Heizungsanlagen aus Sicht der Mieterin befinden sich in den Anhängen 7.2 und 7.3.

4.3 Ökologische Potentialanalyse: CO₂-Emissionen

Die jährlichen CO₂-Emissionen für die einzelnen Brennstoffalternativen werden für ein Mehrfamilienhaus mit einer zu beheizenden Gesamtwohnfläche von 476 m² (6-Parteienhaus mit einer durchschnittlichen Krefelder Wohnungsgröße von 79,4 m² (Stadt Krefeld 2012)) ermittelt.

Da bei den Blockheizkraftwerken neben der Wärme auch Strom erzeugt wird, ist die CO₂-Emission immer bezogen auf die gesamte jährliche Nutzenergie der Anlage.

Für die Ermittlung der Brennstoffbedarfe werden die Wärmebedarfe mit den thermischen Wirkungsgraden der Heizungsanlagen dividiert. Anschließend werden für die ökologische Analyse nun die jährlichen Brennstoffbedarfe mit den entsprechenden CO₂-Emissionswerten der einzelnen Brennstoffe multipliziert. Entsprechend dieser CO₂-Emissionswerte (Tabelle 5) ergibt die ökologische Analyse für Wohnungsgrößen zwischen 60 und 79 m², dass Holzhackschnitzel den ökologischsten Brennstoff darstellt, während Heizöl die unökologischste Alternative darstellt (Tabelle 20).

Tabelle 19: Wärme- und Brennstoffbedarfe für BHKW und Brennwertkessel (BWK) je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²)

Baujahr	Wärmebedarf [kWh/a]	Erdgas [kWh/a]		Biogas [kWh/a]		Flüssiggas [kWh/a]	
		BHKW	BWK	BHKW	BWK	BHKW	BWK
< 1919	10.592	21.616	11.033	24.365	11.033	15.039	11.033
1919 -1948	10.773	21.985	11.221	24.781	11.221	15.296	11.221
1949 - 1978	10.499	21.427	10.937	24.152	10.937	14.908	10.937
1979 - 1986	6.715	13.705	6.995	15.448	6.995	9.535	6.995

Baujahr	Wärmebedarf [kWh/a]	Heizöl [kWh/a]		Holzpellets [kWh/a]		Holzhackschnitzel [kWh/a] ¹⁴	
		BHKW	BWK	BHKW	BWK	BHKW	BWK
< 1919	10.592	22.112	11.033	20.768	11.149	--	11.901
1919 -1948	10.773	22.490	11.221	21.123	11.340	--	12.104
1949 - 1978	10.499	21.919	10.937	20.587	11.052	--	11.797
1979 - 1986	6.715	14.020	6.995	13.168	7.069	--	7.545

¹⁴ Da BHKW-Anlagen mit Holzhackschnitzeln für Haushalte derzeit nicht auf dem Markt erhältlich sind, können hier keine Werte angegeben werden.

Tabelle 20: Jährliche CO₂-Emissionen [kg/a] für BHKW und BWK je Baujahr und Wohnungsgröße (Auszug für Wohnungen zwischen 60 und 79 m²)

Baujahr	Erdgas [kg/a]		Biogas [kg/a]		Flüssiggas [kg/a]	
	BHKW	BWK	BHKW	BWK	BHKW	BWK
< 1919	5.404	2.758	1.681	761	4.166	3.056
1919 -1948	5.496	2.805	1.710	774	4.237	3.108
1949 - 1978	5.357	2.734	1.667	755	4.129	3.030
1979 - 1986	3.426	1.749	1.066	483	2.641	1.938

Baujahr	Heizöl [kg/a]		Holzpellets [kg/a]		Holzhackschnitzel [kg/a]	
	BHKW	BWK	BHKW	BWK	BHKW	BWK
< 1919	6.700	3.343	561	301	446	286
1919 -1948	6.814	3.400	570	306	454	291
1949 - 1978	6.641	3.314	556	298	442	283
1979 - 1986	4.248	2.120	356	191	283	181

Demnach sind in absteigender Reihenfolge die folgenden Brennstoffalternativen die ökologischsten für eine Nutzung in einem BHKW:

1. Holzhackschnitzel (Mittelwert über alle Baujahre: 406 kg/a)
2. Holzpellets (Mittelwert über alle Baujahre: 511 kg/a)
3. Biogas (Mittelwert über alle Baujahre: 1.531 kg/a)
4. Flüssiggas (Mittelwert über alle Baujahre: 3.793 kg/a)
5. Erdgas (Mittelwert über alle Baujahre: 4.921 kg/a)
6. Heizöl (Mittelwert über alle Baujahre: 6.101 kg/a).

Für eine Nutzung in einem BWK gilt eine ähnliche Reihenfolge für die CO₂-Emissionen der Brennstoffalternativen. Bemerkenswert ist, dass die Positionen für Erdgas und Flüssiggas im Vergleich zu den Emissionswerten bei Nutzung derselben Brennstoffe im BHKW miteinander vertauscht sind:

1. Holzhackschnitzel (Mittelwert über alle Baujahre: 260 kg/a)
2. Holzpellets (Mittelwert über alle Baujahre: 274 kg/a)
3. Biogas (Mittelwert über alle Baujahre: 693 kg/a)
4. Erdgas (Mittelwert über alle Baujahre: 2.512 kg/a)
5. Flüssiggas (Mittelwert über alle Baujahre: 2.783 kg/a)
6. Heizöl (Mittelwert über alle Baujahre: 3.044 kg/a).

5 Zusammenfassung

Die ökonomische Analyse führen aus Sicht der Vermieterinnen und der Mieterinnen zu dem Ergebnis, dass alle alternativen Brennstoffe für alle untersuchten Wohnungsgrößen und Gebäudebaujahre teurer sind als ein mit Erdgas betriebener Brennwertkessel und somit immer höheren Invest verursacht. Das liegt zum Teil auch an der Notwendigkeit, zusätzliche Lagerstätten zu installieren, die je nach Brennstoff und benötigten und gewünschten Lagerverhältnissen relativ teuer werden können.

Da bei mit Erdgas betriebenen Brennwertkesseln oder BHKW keine zusätzlichen Lager errichtet werden müssen, fallen solche Kosten hierfür nicht an. Dasselbe gilt auch für mit Biogas betriebene Anlagen. Würde bei den Berechnungen jedoch die Einbindung des Gebäudes an ein vorhandenes Gasnetz mit berücksichtigt werden, würden Heizungsanlagen mit Erdgas bzw. Biogas wesentlich höhere Kosten verursachen.

Der Einsatz von BHKW, unabhängig von dem eingesetzten Brennstoff, führt initial immer zu höheren Kosten für Vermieterinnen. Durch höhere Investition für die Heizungsanlage an sich und die wesentlich höheren Einbindungskosten werden teilweise erheblich höhere Kosten für die Immobilieneigentümerin erzeugt als bei Brennwertkesseln. Durch eine mögliche Stromeinspeisevergütung ist es allerdings möglich, dass die Anlagenbetreiberin (Vermieterin) im Laufe der untersuchten 10 Jahre einen Gewinn erwirtschaftet und so die Investition refinanzieren kann, abhängig von der Art des Primärenergieträgers und der entsprechend anzuwendenden Vergütung.

Bei den Mieterinnen sind die Brennwertkessel teilweise günstiger als die BHKW (nur für den Brennstoff Heizöl kein Kostenunterschied, für Erdgas eines Fremdanbieters ist das BHKW günstiger als der Brennwertkessel). Für die anderen Brennstoffalternativen zu Heizöl und Erdgas (eines Fremdanbieters) sind die BHKW wesentlich teurer in den Kosten für die Mieterinnen.

Bei der ökologischen Analyse hat sich entsprechend der bereits bekannten CO₂-Emissionen der einzelnen Brennstoffalternativen ergeben, dass im Gegensatz zu der ökonomischen Analyse Holzhackschnitzel und Holzpellets am geringsten CO₂

emittieren, unabhängig von der Art der Heizungsanlage (BHKW oder BWK). Gerade die Standardbrennstoffe Erdgas, Heizöl und Flüssiggas emittieren am meisten CO₂. Aus ökologischer Sicht empfiehlt sich demnach insbesondere der Einsatz von Holzhackschnitzeln bzw. Holzpellets als alternativer Brennstoff. Ausgehend von den CO₂-Emissionen könnte hierbei auch noch Biogas als eine der ökologischeren Brennstoffe in Betracht gezogen werden.

6 Literatur

Anondi GmbH. 2019. „Gasheizung Betriebskosten - Gas, Wartung & Kosten für Schornsteinfeger.“ Zugriff: 3. Juli 2019.

<https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/gasheizung/gasheizung-betriebskosten>.

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. und BHKW-Infozentrum Rastatt, Hg. 2014. *BHKW-Kenndaten 2014/2015 - Module, Anbieter, Kosten*. BHKW-Kenndaten. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. und Stadt Frankfurt am Main - Energierreferat, Hg. 2011. *BHKW-Kenndaten 2011 - Module, Anbieter, Kosten*. BHKW-Kenndaten. Essen: energieDRUCK - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch. Zugriff: 8. Juli 2019.
https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2011/broschueren/05_07_11_asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf.

Armoneit, Annalena. 2018. „Pelletheizung - Kosten & Aufwand im Überblick.“ Zugriff: 3. Juli 2019. <https://kostenblick.de/was-kostet-eine-pelletheizung>.

Aschmann, Volker und Mathias Effenberger. 2012. „Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer: Abschlussbericht.“ Zugriff: 19. Juni 2019.
https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/abschlussbericht_verlauf_des_elektrischen_wirkungsgrades_biogas_betriebener_bhkw_%C3%BCber_die_betriebsdauer.pdf.

B-H2 Internet Media. 2015. „Pelletlager - Möglichkeiten der Pellets-Lagerung.“ Zugriff: 3. Juli 2019. <http://pelletheizung-infos.de/informationen-heizen-mit-holzpellets/pellets-lager/#alternativen8>.

BHKW-Infozentrum GbR [BHKW-Infozentrum]. 2015. „Abgeschrieben wird nun anders – Änderung bei der AfA für Blockheizkraftwerke.“ Zugriff: 3. Juli 2019.
<https://www.bhkw-infozentrum.de/statement/abgeschrieben-wird-nun-anders-aenderung-bei-afa-fuer-bhkw.html>.

- Biomasseverband Oberösterreich [Biomasseverband OÖ]. 2017. „Masse und Energieinhalt von Hackgut in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Umrechnungstabellen_Brennstoff_Holz.“ Zugriff: 3. Juli 2019.
http://www.biomasseverband-ooe.at/uploads/media/Downloads/Publikationen/Umrechnungstabellen_Brennstoff_Holz-BMV-OOe.pdf.
- Bosch Thermotechnik GmbH. 2018. „Was kostet eine Ölheizung? Anschaffungskosten und Betriebskosten im Überblick.“ Zugriff: 3. Juli 2019.
<https://www.oeffizienzhaus-online.de/kosten-oelheizung>.
- Braun, Andreas. 2019. „Brennwertkessel: Tipps zu Auswahl, Installation und Kosten: So bringen Sie Gasheizung und Ölheizung auf Vordermann.“ Zugriff: 4. Juli 2019.
<http://www.energie-fachberater.de/heizung-lueftung/heizung/gasheizung/brennwertkessel-tipps-zu-auswahl-installation-und-kosten.php>.
- Bruchmann, Janine, Sebastian Rubin und Gisela Renner. 2014. „Wirtschaftlich orientierte Betriebsführung von dezentralen Mini-BHKW in einem virtuellen Kraftwerk - KWK-Inno.Net Krefeld. Feinkonzept der Stadt Krefeld zum Projektauftrag „KWK Modellkommune 2012 bis 2017“ des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen.“.
- Bund der Energieverbraucher e.V. 2018. „Flüssiggas-Tank.“ Zugriff: 27. März 2018.
http://www.energieverbraucher.de/de/fluessiggastanks__344/.
- . 2019. „Preisinformationen zu Flüssiggas.“ Zugriff: 10. Juli 2019.
https://www.energieverbraucher.de/de/preise__93/.
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle [BAFA]. 2015. „BAFA - Mini-KWK.“ Zugriff: 17. September 2017.
http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Mini_KWK/mini_kwk_node.html.
- Bundesministerium der Finanzen. 2000. „Bundesfinanzministerium - AfA-Tabellen.“ Zugriff: 22. Juli 2016.
<http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steue>

rn/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA). 2015. „Umstellung von L- auf H-Gas: Was Sie wissen sollten.“ Zugriff: 19. Juni 2019.

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/service/UmstellungLGas.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen [BNetzA] und Bundeskartellamt. 2018. „Entwicklung der Gaspreise* für Haushaltskunden in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2018 (in Euro-Cent je Kilowattstunde).“ Chart. Zugriff: 9. Juli 2019. <https://printkr.hs-niederrhein.de:2066/statistik/daten/studie/168286/umfrage/entwicklung-der-gaspreise-fuer-haushaltskunden-seit-2006/>.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW). 2010. „Effizient, wirtschaftlich ökologisch: Energie-Contracting.“

———. 2017. „Erdgas - Zahlen, Daten, Fakten.“ Zugriff: Januar 2018.

http://www.ermstalenergie.de/fileadmin/default/user/files/Gas/Infomaterial_Gas/Erdgastechneik_Zahlen-Daten-Fakten_BDEW.pdf.

Burkhardt GmbH. 2016. „Kraft-Wärme-Kopplung mit Holzpellets.“ Zugriff: 8. Juni 2018. https://burkhardt-energy.com/download/C2f955230X156ff2dfcecX6329/Burkhardt_Energietechnik_2016_DE_web.pdf.

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. [C.A.R.M.E.N. e.V.]. 2019a. „Preisentwicklung bei Holzpellets - Der Holzpellet-Preis-Index: Chart.“ Zugriff: 10. Juli 2019. <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets>.

———. 2019b. „Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln - der Energieholz-Index: Chart.“ Zugriff: 10. Juli 2019. <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel>.

- co2online gGmbH. 2018a. „Flüssiggastank: Fakten zu Größe, Anschaffung & Wartung.“ Zugriff: 27. März 2018. <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/fluessiggas/fluessiggastank/#c99421>.
- . 2018b. „Vergleich: Flüssiggas, Erdgas oder Heizöl?“. Zugriff: 25. April 2018. <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/fluessiggas/vergleich-fluessiggas-erdgas-oder-heizoel/>.
- Conrads, Lisa. 2019. „Optionen nach Ablauf des EEG-Förderanspruchs – Welche Vermarktungsperspektiven haben Anlagenbetreiber?“. Zugriff: 18. Juli 2019. https://www.energieagentur.nrw/finanzierung/stromvermarktung/options_nach_ablauf_des_eeg-foerderanspruchs.
- Czycholl, Harald. 2016. „Die Schummelei mit dem Ökogas.“ *Welt*, 2016.
- Deutsche Auftragsagentur GmbH [DAA]. 2018. „Holzpellettheizung Kosten & Preise 2018 im Überblick.“ Zugriff: 23. März 2018. <https://www.heizungsfinder.de/pellettheizung/kostenuebersicht>.
- § 559 Mieterhöhung nach Modernisierungsmaßnahmen - Mietrechtsanpassungsgesetz. MietAnpG. Deutscher Bundestag 2648. Zugriff: 1. Juli 2019. <https://dejure.org/gesetze/BGB/559.html>.
- Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung. KWK-G. Deutscher Bundestag. 2015. Zugriff: 21. Juli 2019. https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/KWKG.pdf.
- Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. EEG. Deutscher Bundestag. 2017. Zugriff: 21. Juli 2019. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf.
- easyHeizung GmbH. 2018a. „Flüssiggastank: Standort, Größe, Kosten, Planung, Prüfung.“ Zugriff: 29. März 2018. <https://www.easyheizung.de/fluessiggastank/>.
- . 2018b. „Pellettheizung: Funktion, Kosten, Verbrauch und Lagerung bei einer Pellettheizung.“ Zugriff: 13.04.2018. <https://www.easyheizung.de/pellettheizung>.
- Eikmeier, Bernd, Marian Klobasa, Felipe Toro und Gerald Menzler. 2011. „Potenzialerhebung von Kraft-Wärme-Kopplung in Nordrhein-Westfalen.“

- Energieagentur.NRW. 2011. „Erhebung: "Wo im Haushalt bleibt der Strom?".“ Zugriff: 1. Juli 2019. https://energiertools.ea-nrw.de/_database/_data/datainfopool/erhebung_wo_bleibt_der_strom.pdf.
- Energie-Experten.org. 2018. „Ratgeber: Technik und Kosten einer Flüssiggasheizung.“ Zugriff: 27. März 2018. <https://www.energie-experten.org/heizung/gasheizung/fluessiggas/fluessiggasheizung.html>.
- energieheld GmbH. 2018a. „Gas-Brennwertkessel: mit diesen Kosten muss man rechnen.“ Zugriff: 26. April 2018. <https://www.energieheld.de/heizung/gasheizung/brennwertkessel/kosten>.
- . 2018b. „Kosten einer Pelletheizung - mit diesen Kosten sollten Sie rechnen!“. Zugriff: 23. März 2018. <https://www.energieheld.de/files/pdf/368%20Kosten%20einer%20Pelletheizung%200%20Uebersichtlich%20dargestellt.pdf>.
- . 2018c. „Ölheizung Kosten - mit Förderung und Brennwerttechnik.“ Zugriff: 29. März 2018. <https://www.energieheld.de/heizung/oelheizung/kosten>.
- Energiewerkstatt - Gesellschaft für rationelle Energie mbH & Co. KG [Energiewerkstatt]. 2019. „Blockheizkraftwerke.“ Zugriff: 19. Juni 2019. <https://www.energiewerkstatt.de/blockheizkraftwerke/#section-779>.
- Erdmann, Georg und Peter Zweifel. 2010. *Energieökonomik: Theorie und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg.
- European Energy Exchange AG (EEX). 2019. „Üblicher Strompreis gemäß KWK-Gesetz: KWK-Index (Deutschland).“ Zugriff: 18. Juli 2019. <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/spotmarkt/kwk-index>.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). 2013. „Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen.“
- . 2018. „Marktübersicht Hackschnitzelheizungen.“ Zugriff: 27. März 2018. http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/hackschnitzelheizungen_web.pdf.

- FMH-Finanzberatung. 2019. „Detail-Chart - Detaillierte Darstellung von Zinsverläufen bis zu 20 oder 30 Jahre. 2017.“ Zugriff: 2. Juli 2019. <http://fmh-index.fmh-rechner.de/fmh-index/zinsentwicklung/detailversion/>.
- forstpraxis.de. 2018. „Preisentwicklung für Holzpellets in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2018 (in Euro pro Tonne).“ Chart. Zugriff: 10. Juli 2019. <https://printkr.hs-niederrhein.de:2066/statistik/daten/studie/214738/umfrage/preisentwicklung-fuer-holzpellets-in-deutschland/>.
- Hermann, Michael und Jürgen Weber. 2011. *Öfen und Kamine: Raumheizungen fachgerecht planen und bauen*. Berlin, Wien, Zürich.
- Hubert Tippkötter GmbH [Tippkötter]. 2019. „BHKW für den Betrieb mit Heizöl.“ Zugriff: 19. Juni 2019. <https://www.tippkoetter.de/heiz-oel-bhkw.html>,
- Hundt, Dennis. 2017. „Mieterhöhung nach § 559 BGB: Modernisierung.“ Zugriff: 25. Januar 2017. <http://www.mietrecht.org/mieterhoehung/mieterhoehung-559-bgb/>.
- Institut für Wärme und Oeltechnik. 2018. „Heizöl.“ Zugriff: 2. Mai 2018. <https://www.zukunftsheizen.de/heizoel.html>.
- Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS). 2016. „GEMIS-Datenbank des IINAS - Version 4.95.“
- Kesselheld GmbH. 2018a. „Flüssiggastank – Preise, Größen & Vorschriften im Überblick.“ Zugriff: 26. März 2018. <https://www.kesselheld.de/fluessiggastank>.
- . 2018b. „Gas Brennwertkessel im Vergleich, Kosten, Vor- & Nachteile.“ Zugriff: 26. April 2018. <https://www.kesselheld.de/gas-brennwertkessel/>.
- . 2018c. „Pellet BHKW im Überblick: Kosten & Vor- und Nachteile.“ Zugriff: 22. Januar 2018. <https://www.kesselheld.de/pellet-bhkw>.
- Kessler, Stefan. 2019. „Günstige Gasanbieter im Vergleich 2019.“ Zugriff: 1. Juli 2019. <https://www.guenstige-gasanbieter.de/>.
- Lendt, Benno und Günter Cerbe. 2016. *Grundlagen der Gastechnik: Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung*.
- LWF-Merkblatt 12: *Der Energieinhalt von Holz*. 2014. 30.000 Stück. LWF-Merkblatt 12. Freising. Zugriff: 2. Mai 2017.

<https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-12-energiegehalt-holz.pdf>.

Minaeralöl Wirtschaftsverband e.V. [MWV]. 2019. „Durchschnittlicher Verbraucherpreis für leichtes Heizöl in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2019 (in Cent pro Liter).“ Chart. Zugriff: 10. Juli 2019. <https://printkr.hs-niederrhein.de:2066/statistik/daten/studie/2633/umfrage/entwicklung-des-verbraucherpreises-fuer-leichtes-heizoel-seit-1960/>.

Newiadomsky, Charlotte und Frank Alsmeyer. 2017. „Abschlussbericht Arbeitspaket 3.2 „Ergänzung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung um die Interessengruppe der Eigentümergemeinschaft.“.

NGN Netzgesellschaft Niederrhein mbH. 2017. „Referenzpreisblatt vermiedene Netzentgelte gültig ab 01. Januar 2018.“ Zugriff: 18. Juli 2019. https://www.ngn-mbh.de/fileadmin/media/swk-netze/Datensammlung/Ver%C3%B6ffentlichungen/Preisbl%C3%A4tter/Referenzpreisblatt_vNNE.pdf.

Nguyen, Minh D. 2019. „Was kostet eine neue Ölheizung?“. Zugriff: 3. Juli 2019. <https://heizung.de/oelheizung/tipps/was-kostet-eine-neue-oelheizung/>.

ÖkoFEN Forschungs- und Entwicklungs GmbH [ÖkoFEN]. 2018. „Pellematic Smart_e.“ Zugriff: 10. April 2018. http://www.okofen-e.com/de/pellematic_smart_e.

Paschotta, Rüdiger. 2012. „Stromtarif.“ Zugriff: 3. Juli 2019. <https://www.energielexikon.info/stromtarif.html>.

Raatschen Heizung. 2019. „Biomasse-Heizung: Ein Überblick über die Kosten für den Einbau einer Pelletheizung.“ Zugriff: 8. Juli 2019. <https://raatschen.de/biomasse-pelletheizung-2/>.

Scholz, Carolin. 2017. „Gasumstellung: Das müssen Sie wissen.“ *Westdeutsche Zeitung*, 2017. 27.04.2017. Zugriff: 19. Juni 2019. <https://www.stadtwerke-kempen.de/de/Kopfnavigation/Unternehmen/Wartsberg-Quartierskonzept/Pressespiegel/Pressespiegel/WZ-28.04.17-Umstellung-H-Gas.pdf>.

- SenerTec GmbH. 2019. „Dachs 2.9: Der kleine Bruder des Dachs 5.5.“ Zugriff: 19. Juni 2019. <https://www.senertec.de/wp-content/uploads/2019/05/4797-414-001-Infoblatt-Dachs-2.9.pdf>.
- Smolka, Thomas M. 2008. „Ökologisch-technische Auswirkungen dezentraler Energieversorgungsszenarien mit Blockheizkraftwerken in elektrischen Verteilungsnetzen.“ Dissertation.
- Spanner Re² GmbH. 2018. „HKA 35/45/49.“ Zugriff: 2. Mai 2018. <http://www.holz-kraft.com/de/produkte/hka-35-45-49.html>.
- Stadt Krefeld. 2012. „Statistisches Jahrbuch 2012 der Stadt Krefeld.“
- Stadtwerke Krefeld AG [SWK AG]. 2017. „meinSWK DIREKT Strom.“ Zugriff: 10. November 2017. <https://www.swk.de/privatkunden/energie/strom/strom-fuer-krefeld/meinswk-direkt-strom.html>.
- Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe [TFZ]. 2018. „Anschaffungskosten von Heizungsanlagen im Vergleich.“ Zugriff: 9. April 2018. <http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/energetischenutzung/035096/index.php>.
- Tyczka Totalgaz. 2018. „Energiebevorratung - Individuell mit Flüssiggas für de Privatbereich.“ Zugriff: 25. April 2018. <https://www.tyogaz.de/content/download/1021/10554/Tankaufstellung%20Privat.pdf>.
- Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. 2017. „Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE) - Zusatzbonus Heizungspaket.“ Zugriff: 11. September 2017. <http://www.bauforderer.de/content/anreizprogramm-energieeffizienz-apee>.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. [VDI]. 2012. *VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen-Grundlagen und Kostenberechnung* ICS 91.140.01, Nr. 2067. Düsseldorf.
- Verivox. 2018. „Anbieter Montana - Anteil Biogas 10 %, Erdgas 90 %.“ 5000 kWh Verbrauch für 50m² in Krefeld (nur Biogastarife). Zugriff: 16. März 2018. <https://www.verivox.de/gasvergleich/vergleich/#/?plz=47805&persons=on&usage=5000&bonus=OnlyCompliant&profile=H0&product=gas&source=2&gclid=CjwKCAjwmZbpBRAGEiwADrmVXrvrRhXOkigFfPrqdiLB1ShIWujh->

KiU01zWINlo6ee8VRb6sWDgWhoC5XIQAvD_BwE&q=WzUsMCwwLDEsMCwwL
DAsMSwyMCwwLDEsNTEzMjk1LCIwliwwLDEyLDEyLDUwMDAsMCwwLDEyLDE
sNiwTMSwxLDAsMCwiVG90YWxDb3N0cyIsIkFzY2VuZGluZyIsIk5vbmUiLDkyODh
d&partnerid=1.

Wesselak, Viktor, Thomas Schabbach, Thomas Link und Joachim Fischer. 2017.
Handbuch Regenerative Energietechnik: Springer Vieweg.

7 Anhang

7.1 Übersicht der Leistungs- und Grundpreise je Energieträger und Versorger

Preis Holzpellets Krefeld	0,059	€/kWh			
Preis Holzpellets allgemein	0,065	€/kWh			
<hr/>					
Preis Flüssiggas Krefeld	0,07	€/kWh			
<hr/>					
Preis Holzhackschnitzel allgemein	0,036	€/kWh			
<hr/>					
Leistungspreis Biogas	0,0565	€/kWh			
Grundpreis Biogas	59,98	€/a			
<hr/>					
Preis Heizöl Krefeld	0,055	€/kWh			
Preis Heizöl allgemein	0,058	€/kWh			
<hr/>					
Leistungspreis Gas SWK	0,0514	€/kWh	Gaspreis Fremdanbieter	Fremd 1	Fremd 2
Grundpreis Gas SWK	143,76	€/a	Leistungspreis [€/kWh]	0,0482	0,0464
Boni Gas SWK	0	€/a	Grundpreis [€/a]	119,4	166,8
			Boni [€/a]	70	99
<hr/>					
Strompreise SWK			Strompreis Fremdanbieter	Fremd 1	Fremd 2
Leistungspreis	0,2608	€/kWh	Leistungspreis [€/kWh]	0,277	0,2647
Grundpreis	111,6	€/a	Grundpreis [€/a]	105,6	114,48

7.2 Ergebnistabellen der Kapitalwertmethode aus Sicht der Mieterinnen

In den folgenden Tabellen sind die Kapitalwerte der verschiedenen Heizungsanlagen aus Sicht der Mieterinnen in Wohngebäuden mit den Baujahren für die verschiedenen Wohnungsgrößen

- vor 1919 (Tabelle 5)
 - zwischen 1919 - 1948 (Tabelle 6)
 - zwischen 1949 - 1978 (Tabelle 7)
 - zwischen 1979 - 1986 (Tabelle 8)
- < 40 m²
 - 40 - 59 m²
 - 60 - 79 m²
 - 80 - 99 m²
 - 100 - 119 m²
 - > 120 m²

zusammengefasst.

Tabelle 21: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr vor 1919

Wohnungsgröße	KWK-Inno.Net Krefeld	Brennwertkessel Erdgas	BHKW Erdgas	Brennwertkessel Flüssiggas	BHKW Flüssiggas	Brennwertkessel Holzpellets	BHKW Holzpellets	Brennwertkessel Holzhackschnitzel	Brennwertkessel Biogas	BHKW Biogas	Brennwertkessel Heizöl	BHKW Heizöl
< 40 m ²	-3.399 €	-4.237 €	-4.170 €	-5.544 €	-8.192 €	-6.098 €	-7.683 €	-6.141 €	-4.044 €	-10.982 €	-3.456 €	-3.456 €
40 bis 59 m ²	-4.769 €	-6.314 €	-6.247 €	-9.194 €	-13.608 €	-10.122 €	-12.765 €	-10.210 €	-6.343 €	-17.905 €	-5.722 €	-5.722 €
60 bis 79 m ²	-6.175 €	-8.425 €	-8.358 €	-12.890 €	-19.070 €	-14.187 €	-17.887 €	-14.304 €	-8.680 €	-24.868 €	-8.026 €	-8.026 €
80 bis 99 m ²	-7.581 €	-10.535 €	-10.468 €	-16.586 €	-24.531 €	-18.252 €	-23.009 €	-18.398 €	-11.018 €	-31.830 €	-10.330 €	-10.330 €
100 bis 119 m ²	-8.987 €	-12.646 €	-12.578 €	-20.282 €	-29.993 €	-22.317 €	-28.131 €	-22.491 €	-13.355 €	-38.792 €	-12.634 €	-12.634 €
> 120 m ²	-10.428 €	-14.393 €	-14.326 €	-23.083 €	-33.677 €	-25.203 €	-31.545 €	-25.053 €	-15.335 €	-43.085 €	-14.579 €	-14.579 €

Tabelle 22: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr zwischen 1919 und 1948

Wohnungsgröße	KWK-Inno.Net Krefeld	Brennwertkessel Erdgas	BHKW Erdgas	Brennwertkessel Flüssiggas	BHKW Flüssiggas	Brennwertkessel Holzpellets	BHKW Holzpellets	Brennwertkessel Holzhackschnitzel	Brennwertkessel Biogas	BHKW Biogas	Brennwertkessel Heizöl	BHKW Heizöl
< 40 m ²	-3.435 €	-4.271 €	-4.203 €	-5.590 €	-8.239 €	-6.139 €	-7.725 €	-6.166 €	-4.084 €	-11.021 €	-3.495 €	-3.495 €
40 bis 59 m ²	-4.829 €	-6.370 €	-6.303 €	-9.271 €	-13.685 €	-10.191 €	-12.833 €	-10.251 €	-6.408 €	-17.971 €	-5.786 €	-5.786 €
60 bis 79 m ²	-6.259 €	-8.503 €	-8.436 €	-12.998 €	-19.177 €	-14.283 €	-17.983 €	-14.362 €	-8.772 €	-24.959 €	-8.116 €	-8.116 €
80 bis 99 m ²	-7.688 €	-10.636 €	-10.569 €	-16.725 €	-24.670 €	-18.376 €	-23.133 €	-18.473 €	-11.136 €	-31.948 €	-10.445 €	-10.445 €
100 bis 119 m ²	-9.118 €	-12.769 €	-12.701 €	-20.452 €	-30.162 €	-22.469 €	-28.283 €	-22.583 €	-13.500 €	-38.937 €	-12.775 €	-12.775 €
> 120 m ²	-10.584 €	-14.539 €	-14.472 €	-23.285 €	-33.878 €	-25.383 €	-31.725 €	-25.162 €	-15.507 €	-43.256 €	-14.747 €	-14.747 €

Tabelle 23: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr zwischen 1949 und 1978

Wohnungsgröße	KWK-Inno.Net Krefeld	Brennwertkessel Erdgas	BHKW Erdgas	Brennwertkessel Flüssiggas	BHKW Flüssiggas	Brennwertkessel Holzpellets	BHKW Holzpellets	Brennwertkessel Holzhackschnitzel	Brennwertkessel Biogas	BHKW Biogas	Brennwertkessel Heizöl	BHKW Heizöl
< 40 m ²	-3.380 €	-4.220 €	-4.152 €	-5.520 €	-8.168 €	-6.076 €	-7.662 €	-6.128 €	-4.024 €	-10.961 €	-3.436 €	-3.436 €
40 bis 59 m ²	-4.739 €	-6.286 €	-6.219 €	-9.155 €	-13.569 €	-10.087 €	-12.729 €	-10.189 €	-6.310 €	-17.872 €	-5.689 €	-5.689 €
60 bis 79 m ²	-6.132 €	-8.385 €	-8.317 €	-12.835 €	-19.015 €	-14.138 €	-17.837 €	-14.274 €	-8.633 €	-24.821 €	-7.980 €	-7.980 €
80 bis 99 m ²	-7.526 €	-10.484 €	-10.416 €	-16.515 €	-24.460 €	-18.188 €	-22.945 €	-18.359 €	-10.957 €	-31.769 €	-10.271 €	-10.271 €
100 bis 119 m ²	-8.919 €	-12.582 €	-12.515 €	-20.195 €	-29.906 €	-22.239 €	-28.053 €	-22.445 €	-13.281 €	-38.718 €	-12.561 €	-12.561 €
> 120 m ²	-10.348 €	-14.318 €	-14.251 €	-22.980 €	-33.573 €	-25.110 €	-31.453 €	-24.997 €	-15.247 €	-42.997 €	-14.494 €	-14.494 €

Tabelle 24: Kapitalwerte aus Sicht der Mieterinnen in einem Wohngebäude mit einem Baujahr zwischen 1979 und 1986

Wohnungsgröße	KWK-Inno.Net Krefeld	Brennwertkessel Erdgas	BHKW Erdgas	Brennwertkessel Flüssiggas	BHKW Flüssiggas	Brennwertkessel Holzpellets	BHKW Holzpellets	Brennwertkessel Holz-hackschnitzel	Brennwertkessel Biogas	BHKW Biogas	Brennwertkessel Heizöl	BHKW Heizöl
< 40 m ²	-2.627 €	-3.513 €	-3.446 €	-4.547 €	-7.196 €	-5.205 €	-6.791 €	-5.602 €	-3.196 €	-10.133 €	-2.626 €	-2.626 €
40 bis 59 m ²	-3.496 €	-5.120 €	-5.053 €	-7.550 €	-11.964 €	-8.650 €	-11.293 €	-9.322 €	-4.943 €	-16.506 €	-4.353 €	-4.353 €
60 bis 79 m ²	-4.387 €	-6.748 €	-6.681 €	-10.581 €	-16.761 €	-12.120 €	-15.820 €	-13.057 €	-6.715 €	-22.902 €	-6.103 €	-6.103 €
80 bis 99 m ²	-5.279 €	-8.376 €	-8.309 €	-13.613 €	-21.558 €	-15.590 €	-20.347 €	-16.792 €	-8.487 €	-29.299 €	-7.854 €	-7.854 €
100 bis 119 m ²	-6.170 €	-10.004 €	-9.937 €	-16.644 €	-26.355 €	-19.061 €	-24.875 €	-20.286 €	-10.259 €	-35.696 €	-9.605 €	-9.605 €
> 120 m ²	-7.084 €	-11.257 €	-11.190 €	-18.765 €	-29.358 €	-21.337 €	-27.679 €	-22.721 €	-11.659 €	-39.409 €	-10.983 €	-10.983 €

7.3 Ergebnisdiagramme der Kapitalwertmethode aus Sicht der Mieterinnen

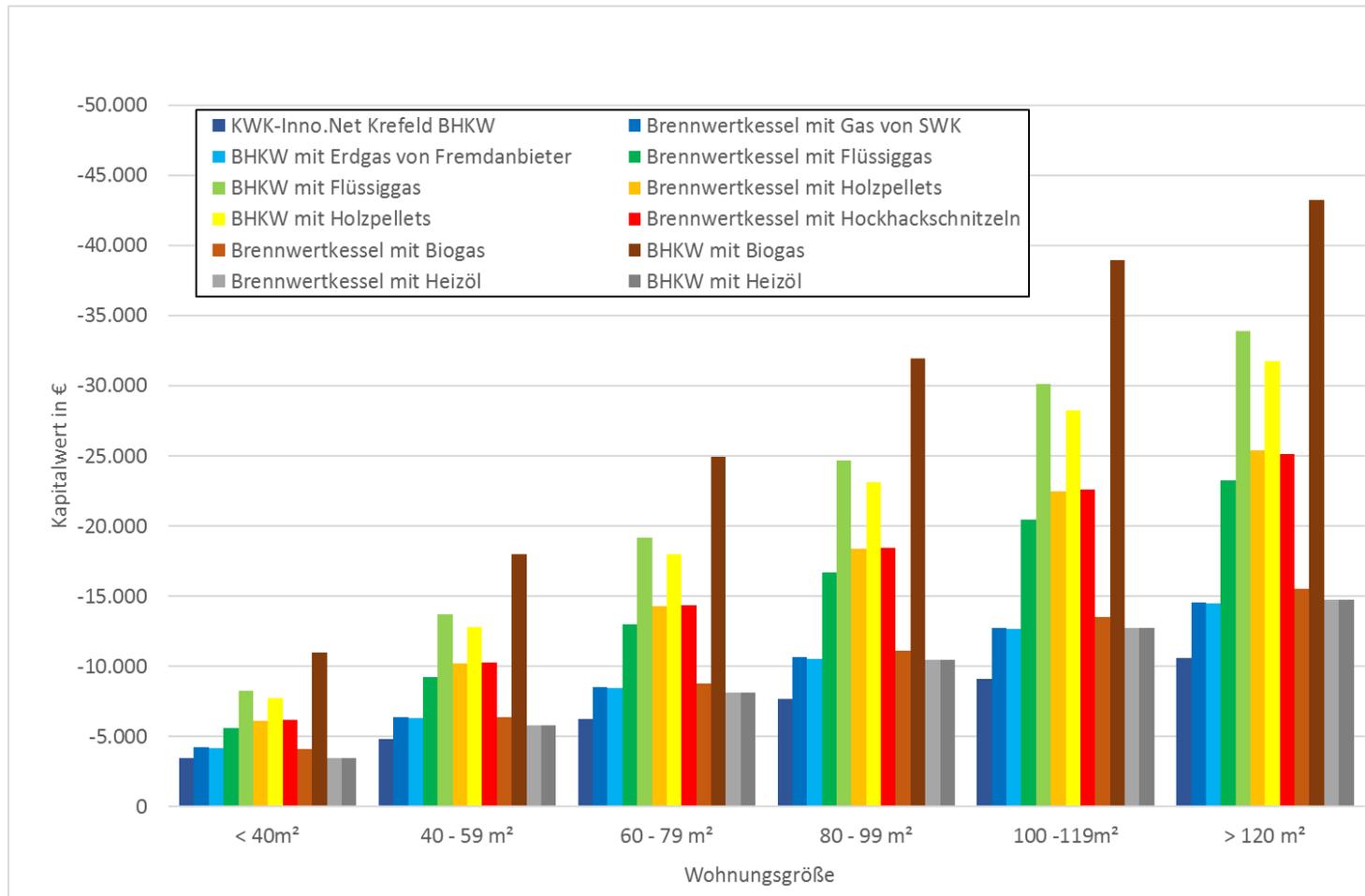


Abbildung 4: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter 1919 - 1948

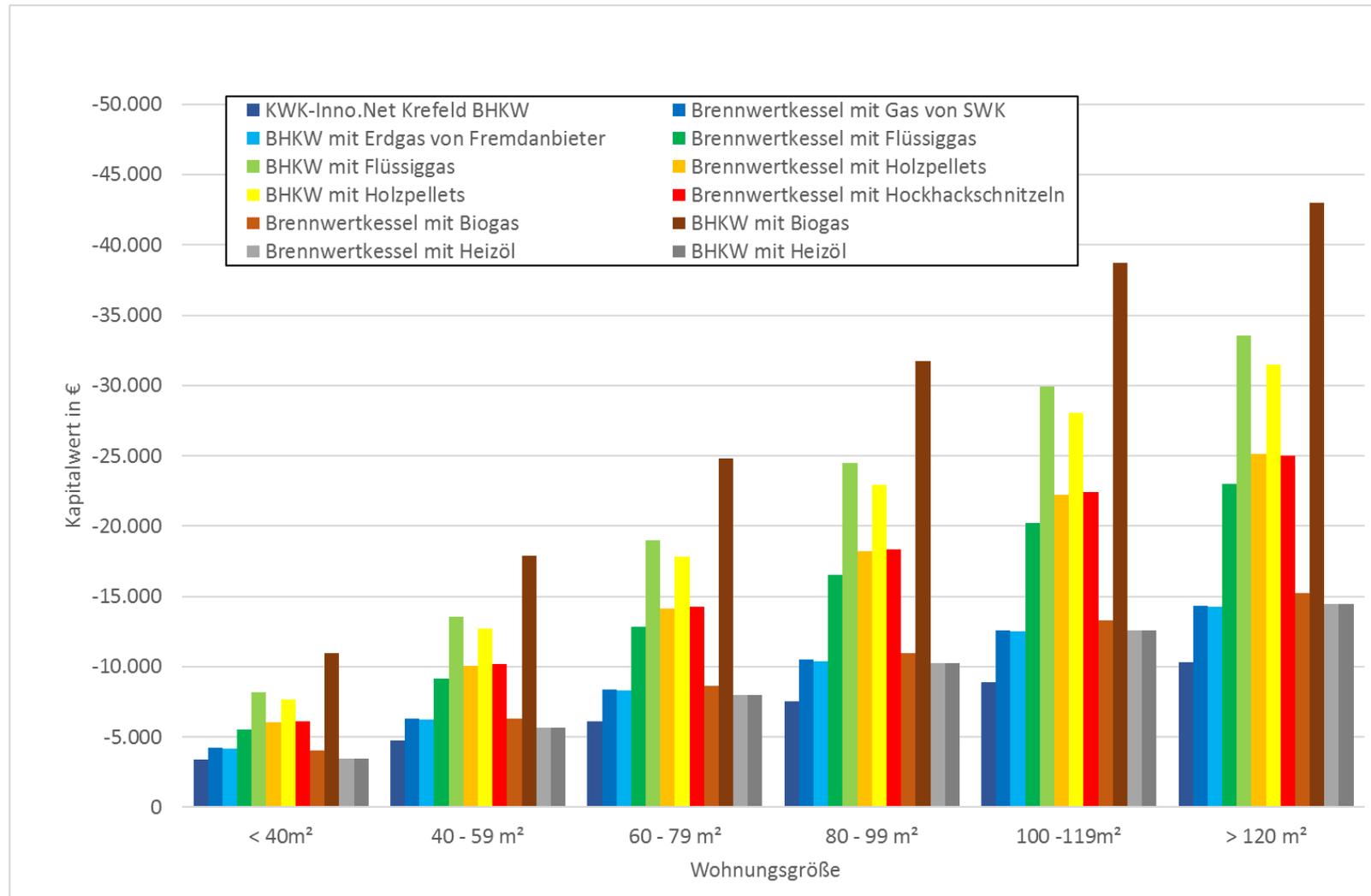


Abbildung 5: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter 1949 - 1978

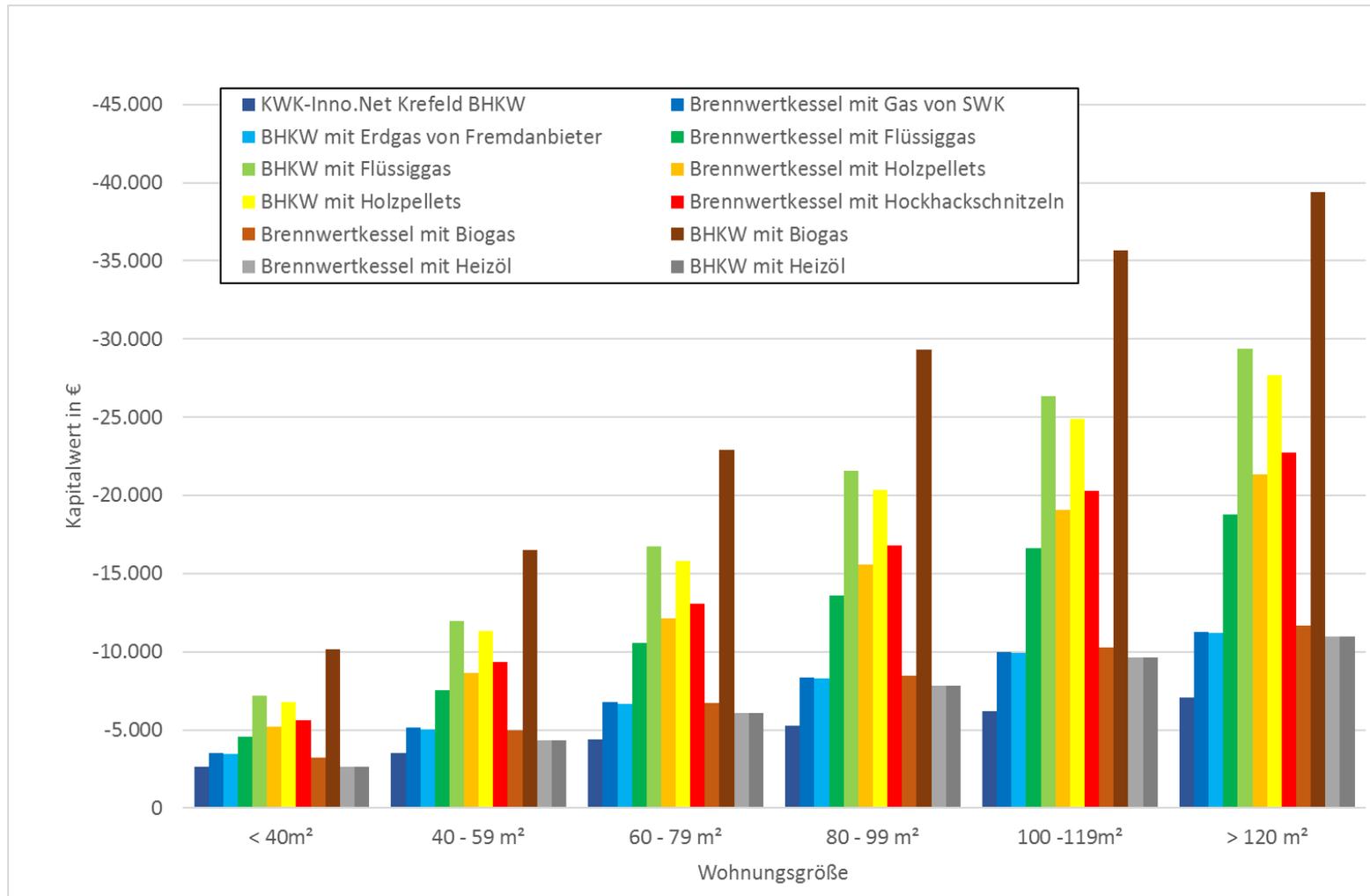


Abbildung 6: Heizkosten inkl. Mieterhöhung durch Sanierung für Gebäudealter 1979 - 1986