

Angebot Nr. 2204300

Energiekonzept für das Neubaugebiet „Bellingholz-Süd“ in Werne



Januar 2023

Bearbeitung durch:

Gertec GmbH Ingenieurgesellschaft
Martin-Kremmer-Str. 12
45327 Essen
Telefon: +49 [0]201 24 564-0

Auftraggeberin:

Salzgitter Klöckner-Werke GmbH
Eisenhüttenstraße 99
38239 Salzgitter

Dieser Bericht darf nur unverkürzt vervielfältigt werden. Eine Veröffentlichung, auch auszugsweise, bedarf der Genehmigung durch die Verfasser.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Ausgangslage	7
1.1 Bedarfsanalyse	9
1.2 Wärme	9
1.3 Strom	12
1.4 Kälte (Kühlung, Wärmeschutz)	14
2 Versorgungsoptionen	16
2.1 Begriffserläuterungen in der Wärmeverteilung und Erzeugung	16
2.2 Techniken in der Wärmerzeugung	17
3 Potenzialanalyse	20
3.1 Solare Potenziale	21
3.2 Geothermische Potenziale	27
3.3 Leitungsgebundene Versorgung	34
4 Bewertung und Vorauswahl	35
5 Beschreibung der Versorgungsvarianten	37
6 Variantenvergleich	39
6.1 Rahmenparameter	39
6.2 Vergleich Umweltbilanz	40
6.3 Wirtschaftlichkeitsvergleich	41
6.4 Empfehlung	43
7 Anhang	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Städtebaulicher Entwurf Bellingholz-Süd inkl. Gebädenummerierung	8
Abbildung 2	Wärmebedarf nach Gebäudestandard	10
Abbildung 3	Verteilung elektrische Energie bei vollständiger Ladung der E-Fahrzeuge im Baugebiet	13
Abbildung 4	Solarer Ertrag in Abhängigkeit der Anlagenausrichtung	22
Abbildung 5	Ertragssimulation in Süd-Ost und Süd-West Ausrichtung	23
Abbildung 6	Bilanzielle Nutzung des PV-Ertrags	24
Abbildung 7	Solarer Deckungsgrad am Beispiel DHH groß	26
Abbildung 8	Geothermische Energiequellen	27
Abbildung 9	Wasser- und Heilquellenschutzgebiete im Raum Werne	28
Abbildung 10	Öffentliche Freiflächen innerhalb des Baugebiets	28
Abbildung 11	Freiflächenpotenzial Umgebung Bellingholz-Süd	29
Abbildung 12	Spez. Entzugsleistungen im Bereich des Baugebiets und Flächenbedarf EWK	30
Abbildung 13	Zu erwartendes Bohrungsprofil und Wärmeleitfähigkeit	31
Abbildung 14	Flächenbedarf Erdsonden	31
Abbildung 15	Prüfung Grundstücksflächen hinsichtlich geothermischer Eignung	32
Abbildung 16	Erdgasbestandsnetz und mögliche Zuleitungen ins Baugebiet	34
Abbildung 17	Bewertung möglicher Versorgungsvarianten (Stand 11.10.22)	35
Abbildung 18	Absolute und spez. Emissionen nach GEG 2020	40
Abbildung 19	Flächenspezifische Emissionen und Primärenergiefaktor	41
Abbildung 20	Spezifischer Wärmepreis über alle Gebäudetypen	42
Abbildung 21	Spezifischer Wärmepreis für EFH und MFH	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Gemittelte Gebäudekennwerte Wärme (KfW 40 Standard)	10
Tabelle 2	Gemittelte Gebäudekennwerte Wohneinheiten und Personen	11
Tabelle 3	Strombedarf an Abhängigkeit der Personenzahl	12
Tabelle 4	Kennwerte E-Mobilität	13
Tabelle 5	Übersicht der Versorgungsoptionen	19
Tabelle 6	Ergebnisse Ertragssimulation für Süd-Ost und Süd-West Ausrichtung	23
Tabelle 7	Flächenverfügbarkeit nach Gebäudetypen	23
Tabelle 8	Gemittelte PV-Kennwerte	24
Tabelle 9	Pro und Contra von zentraler und dezentraler Versorgung	36
Tabelle 10	Leistungen Luft-Wasser Wärmepumpen	37
Tabelle 11	Verwendete CO ₂ e-Faktoren und PEF	39
Tabelle 12	THG-Bilanz, PV-Leistung und Anteil PV-Fläche	45

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
BBergG	Bundesberggesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
COP	Coefficient of performance
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DH	Doppelhaus
DIN	Deutsches Institut für Normung
EFH	Einfamilienhaus
EGLV	Emschergenossenschaft und Lippeverband
EWK	Erdwärmekollektoren
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GWP	Global Warming Potential
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
KA	Kläranlage
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KiTa	Kindertagesstätte
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt Peak
MFH	Mehrfamilienhaus
MWh	Megawattstunde
PEF	Primärenergiefaktor
PV	Photovoltaik
RH	Reihenhaus
ST	Solarthermie
STA	Solarthermische Anlage
stdb.	städtebaulich
THG	Treibhausgas
THGN	Treibhausgasneutralität
TWW	Trinkwarmwasser
VRK	Vakuumröhrenkollektor
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WP	Wärmepumpe

1 Ausgangslage

Im Rahmen des laufenden Bauleitplanverfahrens der Stadt Werne soll für das zukünftig entstehende Neubaugebiet „Bellingholz-Süd“ in Werne ein Energiekonzept erstellt werden, welches anhand der vorliegenden Ausgangslage ökologische und wirtschaftlich umsetzbare Versorgungstechniken untersucht.

Zielsetzungen

Die effiziente und klimaschonende Versorgung von Baugebieten mit Energie leistet einen erheblichen Beitrag zur Einhaltung von Klimaschutzzielen. Hierbei dürfen allerdings Aspekte wie die Betriebssicherheit und auch die Akzeptanz nicht außen vor gelassen werden. Aus unserer Sicht besteht der Anspruch, eine zukunftsfähige Energiekonzeption unter Berücksichtigung der Aspekte

- Reduzierung des Energiebedarfs,
- Optimierung der Energieversorgung und
- Optimierung des Einsatzes erneuerbarer Energien

zu erstellen, die dauerhaft niedrige Energiekosten bei gleichzeitiger hoher Betriebs- und Planungssicherheit für den Nutzer garantiert und bei der die klimapolitischen Ziele der Stadt Werne bzw. bundesweite Klimaziele berücksichtigt werden.

Das im Sommer 2021 verabschiedete Klimaschutzgesetz 2030 der Bundesregierung verschärft die bisherigen Klimaschutzvorgaben. Die Treibhausgasneutralität soll bereits 2045 erreicht werden. Die dazu erforderlichen Maßnahmen und Werkzeuge werden (seit Anfang 2022) von der neuen, im Dezember 2021 vereidigten Bundesregierung überarbeitet und an die gestiegenen energie- und klimapolitischen Anforderungen angepasst. Hierzu sei auf das sogenannte Osterpaket (Stand 06.04.22) sowie auf den Arbeitsplan Energieeffizienz (Stand 17.05.22) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz verwiesen (BMWK).

Nach Abstimmung mit den Projektteilnehmenden der Stadt Werne bestehen für das Baugebiet keine Vorgaben bzgl. der Erfüllung von Klimazielen. Mit Rücksicht auf die Klimaschutzvorgaben der Bundesregierung, nämlich bis zum Jahr 2045 eine Klimaneutralität zu erreichen, wird für das Baugebiet Bellingholz-Süd eine klimaschonende Bedarfsgrundlage und ein hoher Anteil erneuerbarer Energien in der Bedarfsdeckung erforderlich. Um den hohen klimapolitischen Herausforderungen gerecht zu werden, wird mit dem Energiekonzept eine auf das Jahr gerechnete bilanzielle Treibhausgasneutralität verfolgt. Demnach erfolgt eine Bilanzierung der Energiebedarfe und -Erzeugungen innerhalb der Bilanzgrenze „Baugebiet Bellingholz-Süd“. So werden bedarfsseitig die Energiemengen für Heizwärme, Trinkwarmwasser, Haushaltsstrom und E-Mobilität zusammengefasst und erzeugerseitig den Erträgen aus erneuerbaren Energiequellen bilanziell gegenübergestellt. Eine bilanzielle Treibhausgasneutralität erfordert Netto-Null-Emissionen der im Kyoto-Protokoll definierten Treibhausgase.

Vorgehensweise

Die Energie- und Umweltbilanz des zu entwickelnden Neubaugebietes wird zum einen durch den baulichen Standard der Gebäude und zum anderen durch die Systeme zur Versorgung mit Heizenergie, Warmwasser und Strom bestimmt. Im Rahmen der Konzepterstellung werden daher folgende Punkte betrachtet:

- Die zukünftig zu erwartenden Energiebedarfe für Raumwärme, Warmwasser, Haushaltsstrom als auch für die Elektromobilität.
- Die Verfügbarkeit und Integration eines möglichst hohen Anteils erneuerbarer Energien sowie ggf. die Nutzung weiterer endogener Potenziale (sich im Baugebiet befindend und/oder geografisch naheliegend).
- Die Erfordernisse an die technische Konzeption sowie die ggf. stufenweise Realisierung der Energieversorgung, die aus der zeitlichen Umsetzung der geplanten Bebauung resultieren.
- Die Auswirkungen für die späteren Investor*innen und Nutzer*innen, sowohl aus ökologischer und finanzieller Hinsicht.

Betrachtungsgebiet

Der Entwicklung des Baugebiets „Bellingholz-Süd“, welches sich im südlichen Teil von Werne befinden soll, liegt ein städtebaulicher (stdb.) Entwurf zugrunde. Das Neubaugebiet stellt eine Erweiterung der bestehenden und nördlich gelegenen Baugebiete dar. Für das Baugebiet werden in Summe 78 Wohngebäude und eine Kindertagesstätte (KiTa) vorgesehen. Die Wohngebäude lassen sich anhand des in [Abbildung 1](#) dargestellten stdb. Entwurfs in vier Gebäudetypen unterteilen. In Summe können für das Baugebiet 55 Einfamilienhäuser (EFH), 13 Doppelhäuser (DH), drei Reihenhäuser (RH) und sieben Mehrfamilienhäuser (MFH) ausgemacht werden. In Anlehnung an die spez. Gebäudegrößen der angrenzenden Bebauungen wurde für das Baugebiet eine Wohnfläche von 22.609 m² (inkl. KiTa) ermittelt, die sich auf insgesamt 165 Wohneinheiten verteilen. In der Begründung zum Bebauungsplan wird von ca. 180 Wohneinheiten ausgegangen. Diese Abweichung hat jedoch keinen unmittelbaren Einfluss auf den hier prognostizierten Energiebedarf und die Ergebnisse des Energiekonzeptes. (weitere Informationen in Kapitel 1.2)

Nachfolgend ist der stdb. Entwurf dargestellt. Dabei wurden die Gebäude mit den dazugehörigen Grundstücken durchnummeriert, um den Gebäuden für die weitere Bearbeitung spez. Kennwerte zuordnen zu können.



Abbildung 1 Städtebaulicher Entwurf Bellingholz-Süd inkl. Gebäudenummerierung

1.1 Bedarfsanalyse

Ein entscheidender Hebel bei der Realisierung eines treibhausgasneutralen Baugebiets liegt in der Vermeidung bzw. Verminderung von Energiebedarfen. Dabei stehen die Energieeinsparung und die Effizienzsteigerung im Mittelpunkt der Betrachtung. Somit sind bereits bei der Bedarfsermittlung hohe bis höchste Energiestandards vorauszusetzen.

Der Energiebedarf des Baugebiets leitet sich im Wesentlichen von den Gebäudetypen, der Nutzung und den benötigten zu beheizenden Flächen ab. Diese und weitere Informationen werden zum einem dem städtebaulichen Entwurf als auch den Gesprächsprotokollen aus Besprechungsterminen mit den Projektbeteiligten entnommen. Im Zuge der Bedarfsanalyse sind die Energieformen Wärme, Strom – inklusive Elektromobilität – und ggf. Kälte zu berücksichtigen.

1.2 Wärme

Die spezifischen Bedarfskennwerte für die Gebäudestandards KfW 55 oder KfW 40 sind aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) und den Förderrichtlinien der KfW nicht einfach abzuleiten. Der zulässige Primärenergiebedarf ist dort in Bezug auf das sogenannte Referenzgebäude definiert.

Die Primärenergieanforderungen sind in dem Gebäudeenergiegesetz über eine in weiten Bereichen gestaltbare Kombination von Hüllflächenqualität, Lüftung, PV-Eigenerzeugung und Wärmeerzeugung zu erfüllen. Bei gleichem Standard kann die an das Gebäude zu liefernde Nettoheizwärme (Q_H) sehr unterschiedlich ausfallen. Nur bei den KfW-Standards ist auch die bessere Hüllflächenqualität (als H'_T = mittlerer Transmissionswärmeverlust) ein zusätzliches Kriterium. Der Effizienzstandard KfW 40 erfordert eine um 45 % bessere Hüllfläche als das Referenzgebäude.

Auf Basis der Wohngebäudetypologie der IWU, die zusätzlich eine Differenzierung zwischen den Gebäudetypen und Effizienzstandards ermöglicht und Simulationen im Programm SOLAR COMPUTER werden spez. Bedarfskennwerte für den Heizwärmebedarf ermittelt. Nach den Angaben aus der IWU-Typologie sind je Gebäudetyp einheitliche Werte zugrunde gelegt, die sich an der vorgesehenen Bauweise, d. h. der Kompaktheit der Gebäude orientieren. Der Flächenbezug des spez. Bedarfskennwertes ist dabei die Wohnfläche und nicht die größere Energiebezugsfläche A_N des GEG. Neben einem veranschlagten Heizwärmebedarf, ist der Bedarf für Trinkwarmwasser (TWW) der Heizwärme hinzuzurechnen, um den Gesamtwärmebedarf abzubilden.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Gebäudeeffizienzstandards auf den Wärmebedarf des Baugebiets zu verdeutlichen, sind in nachfolgender Darstellung die zu erwartenden Bedarfe, die sich aus der Hüllflächenqualität und Anlagentechnik nach KfW-Standard 55, 40 und einem Standard nach Passivhaus ergeben, abgebildet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der KfW-Standard 55 seit Frühjahr 2022 nicht mehr förderfähig ist und davon ausgegangen wird, dass dieser Standard die zukünftige Mindestanforderung nach (neuem) GEG darstellen wird.

Anhand des bisherigen Planungsstandes stellen sich die thermischen Energiebedarfe (Wärmebedarfe) wie folgt dar:

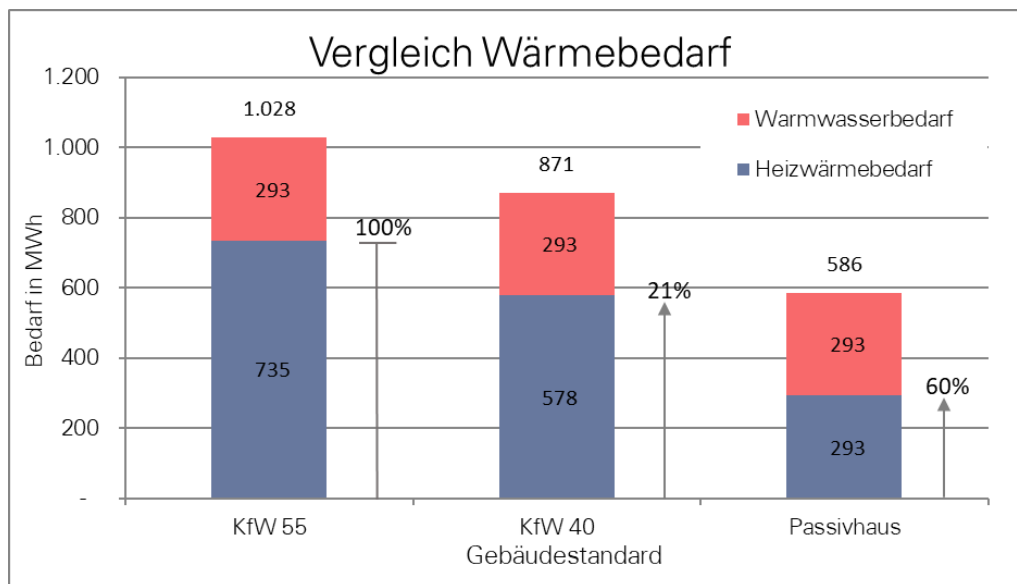


Abbildung 2 Wärmebedarf nach Gebäudestandard

Die Grafik verdeutlicht den direkten Einfluss des Gebäude- bzw. Dämmstandards auf den Heizwärmebedarf. In Folge einer verbesserten Dämmung und des Einsatzes einer Wärmerückgewinnung nimmt der Einfluss des TWW bezogen auf den Gesamtwärmebedarf zu. Demnach können bereits mit dem KfW 40 Standard mehr als 20 % an Heizwärme ggü. dem zukünftig gesetzlichen Mindeststandard eingespart werden. Nach Rücksprache mit den Projektteilnehmenden wird für das Baugebiet eine Umsetzung des KfW 40 Standards angestrebt, sodass dieser Standard für die weiteren Berechnungen zugrunde zu legen ist. Der Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasserbereitung summiert sich für den gewählten Standard auf rund 871 MWh/a bei einer aufsummierten Wohnfläche von ca. 22.610 m². Vom Gesamtenergiebedarf entfallen ca. 293 MWh/a auf den Trinkwarmwasserbedarf. Die bereitzustellende Heizleistung beläuft sich bedarfsseitig auf ca. 730 kW, insofern keine Wärmeverluste bei der Verteilung von Wärme im Baugebiet vorhanden sind (der Fall bei dezentraler Versorgung). Wird Wärme zentral und auf einem Temperaturniveau erzeugt, welches über dem der Umgebungstemperatur liegt, so entstehen Verluste bei der Wärmeverteilung, die vom zentralen Erzeuger ganzjährig zu kompensieren sind (insofern Wärmenetz ganzjährig betrieben). Im Zuge der Auswertung des stdb. Entwurfs konnten für die verschiedenen Gebäudetypen Gebäudekennwerte berechnet werden. Da die Gebäudegrößen der MFH nicht einheitlich sind, variieren die resultierenden Wohnflächen und die damit verbundenen Bedarfe. Die nachfolgenden Angaben in **Tabelle 1** sind als gemittelte Kennwerte zu verstehen.

Gebäudetyp	Anzahl	Wohnfläche	Heizwärme	TWW	Wärme gesamt	Heizlast inkl. TWW
	[-]	[m²]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kW]
EFH	55	180	4.660	2.371	7.031	6
DH	13	290	7.356	3.557	10.913	9
RH	3	650	16.488	8.892	25.379	21
MFH	7	923	23.255	11.686	34.941	29
KiTa	1	527	13.651	7.760	21.411	22
Summe	79	22.609	579.804	292.878	870.726	730

Tabelle 1 Gemittelte Gebäudekennwerte Wärme (KfW 40 Standard)

In Anlehnung an die umliegenden Gebäudegrößen der angrenzenden Baugebiete wurden für die verschiedenen Gebäudetypen eigene spez. Wohnflächen definiert, die von den Angaben aus dem stdb. Entwurf teilweise abweichen. Vor dem Hintergrund einer verbesserten Wohnraumausnutzung wurden somit die Wohnflächen der Gebäudetypen EFH, DH und RH teilweise angepasst. Für die MFH und KiTa wurden die Angaben aus dem stdb. Entwurf übernommen. Für die EFH wurde die Wohnfläche auf 180 m² festgesetzt, für die DH auf 290 m² und für die RH auf 650 m². Im Zuge einer Reduzierung der beheizten Wohnfläche, kann der Gesamtwärmebedarf gesenkt werden, was **Tabelle 1** deutlich mit dem proportionalen Verhältnis von Wohnfläche zu Heizwärme zeigt.

Der Trinkwarmwasserbedarf in Wohngebäuden ist im Wesentlichen von der zu erwartenden Personenanzahl im Gebäude abhängig. Die je Gebäudetyp zu erwartende Anzahl an Wohneinheiten (WE) und Personen wurde in Absprache mit den Projektteilnehmenden wie folgt festgelegt:

Gebäudetyp	Wohneinheiten	Personen
	[-]	[-]
EFH	1	4
DH	2	6
RH	5	15
MFH	10	20
KiTa	0	97
Summe	165	578

Tabelle 2 Gemittelte Gebäudekennwerte Wohneinheiten und Personen

Für ein EFH wurden vier Personen, für ein DH sechs Personen (drei Personen pro WE) und für ein RH 15 Personen angesetzt (drei Personen pro WE). Die Personenzahl in den MFH wurde in Anlehnung an die durchschnittliche Wohnungsgröße in Deutschland bestimmt. Diese beträgt im Jahr 2021 ca. 92 m² je Wohneinheit und die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf beläuft sich auf ca. 48 m² ¹. Somit kann in einem MFH eine Personenzahl von zwei Personen je WE angenommen werden. Für die wohnhaften Personen im Baugebiet wurde ein spez. Trinkwarmwasserbedarf von 40 Litern/Tag*Person angesetzt. Neben dem TWW-Bedarf für die wohnhaften Personen ist auch der TWW-Bedarf für die KiTa nicht zu vernachlässigen. So wurde über einen Flächenansatz von 6 m² pro Kind ² und einem Betreuungsschlüssel von 8,3 Kindern pro Betreuer ³ die zu erwartende Kinder-/Betreuerzahl von ca. 97 ermittelt. Da der Energieeinsatz für die Warmwassererwärmung niedriger als üblich ausfällt (geringere Abnahme, verringerte Temperaturen) ist hier ein spez. Verbrauchswert von 0,4 kWh/Person*Tag ⁴ angesetzt worden. Insgesamt wird für das Baugebiet eine Anzahl wohnhafter Personen von 481 kalkuliert (inkl. KiTa 578 Personen), die sich auf insgesamt 165 Wohneinheiten verteilen. Im Baugebiet leben demnach rechnerisch und im Durchschnitt 2,9 Personen in einer Wohneinheit.

Im Verlauf des Planungsprozesses wurde die Anzahl der Wohneinheiten auf ca. 180 erhöht. Da dies jedoch keinen relevanten Einfluss auf den zu erwartenden Energiebedarf hat, wird von einer nachträglichen Anpassung abgesehen.

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#zahl-der-wohnungen-gestiegen>

² https://www.gew.de/index.php?elD=dumpFile&t=f&f=48010&token=78115442434c44e04a3950ea4a6e165f9169289e&sdownload=&n=EW_09_2016_web.pdf S.20

³ <https://www.kinderinfo.de/ratgeber/betreuungsschlüssel-kitas/#Betreuungsschlüssel-in-deutschen-Kitas>

⁴ Energetische Bewertung von Gebäuden DIN V 18599-10 Tab. 7

1.3 Strom

Mit Blick auf den Bedarf an elektrischer Energie ist, neben dem Ladestrom für Elektrofahrzeuge, vor allem der Haushaltsstrom zu nennen und zu bewerten. Hier wird der Bedarf personenbezogen und unter Hinzunahme des Stromspiegels für Deutschland aus dem Jahr 2021/2022 ermittelt. Die Daten des Stromspiegels werden von der Beratungsgesellschaft CO₂online herausgegeben, welche vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert wird. Der Stromspiegel gibt grobe Richtwerte für den Bedarf an elektrischer Energie in Abhängigkeit der Personenzahl eines Haushalts und einer Verbrauchsklasse an. Für die Bedarfsermittlung wurde für das Baugebiet eine mittlere Verbrauchsklasse (Klasse C) ausgewählt, die den Ansatz eines verringerten Strombedarfs darstellt. Die zu erwartenden Bedarfe der Kategorie Haushaltsstrom stellen sich in Anlehnung der Daten von CO₂online wie folgt dar:

Personenzahl	Haus	Wohnung
	[kWh/a]	[kWh/a]
1	≤ 2.000	≤ 1.200
2	≤ 2.800	≤ 1.800
3	≤ 3.400	≤ 2.200
4	≤ 3.700	≤ 2.500

Tabelle 3 Strombedarf an Abhängigkeit der Personenzahl (in Anlehnung an CO₂online, 2021)⁵

Wie auch bei der Ermittlung des TWW-Bedarfs hat die Personenzahl in jedem Gebäude/ jeder Wohneinheit einen entscheidenden Einfluss auf den Gesamtstrombedarf eines Gebäudes. Anders als beim Wärmebedarf sind Effizienzpotenziale nicht in spezifischen Ausführungsstandards festgeschrieben, die sich untereinander auf Baugebietsebene vergleichen ließen. Wenngleich sämtliche elektrische Verbraucher europaweiten Effizienzkriterien unterliegen, ist die Nutzung und damit der Stromverbrauch völlig individuell. Das Ziel einer Energieeffizienzsteigerung kann daher bei der Ermittlung des Strombedarfes auf Gebietsebene nicht hinreichend abgebildet werden. Der Strombedarf für die Anwendungen „Licht & Kraft“ – also für Haushaltsstrom – summiert sich für die angesetzte Anzahl an Personen auf ca. 467 MWh/a.

Da neben den Wohngebäuden auch ein Strombedarf für die KiTa besteht, dieser jedoch nicht direkt von der Personenzahl abhängig sind, ist der Bedarf gesondert zu berechnen. Zur Abschätzung des Strombedarfs für die KiTa wurde auf reale Bedarfskennwerte aus dem Energiebericht der Stadt Ingolstadt aus dem Jahr 2020 zurückgegriffen⁶. Demnach kann für KiTas ein mittlerer spez. Strombedarf von 27,8 kWh/m²*a⁷ angesetzt werden. Für die KiTa ist somit mit einem Strombedarf von ca. 17,2 MWh/a zu rechnen.

Darüber hinaus ist mit einem stark ansteigenden Strombedarf für das Laden von Elektrofahrzeugen zu kalkulieren. Hier ist die Prognose der Bedarfsentwicklung wesentlich schwieriger, da auf keine belastbaren Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Nachfolgende Tabelle gibt einen ersten Überblick über die getätigten Annahmen und Kennwerte zur E-Mobilität im Baugebiet.

⁵ <https://www.stromspiegel.de/fileadmin/ssi/stromspiegel/Broschuere/stromspiegel-2021.pdf>

⁶ https://www.ingolstadt.de/Leben/Umwelt-Natur-Klima/Klima-Energie/index.php?La=1&object=tx_465.2901.1&kat=&quo=2&sub=0 S.36

⁷ Bezugsgröße Nettoraumfläche

Gebäudetyp	Anzahl E-Fahrzeuge	Anzahl Ladepunkte	Strombedarf
	[-]	[-]	[kWh/a]
EFH	1	1	5.892
DH	2	2	8.838
RH	5	5	22.096
MFH	10	3	29.040
KiTa	2	2	2.946
Summe	167	116	711.481

Tabelle 4 Kennwerte E-Mobilität

Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass mittel- bis langfristig jede Wohneinheit ein Elektrofahrzeug besitzt. Für die KiTa werden zwei E-Fahrzeuge angesetzt. Wird jeder Person eine durchschnittliche Fahrstrecke von 22 km/Tag⁸ zugrunde gelegt (wohnhaft in einer Mittelstadt in einer Stadtregion, s. Quelle), die zukünftig elektrisch gefahren wird und ein spez. Energiebedarf von ca. 18 kWh/100 km hinzugerechnet, so beläuft sich der Strombedarf für die E-Mobilität auf ca. 712 MWh/a. Dies stellt die bereitzustellende Energie dar, insofern alle E-Fahrzeuge ausschließlich im Baugebiet beladen werden. Werden nur drei Viertel der Ladevorgänge im Baugebiet getätigt und ein Viertel auswärts⁹, im Sinne einer Beladung der Fahrzeuge außerhalb des Baugebiet (Arbeitsstelle, öffentliche Ladepunkte etc.), so verringert sich der Bedarf an Ladestrom auf ca. 534 MWh/a. Infolgedessen erhöht sich der Gesamtstrombedarf für das Baugebiet in Summe auf rund 1.196 MWh/a (467 MWh/a Haushalt + 17 MWh/a KiTa + 712 MWh/a E-Mobilität) bei einer vollständigen Ladung der E-Fahrzeuge im Baugebiet. Das nachstehende Diagramm verdeutlicht noch einmal die deutliche Einflussnahme der E-Mobilität auf den Gesamtstrombedarf im Baugebiet.

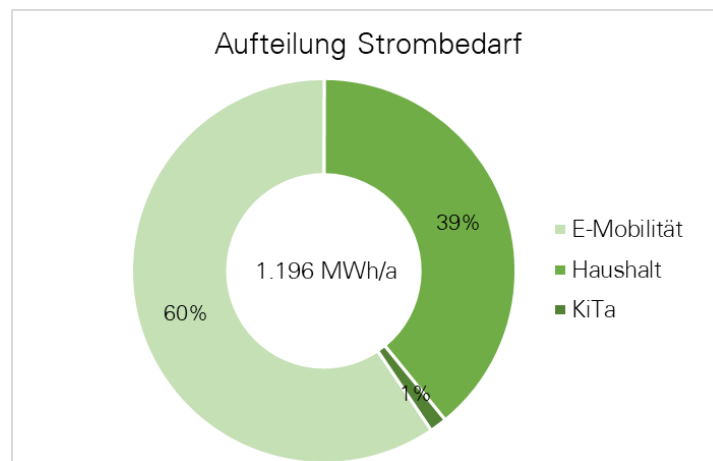


Abbildung 3 Verteilung elektrische Energie bei vollständiger Ladung der E-Fahrzeuge im Baugebiet

Die benötigte Ladeleistung der E-Mobilität nimmt einen besonderen Stellenwert in der Bereitstellung von elektrischer Leistung ein. Unter der Annahme, dass jede Wohneinheit in den EFH, den DH und den RH einen Stellplatz aufweist und mit einem Ladepunkt ausgestattet werden kann, und jeder vierten Wohneinheit in den MFH ein Zugang zu einem Ladepunkt gewährleistet werden kann errechnet sich die Gesamtanzahl an Ladepunkten im Baugebiet auf 111 (inkl. 2 Ladepunkte für die KiTa). Wird nun jedem Ladepunkt eine Ladeleistung von 11 kW zugeschrieben, ergibt dies eine maximale Gesamtleistung von 1.221 kW. Eine Installation von Schnellladern (>50 kW) erhöht die Gesamtleistung um ein Vielfaches.

⁸ http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf S. 48, Abb. 19

⁹ https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena-STUDIE_Privates_Ladeinfrastrukturpotenzial_in_Deutschland.pdf S.4

Demnach ist ein Last- und Lademanagement zur Glättung von Lastspitzen und Umverteilung von Bedarfen essenziell. Mit dem Anschluss einer steigenden Anzahl an Ladepunkten sinkt die Gleichzeitigkeit, also die Häufigkeit einer gleichzeitigen Ladung von Fahrzeugen. Bei gut 110 Ladepunkten kann die Gleichzeitigkeit um ca. 75 % reduziert werden¹⁰. Demnach wird die Last so verteilt, dass nur ca. 25 % der angesetzten Leistung zum gleichen Zeitpunkt benötigt wird, wodurch sich der tatsächliche Leistungsbedarf auf ca. 305 kW reduziert.

1.4 Kälte (Kühlung, Wärmeschutz)

Mit Blick auf den Energiebedarf des Baugebietssoll der Begriff Kälte hier im Sinne von Klimakälte bzw. Temperierung Verwendung finden. Kälte wird in den meisten Fällen mittels Kältemaschinen unter Einsatz elektrischer Energie erzeugt. Die Notwendigkeit einer flächendeckenden Kühlung bzw. Temperierung der Wohnbereiche ist zu betrachten und kritisch zu bewerten. Einerseits steigt der Bedarf an Kühlung in den Sommermonaten im Zuge des Klimawandels an, andererseits ist mit dem Betrieb von Kälteanlagen meist ein steigender Strombedarf verbunden, den es klimaneutral zu decken gilt.

Aus der Notwendigkeit zur Energieeinsparung heraus ist die aktive Kühlung mittels Kältemaschinen zu vermeiden. Der Schutz von Innenräumen vor sommerlicher Überhitzung ist in den letzten Jahren stärker in das Bewusstsein der Planer und Architekten gerückt. Die DIN 4108-2:2013-02, nach der ein ausreichender sommerlicher Wärmeschutz nachzuweisen ist, weist ausdrücklich darauf hin, dass passive Maßnahmen aktiven Kühlmaßnahmen vorzuziehen sind:

„Im Zusammenhang mit allgemeinen Energieeinsparungsmaßnahmen im Hochbau muss darauf geachtet werden, dass durch bauliche Maßnahmen, verbunden mit der Nutzung eines Gebäudes, nicht unzumutbare Temperaturbedingungen in Gebäuden entstehen, die maschinelle und energie-intensive Kühlmaßnahmen zur Folge haben. Daher muss bereits in der Planungsphase eines Gebäudes der sommerliche Wärmeschutz mit einbezogen werden, damit bereits durch bauliche Maßnahmen weitgehend verhindert wird, dass unzumutbare hohe Innentemperaturen entstehen.“¹¹

Vor diesem Hintergrund wird kein Kältebedarf, welcher einen zusätzlichen Energieverbrauch verursacht, ermittelt. Sofern in einzelnen, besonders sensiblen Wohn- und Arbeitsbereichen, wie z. B. Senioren- und Pflegeeinrichtungen oder Arztpraxen eine Temperierung oder Kühlung in den Sommermonaten nicht zu vermeiden sein wird, sind Lösungen in Verbindung mit geothermischen Energieanlagen anzuwenden. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, mit Erdsonden und Wärmepumpen im Winter Heizenergie und im Sommer Kühlung hoch effizient bereitzustellen.

Im Folgenden wird eine Auswahl an Möglichkeiten zur Reduzierung bzw. Vermeidung eines Kältebedarfs in Gebäuden gegeben. Dabei bildet der passive sommerliche Wärmeschutz eine zentrale Rolle. Unter einem passiven sommerlichen Wärmeschutz versteht man die Vermeidung der sommerlichen Überhitzung von Gebäuden durch Maßnahmen, die keinen Energiebedarf zur Kälteerzeugung bedingen. Hierzu gehören:

- Ein außen liegender Sonnenschutz, der das Gebäude vor übermäßigen solaren Gewinnen durch die transparenten Fassadenflächen schützt.
- Die Einbringung von Speichermassen, um solare und interne (durch Personen und Geräte verursachte) Wärmegewinne im Tagesverlauf aufnehmen zu können und der Lufttemperatur zu entziehen.

¹⁰ https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2020/10/V-Hinterholzer_Beucker_E-Mobilit%C3%A4t.pdf S. 3, Abb. 1

¹¹ DIN 4108-2:2013-02, Kapitel 4.3.1

- Die Möglichkeit einer nächtlichen Querlüftung der Räume, um die von den Bauteilen tagsüber aufgenommene Wärme mithilfe der kühlen Nachtluft wieder abführen zu können.
- Ein ausgewogenes Maß an Fensterflächen in der Fassade, um die solaren Wärmeeinträge zu begrenzen und die Speichermassen der opaken Fassadenanteile für das Innenraumklima nutzen zu können.
- Eine Dach- und Fassadenbegrünung, die wasserspeichernd und somit kühlend auf das Umfeld wirkt.
- Eine Fassaden- und Freiflächengestaltung (v. a. Bodenbeläge der fassadennahen Außenflächen) in hellen Farben, um die Wärmeabsorption und dadurch die Hitzeinsel-Bildung im direkten Umfeld des Gebäudes zu vermeiden.

Auch die Grünflächengestaltung im Baugebiet, vor allem im direkt an die Fassade angrenzenden Umfeld, hat Auswirkungen auf den sommerlichen Wärmeschutz des Gebäudes. Versickerungsfähige und begrünte Flächen oder auch Retentionsflächen für Regenwasser führen zur sogenannten Verdunstungskühlung und wirken somit positiv auf das sommerliche Mikroklima im Baugebiet.

Ein hoher Grünflächenanteil in der Flächennutzungszuteilung und eine feinkörnige Bebauungsstruktur stellen gute Voraussetzungen dar, ein Plangebiet gut zu durchlüften und einem Hitzeinseleffekt entgegenzuwirken. Vorgaben in Form einer Regelung zur Farbgebung (helle Fassaden- und Außenbelagsfarben), eines Verbotes von Stein-Gärten oder einer Gebäudebegrünung bilden eine gute Grundlage für die Sicherstellung eines Schutzes vor sommerlicher Überhitzung.

2 Versorgungsoptionen

2.1 Begriffserläuterungen in der Wärmeverteilung und Erzeugung

Kalte Nahwärme

Ein kaltes Nahwärmenetz wird aufgrund der geringen Netztemperatur ($< 10\text{ °C}$) als kalt bezeichnet. Der Vorteil dieses Netztyps sind die ausbleibenden Netzverluste, da sich die Temperatur des Mediums im Netz nahezu auf dem gleichen Niveau wie dem Erdreich befindet und dadurch kein thermischer Übergang an das Erdreich erfolgt. Häufig wird das Netz der kalten Nahwärme mit einer Sole gespeist, welche sich aus Wasser und einem Frostschutzmittel zusammensetzt. Ein zusätzlicher Nutzen der kalten Nahwärme besteht darin, dass das Netz günstiger ausfällt, da keine Dämmung der Rohrleitungen notwendig ist und eine passive Kühlung der Gebäude über z.B. eine Umkehrung des Wärmepumpenprozesses oder rein durch die Erdreichtemperatur erfolgen kann.

Nahwärmenetz

Das Temperaturniveau in einem Nahwärmenetz liegt typischerweise bei $>70\text{ °C}$ und wird in Kombination mit Aggregaten hoher Vorlauftemperaturen verwendet (z. B. BHKW oder Holzkessel). In Neubaugebieten, welche Gebäude mit hohen Energieeffizienzstandards aufweisen, ist eine Temperatur von $> 70\text{ °C}$ oftmals nicht mehr notwendig. Flächenheizsysteme sind für geringere Temperaturen ausgelegt. Zusätzlich bietet die Netzdimensionierung auf Basis einer geringeren Temperatur eine Technologieoffenheit für die Zukunft. Entsprechend wird das Nahwärmenetz hierbei auf eine Temperatur von $< 50\text{ °C}$ ausgelegt. Man spricht dann von einem LowEx-Netz. Bei der LowEx-Betriebsart besteht die Möglichkeit das Netz aus mehreren niedertemperierten Energie-/ Wärmequellen zu speisen, darunter z.B. Energie aus Abwasser, Gewässern oder industrieller Abwärme teils in Verbindung mit einer Wärmepumpe.

Gaskessel

Gaskesselanlagen nutzen einen gasförmigen Energieträger in Form von Erdgas, Biomethan oder zukünftig auch erneuerbare Gase zur Wärmeerzeugung. Der Wirkungsgrad eines Gaskessels beläuft sich auf $>90\%$. Bei einer dezentralen (im eigenen Hauskeller) oder zentralen (in einer Heizzentrale) Installation ist der Gaskessel als sehr platzsparend und vergleichsweise kostengünstig einzustufen. Versorgt wird der Gaskessel zumeist über das örtliche Erdgasnetz.

Blockheizkraftwerk (BHKW)

BHKW's arbeiten nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsprinzip d. h., dass sowohl Wärme als auch mechanische Energie durch den Einsatz eines flüssigen oder gasförmigen Brennstoffes erzeugt wird. Das Herzstück des BHKW's bildet ein Kolbenmotor oder eine Gasturbine. Über die verbrennungsbedingte mechanische Drehbewegung wird mithilfe eines Generators elektrische Energie erzeugt und die dabei entstehende thermische Energie (Abwärme) wird über einen Wärmetauscher an den Heizkreislauf weitergegeben. BHKW's können sowohl zur zentralen als auch zur dezentralen Wärmeerzeugung genutzt werden.

Holzfeuerung

Holzfeuerungen können verschiedene Varianten des Brennstoffes Holz zur Wärmeerzeugung nutzen. Am weitverbreitetsten sind Pelletkessel oder Holzhackschnitzelanlagen. Im Gegensatz zu gasförmigen

Brennstoffen, welche leitungsgebunden zur Anlage transportiert werden können, ist für Holz ein Bevorratungslager notwendig. Hinzu kommen weitere technische Einrichtungen wie z. B. eine automatische Beschickung des Kessels und eine Abgasreinigung, wodurch der Platzbedarf wesentlich größer ausfällt.

Wärmepumpe

Wärmepumpen (WP) nutzen Umgebungswärme und elektrische Energie, um die Temperatur des zu nutzenden Mediums von einem niedrigeren Niveau auf ein höheres Niveau anzuheben. Die Wärmepumpe nutzt Umweltenergie, die in der Luft, im Grundwasser oder im Erdreich gespeichert ist. Diese Umweltenergie wird von der Wärmepumpe aufgenommen und an ein schnell siedendes Kältemittel in der WP übergeben. Das danach dampfförmige Kältemittel wird über einen Verdichter komprimiert, sodass die Temperatur des Kältemittels steigt und über einen Wärmetauscher zur Warmwasserbereitung oder zum Heizen an den Verbraucher übergeben wird. Wie effizient eine WP ist, hängt wesentlich vom benötigten Temperaturniveau ab. Mit steigender Vorlauftemperatur steigt der Stromeinsatz für die WP bzw. für den Verdichter. Wärmepumpen sind in der Lage, bei einem moderaten Temperaturniveau ein Vielfaches der eingesetzten Energie in Wärmeenergie umzuwandeln. Beim Betrieb fallen keinen direkten Emissionen an, da keine Verbrennung stattfindet. Wärmepumpen sind sehr platzsparend und können daher zur dezentralen als auch zentralen Wärmebereitstellung genutzt werden. Die Erschließung geothermischer Energiequellen ist hingegen verhältnismäßig flächen- und kostenintensiv.

Solarthermie

Solarthermischen Anlagen (STA) nutzen die thermische Energie der Sonne zur Erzeugung von Wärme. STA sind in verschiedenen Ausführungen vertreten, unter denen Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren weit verbreitet sind. Beide Arten nehmen die thermische Energie der Sonne über einen Absorber, in dem eine Trägerflüssigkeit zirkuliert, auf. Die erwärmte Flüssigkeit wird über einen Wärmetauscher an den Wasserkreislauf z. B. des Hauses oder eines Nahwärmenetzes zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung weitergegeben. Solarthermische Anlagen benötigen keinen Brennstoff oder direkte elektrische Energie, jedoch sind sie stark von den Einstrahlungsverhältnissen und somit vom Standort und der Jahreszeit abhängig.

2.2 Techniken in der Wärmeerzeugung

Die folgende Matrix gibt zunächst einen Überblick über mögliche Techniken der Wärmeerzeugung mit den Einsatzbereichen (zentral/dezentral) sowie ihren Vor- und Nachteilen. Die Eignung für das Neubaugebiet ist unterschiedlich einzuschätzen. Die Auswahl angepasster Lösungen wird im weiteren Verlauf des Konzeptes eingehender behandelt.

Wärmeerzeugung durch	Einsatzbereich	Vorteile	Nachteile
Holzhackschnitzel	zentrale Versorgung	niedrige Brennstoffkosten; keine Kopplung an den Ölpreis; regionale Verfügbarkeit der Brennstoffe; niedrige CO ₂ -Emissionen; Grund- und Spitzenlastfähig	aufwändige Anlagentechnik; hoher Betriebsaufwand (Aschetonnen, Reinigung, Anlieferung etc.); hoher Platzbedarf für Kessel und Brennstofflager; hohes Transportaufkommen v. a. in kalten Wintermonaten

Wärmeerzeugung durch	Einsatzbereich	Vorteile	Nachteile
Holzpellet	zentrale und dezentrale Versorgung	mäßige Brennstoffkosten; keine Kopplung an den Ölpreis; (über-)regionale Verfügbarkeit; hoher Automatisierungsgrad; geringerer Betriebsaufwand; mäßiger Platzbedarf; geringe CO ₂ -Emissionen; Grund- und Spitzenlastfähig	aufwändige Anlagentechnik; mäßiger Platzbedarf für Kessel und Brennstofflager; mäßiger Betriebsaufwand; mittleres Transportaufkommen
KWK mit fossilem Erdgas	zentrale Versorgung	hohe Effizienz; niedrige CO ₂ -Emissionen bei einer Stromgutschrift gegen den fossilen BRD-Mix (GEG 2020); geringer/mittlerer Platzbedarf	Abhängigkeit von Energie Importen und Brennstoffpreisen; BHKW nur für die Grundlast, Spitzenlast über Gaskessel; Wartungsaufwand; steigende CO ₂ -Kosten; zukünftig schwindender Einfluss der Stromgutschrift
KWK mit Biomethan (virtuelles Biogas, stofflich Erdgas)	zentrale Versorgung	Stromvergütung gem. KWK-G oder EEG (Stand 2021) je nach Qualität und Leistungsklasse; hohe Effizienz; geringere CO ₂ -Emissionen ggü. Erdgas; geringer/mittlerer Platzbedarf	mittlere CO ₂ -Äquivalent Emissionen (Methan + Lachgas fallen bei der Erzeugung an); BHKW nur für die Grundlast, Spitzenlast über Gaskessel; Wartungsaufwand
Luft/Wasser Wärmepumpe	dezentrale Versorgung	geringer Betriebsaufwand; mäßiger Platzbedarf; geringe CO ₂ -Emissionen; Grund und Spitzenlast; Gute Kombinierbarkeit mit PV; keine direkten Emissionen (CO ₂)	Temperaturniveau der Wärmeabgabe <50 °C, besser <40 °C; Je nach Dämmstandard Geräuschemissionen möglich; Lüfter/ Luftansaugung erforderlich
geothermische Wärmepumpe	zentrale/ dezentrale Versorgung	geringer Betriebsaufwand; mäßiger Platzbedarf (WP); geringe CO ₂ -Emissionen; Grund und Spitzenlast; Kühlung im Sommer möglich; Keine direkten Emissionen (Geräusche/ CO ₂ /...)	Temperaturniveau der Wärmeabgabe <50 °C, besser <40 °C; flächen- & kostenintensive Quellenerschließung; geologische Eignung nicht immer gegeben
kalte Nahwärme: - Erdsonde - Erdkollektor - Gewässer	WP je Gebäude zentrale Versorgung über ein kaltes Nahwärmenetz	wie geoth. WP; Nahwärmenetz ohne Isolierung (Kostenersparnis); keine Netzverluste; effiziente Kühlung im Sommer möglich	Temperaturniveau der Wärmeabgabe <50 °C, besser <40 °C; flächen- & kostenintensive Quellenerschließung; geologische Eignung nicht immer gegeben
LowEx: - Industrielle Abwärme - Abwasserwärme	Zentrale Wärmepumpe Einspeisung in ein Nahwärmenetz	Verringerte Netzverluste ggü. HT-Netz; Technologieoffenheit; keine direkten und verringerte CO ₂ -Emissionen; mäßiger Platzbedarf	Temperaturniveau > 50 °C erfordert dez. Nacherhitzung für TWW; kostenintensive Quellenerschließung; Verfügbarkeit und Anforderungen an Quelle (Kontinuität) nicht immer gegeben

Wärmeerzeugung durch	Einsatzbereich	Vorteile	Nachteile
Solarthermie	zentrale/ dezentrale Versorgung	minimale CO ₂ -Emissionen; gute Kombinierbarkeit mit anderen Energiequellen; geringer Betriebsaufwand	vorwiegend für Warmwasser und zur Heizungs- unterstützung
Erdgaskessel	zentrale/ dezentrale Versorgung	geringer Platzbedarf gute Kombinierbarkeit	hohe CO ₂ Emissionen fossiler Energieträger; Abhängigkeit von Energie- Importen; steigende CO ₂ -Kosten

Tabelle 5 Übersicht der Versorgungsoptionen

Theoretisch ist es möglich, die Wärme für jedes Gebäude dezentral durch eine der Versorgungstechniken bereitzustellen. Jedoch blieben bei einer dezentralen Wärmeversorgung (sowohl ökologische wie auch wirtschaftliche) Effizienzpotenziale ungenutzt, die eine zentrale Nahwärmeversorgung ausschöpfen kann. Sollte die Wahl z. B. auf den Energieträger Holz fallen, ergibt sich bei einer zentralen Versorgung der Vorteil, dass die Brennstofflagerung und -anlieferung bei einer Heizzentrale logistisch leichter zu handhaben ist als bei einer dezentralen Versorgung. Auch die Vorgaben bezüglich des Lärm- und Emissionsschutzes lassen sich mit einer zentralen Versorgung leichter einhalten. Da das gesamte Gebiet neu errichtet wird, können Nahwärmeleitungen zur Verteilung der Wärmeenergie im Vorhinein gut eingeplant werden.

Bei Errichtung eines Neubaugebietes bietet sich außerdem die Möglichkeit, Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau (einzusetzen, um u. a. hohe Netzverluste zu vermeiden. Der spezifische Wärmebedarf ist durch den guten Effizienzstandard der Gebäudehülle (KfW 40) ausreichend gering und auch das Verteilsystem und die Wärmeübergabe in den Gebäuden können durch eine Installation von z.B. Flächenheizungen optimal auf das niedrige Temperaturniveau ausgelegt werden.

3 Potenzialanalyse

Eine THG-neutrale Energieversorgung ist ein wesentlicher Baustein für die Entwicklung eines nachhaltigen und klimaneutralen Baugebiets. Im Mittelpunkt stehen dabei lokal und regional verfügbare erneuerbare Energiequellen. Allen voran ist dabei die Solarenergie zu nennen, die in Form von Photovoltaikanlagen und/oder als Solarthermieranlagen verpflichtend in die Energieversorgung des Baugebiets eingebunden werden sollte. Die Potenziale entstehen dabei im Wesentlichen durch Dach- und Fassadenflächen der zu errichtenden Gebäude. Hier ist eine größtmögliche Flächenausnutzung anzustreben. Die Photovoltaik ist dabei der zentrale Baustein für eine klimaneutrale Stromversorgung, da diese hinsichtlich ihrer vergleichsweise niedrigen Investitionskosten je kWp und einfachen Umsetzung einen bedeutenden Vorteil gegenüber bspw. Kleinwindanlagen bietet.

Mit Blick auf die Wärmeversorgung wurden folgende Potenziale untersucht:

- Solare Potenziale zur dezentralen Versorgung (Photovoltaik und Solarthermie) sind vorhanden und wurden nachfolgend genauer untersucht.
- Abwärmepotenziale aus Industrieanlagen konnten nur in weiterer Entfernung zum Baugebiet identifiziert werden. Die Entfernung zum nahegelegensten Potenzial beträgt > 3 km (Luftlinie) und ist aufgrund der Querung von dichter Bebauung, von Verkehrsinfrastruktur und Gewässern als nicht zielführend und wirtschaftlich einzustufen.
- Der Abwärmenutzung aus dem Zulauf einer ca. 700 m entfernten Kläranlage (KA) kann kein umsetzbares Potenzial zugesprochen werden. Durch den hohen Wärmeentzug (seitens Baugebiet) und dem vergleichsweise geringen Abwasseranfall in der KA (Trockenwetterzufluss ca. 97 l/s) würde sich die Temperatur im Abwasserzulauf der KA zu stark absenken. Dies würde die Aufrechterhaltung biologischer Prozesse wesentlich beeinflussen, wonach wiederum Energie/Wärme zuzuführen ist und ein Energiebedarf bei der KA selbst entstünde. Eine Umsetzung dieses Potenzials zieht somit eine Verlagerung der Wärmebereitstellung nach sich.
- Die bereits erwähnte Kläranlage östlich des Baugebiets stellt ein theoretisches Energiepotenzial für die Nutzung von Klärgas dar. Nach Rücksprache mit der EGLV (Emschergenossenschaft und Lippeverband) steht zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Energiekonzeptes und voraussichtlich auch zukünftig kein Überschuss an Klärgas zur Verfügung. Das Klärgas wird derzeit über BHKWs verstromt.
- In der direkten Umgebung des Baugebiets befinden sich mehrere ausreichend groß dimensionierte Abwasserleitungen ($\geq$ DN 500) für einen thermischen Wärmeentzug aus dem Abwasser. Aufgrund des allgemein geringen Trockenwetterzuflusses der KA ($\sim$ 97 l/s) und einer Aufteilung dieses Volumenstroms auf mehrere Kanalleitungen, würde der benötigte Minstdurchfluss von 50 bis 70 l/s nicht erreicht werden. Eine Abwärmenutzung aus Kanalleitungen entfällt somit aus der weiteren Betrachtung.
- Das Fließgewässer Lippe weist am Standort ein großes Potenzial zur Wärmeversorgung des Baugebiets auf. Der ca. in 600 m Entfernung verlaufende Fluss zeichnet sich durch einen weitaus ausreichenden Trockenwetterabfluss aus (ca. 17 m³/s (Schermbek)). Einer zukünftigen Abwärmenutzung aus der Lippe steht der EGLV offen gegenüber und ist bereit weitere relevante Akteure hinzuzuziehen, wenn das Vorhaben weiter konkretisiert würde. Mit Blick auf die Wärmeversorgung des Baugebiets steht nach Absprache mit den Projektbeteiligten der wirtschaftliche und genehmigungsrechtliche Aufwand für den vergleichsweise geringen Bedarf gegenüber dem großen Potenzial in keinem tragbaren Verhältnis. Eine Nutzung von derart großen Energiepotenzialen hat auf größerer Ebene zu erfolgen und wäre eher einer kommunalen

Wärmeplanung zuzuschreiben, wonach weitaus mehr und vor allem zentralisiert Baugebiete/Stadtteile mit Abwärme versorgt werden können.

- Für die Abschätzung einer Grundwassernutzung zur Wärmeerzeugung ist am Standort ein Pumpversuch und eine Grundwasseranalyse erforderlich. Da keine Informationen zu den hydrogeologischen Eigenschaften des Erdreichs vorliegen wird das Nutzungsverfahren geothermische Brunnenanlage nur qualitativ bearbeitet.
- Geothermische Potenziale hinsichtlich der Nutzungsverfahren Erdsonde und Erdwärmekollektor sind im Baugebiet und in der angrenzenden Umgebung vorhanden. Das Potenzial wurde für eine zentrale und dezentrale Erschließung untersucht.
- Südlich-östlich in ca. 4,5 km (Luftlinie) Entfernung zum Baugebiet entsteht in naher Zukunft (ab 2024) einer von sechs Standorten der Grubenwasserhaltung in NRW. Ein Teil des dortigen Grubenwasseranfalls wird für die thermische Versorgung des zukünftig und vor Ort entstehenden Neubaugebietes „Wasserstadt Aden“ genutzt werden. Der restliche Grubenwasseranfall mit einer Restleistung von ca. 8,7 MW wird in die Lippe eingeleitet und bliebe ungenutzt. Angesichts der großen Entfernung zum Baugebiet und den damit einhergehenden hohen Investitionskosten für den Ausbau der nötigen Infrastruktur weist das Potenzial ein nicht tragbares Kosten/Nutzen-Verhältnis auf und wird demnach nicht weiterverfolgt. Auch dieses Potenzial ist eher im Bereich der kommunalen Wärmeplanung und somit einer umfänglichen Wärmeplanung einer größeren Region zuzuschreiben.
- Eine Anbindung des Baugebiets an das bestehende Erdgasnetz der benachbarten Baugebiete erscheint potenziell möglich. Eine Anbindung an das Bestandsnetz kann einen zukünftigen Bezug von virtuellem Biomethan oder Wasserstoff ermöglichen.
- Biogasproduzenten sind nur in größerer Entfernung zum Baugebiet vorhanden (~ 4 km), sodass ein Bezug von Biogas nicht als wirtschaftlich umsetzbares Potenzial weiterbetrachtet wird.
- Bergbauliche Grubengasförderungen sind in der Region in ca. 3 bis 6 km vorhanden, jedoch wird das anfallende Grubengas bereits energetisch genutzt.
- Zum derzeitigen Untersuchungszeitpunkt ist in Werne kein Standort für eine Wasserstoffproduktion vorgesehen.

Bedeutende Potenziale hinsichtlich der Wärme- und Stromversorgung werden in den nachfolgenden Kapiteln näher untersucht und erläutert.

3.1 Solare Potenziale

Auf Grundlage des städtebaulichen Entwurfes können die für eine solare Nutzung zur Verfügung stehenden Dachflächen ermittelt werden. In der nachfolgenden Betrachtung wird zwischen den solaren Potenzialen einer Photovoltaikanlage zur Stromerzeugung und einer Solarthermieanlage zur Warmwasserbereitung unterschieden.

Photovoltaik

Die Gewinnung solarer Energie zur Eigenstromversorgung und die damit verbundene Unabhängigkeit von schwankenden Strompreisen gewinnt immer mehr an Bedeutung. So wird auch für das Baugebiet Bellingholz-Süd eine vollständige bilanzielle Strombedarfsdeckung untersucht.

Einen besonderen Einfluss auf den Ertrag einer PV-Anlage nehmen die Ausrichtung der PV-Module und die Ausrichtung des Daches selbst. Im stdb. Entwurf sind den Gebäuden die Dachtypen Satteldach und Flachdach zugeordnet. Über den Dachfirst eines Gebäudes mit Satteldach wird die potenzielle Ausrichtung des Daches ersichtlich. Eine Süd-Ausrichtung stellt den optimalen Fall hinsichtlich des

Ertrags einer PV-Anlage dar, da so die meiste Sonnenenergie pro Quadratmeter Dachfläche aufgefangen und transformiert werden kann. Der Neigungswinkel des Daches nimmt ebenfalls Einfluss auf den solaren Ertrag und führt zu einem Ertragsoptimum bei ca. 30° . Eine Ost-West-Ausrichtung hingegen senkt den Wirkungsgrad der Module, führt aber zeitgleich zu einem höheren Nutzungsgrad der PV-Anlage. Dies hängt damit zusammen, dass in den Morgen- und Abendstunden durch einen verbesserten Winkel zur Sonne (Einstrahlungswinkel) mehr Energie erzeugt und durch den Bedarf des Wohngebäudes direkt verbraucht werden kann. Auf Flachdächern, welche keine festgelegte Dachausrichtung aufweisen, wird in der Regel die PV-Anlage in Ost-West-Richtung aufgeständert. Der allgemein übliche Neigungswinkel der PV-Anlage liegt hier bei ca. 10° und wird über die Unterkonstruktion erreicht. Die nachstehende Abbildung zeigt den Einfluss der Ausrichtung auf den Ertrag einer PV-Anlage.

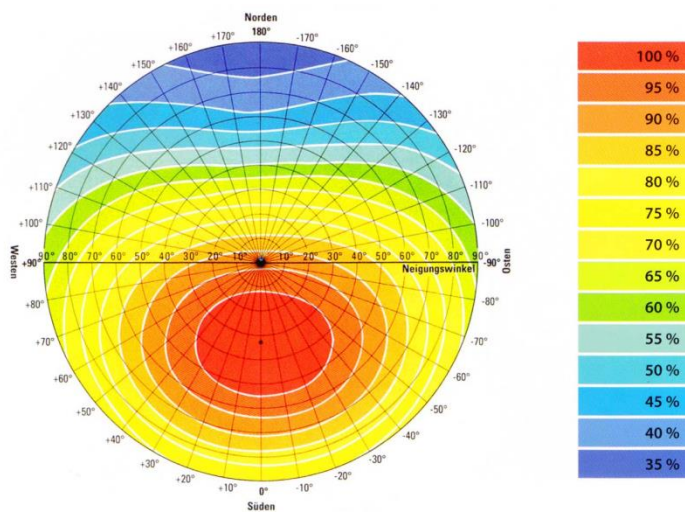


Abbildung 4 Solarer Ertrag in Abhängigkeit der Anlagenausrichtung (Quelle: Verbund AG)

Über die Simulationssoftware PV-SOL wurden für die Region Werne spezifische solare Erträge in Abhängigkeit der Dachform und Ausrichtung der Gebäude ermittelt. Allgemein wurde für Satteldächer ein Neigungswinkel von 40° angenommen, welcher sich an den Dachneigungen der angrenzenden Bebauung im Norden und Westen des Baugebiets orientiert (Dachneigung zwischen 35° und 45°). Der stdb. Entwurf zeigt kein Gebäude mit Satteldach, welche exakt in Richtung Süden ausgerichtet sind. Eine Abweichung von einer rein südlichen Ausrichtung schmälert den spez. Ertrag der PV-Anlage und kann dazu führen, dass bestimmte Dachflächen aufgrund der ungünstigen Ausrichtung der PV-Module nicht energetisch genutzt werden (sinkender Ertrag führt zu sinkender Wirtschaftlichkeit). Im Mittel liegt die Abweichung der Gebäude von einer rein südlichen Ausrichtung bei ca. 40° . Demnach wurden die solaren Erträge für Satteldächer ermittelt, welche eine Abweichung von ca. 40° von einer südlichen Ausrichtung aufweisen. Dabei wurde ebenfalls unterschieden, ob die südlich gelegene Dachtraufe des Gebäudes Richtung Osten oder Westen zeigt. Die folgende Abbildung legt den geprüften Sachverhalt kurz dar.



Abbildung 5 Ertragssimulation in Süd-Ost und Süd-West Ausrichtung

Die Ergebnisse der Simulation sind in nachfolgender Tabelle abgebildet.

Gebäudetyp	Süd-Ost Gebäude	Süd-West Gebäude
	[kWh/kWp]	[kWh/kWp]
Nur nördliche Fläche	711	702
Nur südliche Fläche	993	1.008
Beidseitige Belegung	856	855

Tabelle 6 Ergebnisse Ertragssimulation für Süd-Ost und Süd-West Ausrichtung

Die Ergebnisse der Simulation legen dar, dass die Dachflächen der Gebäude aus Sicht des solaren Ertrags beidseitig mit PV belegbar sind. In beiden Fällen liegt der kombinierte spez. Ertrag bei über 850 kWh/kWp. Bei einer reinen Ost-West-Aufständigung, wie sie auf den Flachdächern von MFH umgesetzt wird, liegt der spez. Ertrag bei 855 kWh/kWp.

Die Dachfläche eines Gebäudes bemisst sich in der Regel an dessen Grundfläche, dem Dachtyp und dem Neigungswinkel des Daches. Zur Vereinfachung der Dachflächenbestimmung wurde die Grundfläche jenes Gebäudes über die Bruttogrundfläche und die Geschossigkeit errechnet. Die Dachfläche von Gebäuden mit Flachdach entspricht somit der errechneten Grundfläche des Gebäudes. Dachüberstände werden nicht mitbetrachtet. Bei einem Gebäude mit Satteldach erhöht sich die Dachfläche mit steigendem Neigungswinkel des Daches, sodass Satteldächer ein großes Flächenpotential aufweisen. Für die solare Ertragsbestimmung wurden folgende gemittelte Eckdaten berechnet:

Gebäudetyp	Grundfläche	Dachfläche	PV-Fläche
	[m²]	[m²]	[m²]
EFH	160	209	136
DH	155	202	131
RH	347	453	294
MFH	410	410	267
KiTa	703	703	457
Summe	15.426	19.045	12.379

Tabelle 7 Flächenverfügbarkeit nach Gebäudetypen

In Summe beträgt die errechnete Dachfläche im Baugebiet ca. 19.050 m². Über einen angenommenen Dachnutzungsgrad von 65 % ergibt sich ein plausibles und technisch umsetzbares PV-Flächenpotential. Die kumulierte und potentiell nutzbare PV-Fläche für das Baugebiet beträgt demnach rund 12.400 m².

Zur Abschätzung der installierbaren Leistung und des solaren Ertrags wurde den Simulationen ein 350 Wp PV-Modul zugrunde gelegt. In der groben Auslegung der einzelnen Dachflächen wurden folgende gerundete Kennwerte je Gebäudetyp ermittelt:

Gebäudetyp	Installierbare PV-Leistung	Pot. Ertrag	Anteil Ertrag
	[kWp]	[kWh/a]	[-]
EFH	25	21.270	62 %
DH	24	20.661	14 %
RH	49	41.955	7 %
MFH	44	37.888	14 %
KiTa	76	65.030	3 %
Summe	2.213	1.894.552	100 %

Tabelle 8 Gemittelte PV-Kennwerte

Die Tabelle zeigt, dass die Einfamilienhäuser den Großteil des solaren Ertrags (62 %) im Baugebiet generieren, was grundlegend an der höheren Anzahl und Dachfläche liegt. Darauf folgen die Doppelhäuser und Mehrfamilienhäuser mit einem Anteil von ca. 14 % am solaren Gesamtertrag.

In Summe beträgt die gesamte potenziell installierbare Leistung ca. 2.210 kWp. Unter Hinzunahme der spezifischen Erträge je kWp (kWh/kWp) ergibt sich ein bilanzielles und solares Potenzial von ca. 1.895 MWh/a. Der gemittelte spez. Ertrag je kWp installierter Leistung beläuft sich auf 856 kWh/kWp. Wird der Bedarf für Haushaltsstrom+Kita (484 MWh/a) und E-Mobilität (711 MWh/a) hinzugezogen, ergäbe sich ein bilanzieller Deckungsgrad von ca. 158 %. Der bilanzielle Stromüberschuss beläuft sich auf ca. 700 MWh/a. Nachfolgende Grafik stellt die Nutzung des solaren Ertrags grafisch dar.

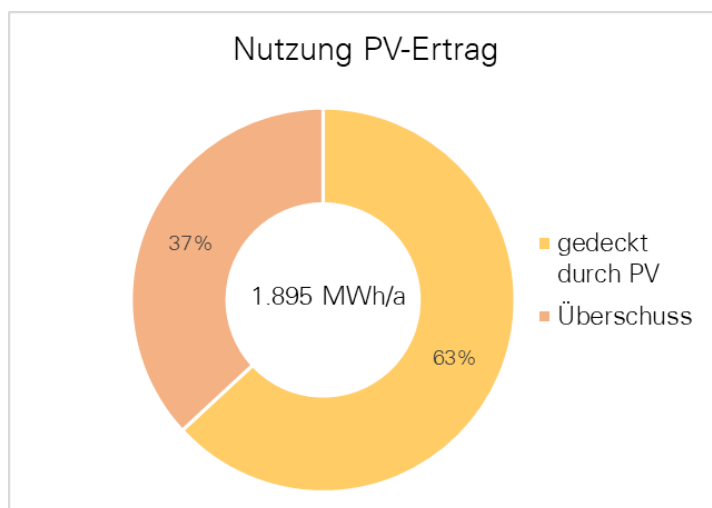


Abbildung 6 Bilanzielle Nutzung des PV-Ertrags

Solarthermie

Eine solarthermische Anlage absorbiert einen Großteil der Strahlungsenergie der Sonne und kann über einen Wärmetauscher Warmwasser für den Haushalt zur Verfügung stellen und an kälteren Tagen als Heizungsunterstützung dienen. Wie auch die Photovoltaik ist die Solarthermie (ST) stark von den Einstrahlungsverhältnissen der Sonne und somit von der Jahreszeit abhängig. Für die Beschreibung des Potenzials wird eine vollständige Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs in den Sommermonaten Juni bis August angestrebt. Eine Bedarfsdeckung des Warmwassers in den Wintermonaten würde aufgrund

der schlechten Einstrahlungsverhältnisse zu einer Überdimensionierung des Kollektors und ggf. zu einer Verdrängung anderer Energieerzeuger (z.B. PV-Anlage) führen.

Solarthermieranlagen gibt es in den verschiedensten Ausführungen. Am weitverbreitetsten sind Flach- und Vakuumröhrenkollektoren (VRK), die sich nur rein optisch und in ihrem Wirkungsgrad unterscheiden. Flachkollektoren ähneln stark einem PV-Modul und weisen einen Wirkungsgrad von ca. 45 % auf. Bei einem VRK sind mehrere Kollektorrohre, in denen sog. Absorber zur Aufnahme der solaren Energie verbaut sind, nebeneinander angeordnet. Aufgrund einer verbesserten Isolierung (Vakuum) liegt hier der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Temperaturen (Außen- und Betriebstemperatur) bei ca. 55 %. Durch die verbesserte Flächenausnutzung wird der VRK zur Einschätzung des solarthermischen Potenzials genutzt.

Von einer zentralen Solarthermieranlage wird aufgrund der geringen Freiflächen im stdb. Entwurf und den sich daraus ergebenden Restriktionen im öffentlichen Raum abgesehen. Demnach ist die Solarthermie dezentral auf den Dachflächen für eine dezentrale Versorgung auszulegen. Die Größe einer Anlage beschränkt sich auf den jeweiligen Bedarf des Gebäudes. Eine bedarfs- und kostenoptimierte Lösung wird bei einem Deckungsgrad im Bereich von 60 %, bezogen auf den Trinkwarmwasseranteil, erreicht. Eine derartige Dimensionierung der Anlage führt dazu, dass der Warmwasseranteil in den Sommermonaten, der in der Regel dann keine Heizenergie beinhaltet, vollständig gedeckt werden kann. Wird der Deckungsgrad weiter erhöht, so werden größere Kollektorflächen benötigt, welche in den Sommermonaten zu höheren Verlusten und demnach zu einem niedrigeren Nutzungsgrad führen. Letztlich wird die Anlage teurer und ineffizienter.

Die Auslegungskriterien der Solarthermieranlagen im Baugebiet werden verallgemeinert angesetzt: Die Ausrichtung der Module bezieht sich auf eine Süd-Ost /Süd-West Ausrichtung mit einem Kollektorneigungswinkel von ca. 40°. Die Modulgröße bzw. die Absorberfläche richtet sich nach dem Warmwasserbedarf des Gebäudes. Für ein EFH mit vier Personen (s. Geb. 1) beträgt dieser ca. 200 kWh/Monat. Über den spezifischen Wärmeertrag des VRK, der im Monat August einen spez. Ertragswert von gut 70 kWh/m² aufweist, bestimmt sich die benötigte Fläche aus der Division von Bedarf und Ertrag. Für das Einfamilienhaus kann demnach über eine Absorberfläche von ca. 2,9 m² der Warmwasserbedarf vollständig bilanziell in den Sommermonaten (Juni bis August) gedeckt werden. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die tatsächliche Nutzenergie stark abhängig von der Auslegung der einzelnen Komponenten wie Pufferspeicher, Heizkreise etc. ist, sowie auch vom einzelnen Nutzerprofil. Derartige Variablen können in dieser Analyse der Solarthermie nicht hinreichend abgebildet werden. Die dargelegten Kennwerte zur Solarthermie beziehen sich daher nur auf die generierte Energie des Systems.

Nachfolgende Abbildung zeigt den solaren Ertrag einer ST-Anlage mit 2,9 m² Absorberfläche und den TWV-Bedarf eines Einfamilienhauses mit vier wohnhaften Personen im Jahresverlauf.

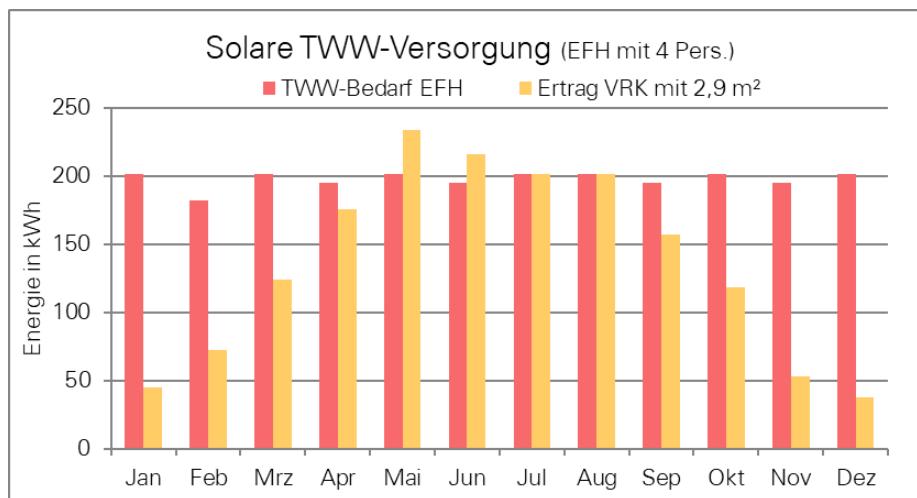


Abbildung 7 Solarer Deckungsgrad am Beispiel DHH groß

Die Abbildung zeigt, dass die ST v. a. in den Wintermonaten nur einen Bruchteil des Warmwasserbedarfs decken kann. Zu den Sommermonaten hin, insbesondere in den Monaten Mai bis August, ist eine bilanzielle solarthermische Deckung der TWW-Bedarfe möglich. Die Grafik zeigt auch, dass eine Bedarfsdeckung bis August geringe Übererträge vor allem im Monat Mai erzeugt. Eine Vollversorgung in den Sommermonaten ermöglicht die Abschaltung des dezentralen Wärmeerzeugers in den jeweiligen Gebäuden bzw. der zentralen Wärmeerzeuger in einer Heizzentrale, wodurch ein potentielles Nahwärmenetz im Baugebiet ebenfalls außer Betrieb genommen werden könnte. Wird auf jedem Gebäude im Baugebiet eine ST-Anlage errichtet, die den sommerlichen TWW-Bedarf decken kann, so ergibt sich ein bilanzieller solarer Wärmertrag von ca. 202 MWh/a. Dies entspricht unter Hinzunahme des TWW-Bedarfs im Quartier (293 MWh/a) einem Deckungsgrad von ca. 69 %. Sind die Solarmodule flächenbedingt nicht nebeneinander, sondern hintereinander zu installieren (z.B. auf Flachdächern), so sind größere Abstände zwischen den Modulen einzuhalten, um eine Verschattung der Absorberflächen zu verhindern. Dies ist bei der Flächeninanspruchnahme der Solarthermie, in Kombination mit weiteren Erzeugern (z. B. Photovoltaik) zu beachten.

Fazit Solare Potenziale

Der städtebauliche Entwurf weist ein ausreichendes PV-Flächenpotenzial zur bilanziellen Deckung des Strombedarfs für Haushalt + KiTa und E-Mobilität auf. So kann mit einem PV-Ertrag von ca. 1.895 MWh/a, der Bedarf von 1.196 MWh/a (Haushalt + KiTa + E-Mobilität) bilanziell vollständig gedeckt werden (Deckungsgrad 158 %). Über eine ausreichend große Dimensionierung der Solarthermie für die Sommermonate ist in den Monaten Mai bis August eine eigenständige und unabhängige Warmwasserversorgung zu erreichen. Bilanziell beläuft sich die solare Deckung des Warmwasserbedarfs auf ca. 69 %. Eine gebäudeweise Aufstellung zu den Flächen, den Leistungen und theoretischen Erträgen der Anlagen sind dem Anhang beigefügt.

Die Solarthermie wird im Variantenvergleich bewusst nicht miteinbezogen, da der/die jeweilige Investor*in nach eigenem Ermessen über die Investition in eine Solarthermieanlage entscheiden kann. Da zudem in jeder Vergleichsvariante die Erträge der ST angerechnet werden würden, findet keine Abgrenzung mehr unter den Varianten statt. Des Weiteren kann die ST nur in Verbindung mit weiteren Wärmeerzeugern betrachtet und angewendet werden, sodass diese nur als Ergänzung zu verstehen ist. In der abschließenden Empfehlung des Berichts wird nochmal auf die Thematik der ST eingegangen.

3.2 Geothermische Potenziale

Die Geothermie ist eine kostenlos zur Verfügung stehende Energiequelle, die in Form von Wärmeenergie in der Erdkruste gespeichert ist. Die Geothermie ist zu unterteilen in die oberflächennahe und tiefe Geothermie. Erstere beschreibt die Nutzung von Erdwärme aus bis zu 400 m Tiefe und wird im Folgenden betrachtet. Damit Wärme aus dem Erdreich für die Beheizung von Gebäuden nutzbar wird, ist eine Temperaturanhebung nötig. Dafür stehen Wärmepumpen zur Verfügung, die über den Carnot-Kreisprozess die Temperatur auf ein Niveau von 40-50 °C (teilw. auch darüber) anheben. Eine Wärmepumpe nutzt dabei die zugeführte Wärmeenergie aus dem Erdreich, welche die Eigenschaft hat, eine konstante Temperatur von ca. 10 °C in einer Tiefe von ca. 10 bis 20 m zu halten. Ein Gemisch aus Salz, Wasser und Frostschutzmittel (Sole) entzieht dem Erdreich Wärmeenergie und überträgt diese an ein Kältemittel der Wärmepumpe. Die Wärmepumpe hebt mit Antriebsenergie in Form von elektrischer Energie das Temperaturniveau an. Der Einsatz an elektrischer Energie ist für diesen Prozess abhängig von der Effizienz der Wärmepumpe und dem benötigten Temperaturniveau. Als Kennwert für die Effizienz einer Wärmepumpe steht der „Coefficient of performance“ (COP), welcher das Verhältnis von zugeführter elektrischer Energie zu abgegebener Wärmeenergie angibt. Der COP schwankt mit der Grädigkeit der Soletemperatur aus dem Erdreich und der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe. Der Wärmentzug aus dem Erdreich kann auf verschiedene Arten geschehen.

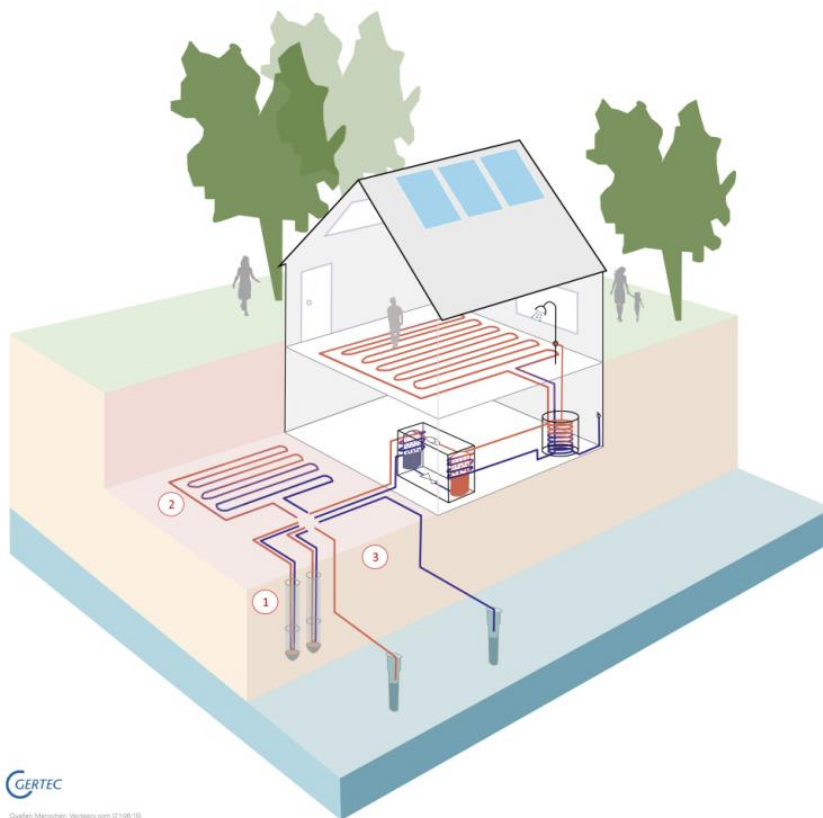


Abbildung 8 Geothermische Energiequellen

In der vorstehenden Grafik sind drei mögliche Arten dargestellt, wie Energie dem Erdreich entzogen werden kann. Dies kann mithilfe von Erdsonden (1) oder Erdwärmekollektoren (2) erfolgen sowie durch den Entzug von Energie aus dem Grundwasser über Brunnenanlagen (3). Für die drei dargestellten Entzugsarten wurden die rechtlichen Umsetzungswahrscheinlichkeiten geprüft. Ein Hindernis für die Nutzung der Geothermie ist die Lage in Wasser- und Heilquellenschutzgebieten. Die nachstehende Grafik

zeigt, dass sich das Baugebiet nicht in einer Wasserschutzzone oder in einem Heilquellenschutzgebiet befindet. Darüber hinaus wird aus hydrogeologischer Sicht das Nutzungsverfahren Erdsonden nicht eingeschränkt.



Abbildung 9 Wasser- und Heilquellenschutzgebiete im Raum Werne (Quelle:Geologischer Dienst NRW)

Eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung von Erdwärmekollektoren und Erdsonden ist die Verfügbarkeit von (Frei-)Flächen. Der stdb. Entwurf und die Umgebung des Baugebiets wurden hinsichtlich der Verfügbarkeit von Freiflächen untersucht. So konnten im Baugebiet nur wenige öffentliche und nutzbare Freiflächen identifiziert werden.



Abbildung 10 Öffentliche Freiflächen innerhalb des Baugebiets

Die Gesamtfläche der in Abbildung 10 dargestellten Flächen (4) beläuft sich auf ca. 3.600 m². Weder für das Nutzungsverfahren Erdkollektoren noch für Erdsonden sind diese Flächen ausreichend groß dimensioniert. Demnach ist eine Nutzung der Geothermie im Baugebiet nur auf den Grundstücksflächen der Wohngebäude möglich. Für eine zentrale Erschließung der Geothermie sind folgende Freiflächen näher in Betracht zu ziehen.



Abbildung 11 Freiflächenpotenzial Umgebung Bellingholz-Süd

Nach Rücksprache mit den Projektbeteiligten der RSE befinden sich die in [Abbildung 11](#) gelb, rot und grün dargestellten Freiflächen im Eigentum der RSE. Nach Abzug der Fläche für das Baugebiet, stehen vor allem im Süden und im Nordwesten ausreichend große Flächen für eine geothermische Nutzung zur Verfügung. Insofern in Richtung Südwesten eine weitere Baugebietserweiterung erfolgt, sind vornehmlich die Freiflächen im Nordwesten für eine geothermische Nutzung zu präferieren. Für die Nutzungsverfahren Erdwärmekollektor und Erdsonde werden im Folgenden die geothermischen Potenziale dargelegt.

Erdwärmekollektoren

Für die Installation von Erdwärmekollektoren (EWK) sind versiegelte, überbaute oder verschattete Flächen ungeeignet, da sich Erdkollektoren nur über den versickernden Niederschlag und die solare Einstrahlung regenerieren. Eine Verschattung führt dazu, dass sich die EWK in den Sommermonaten nicht regenerieren und das Erdreich zu Beginn der nächsten Heizperiode noch vereist ist. Darüber hinaus benötigen EWK einen Abstand zu tiefwurzelnder Vegetation, da diese Beschädigungen am EWK herbeiführen können. Die Entzugsleistung eines EWK schwankt im Jahresverlauf und somit mit der Außenlufttemperatur. Für die Region sind folgende Entzugsleistungen zu erwarten.

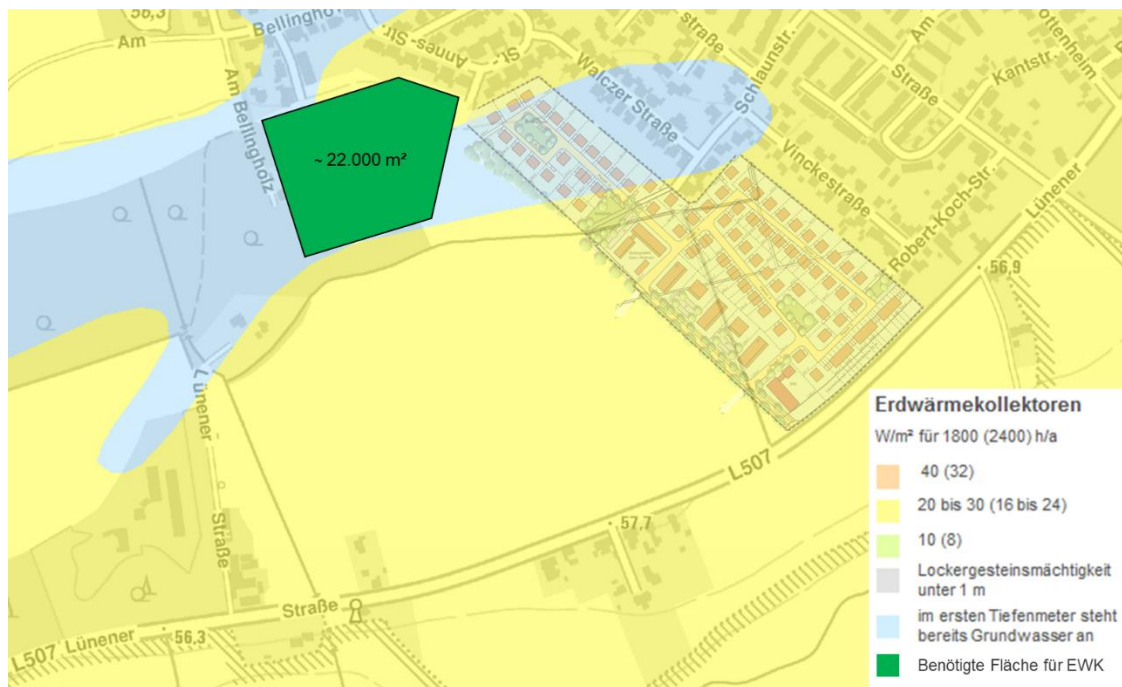


Abbildung 12 Spez. Entzugsleistungen im Bereich des Baugebiets und Flächenbedarf EWK (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Die Abbildung zeigt, dass im Baugebiet und im Bereich westlich des Baugebiets eine Entzugsleistung von ca. 20 – 30 W/m² zu erwarten ist. Wird für das geothermische System ein COP von 4,0 angesetzt, die angegebene spez. Entzugsleistung gemittelt und die aus Kapitel 1.2 ermittelte Heizleistung von ca. 730 kW herangezogen, so ergibt dies einen erforderlichen Flächenbedarf von ca. 22.000 m². Diese Fläche entspricht in etwa der in [Abbildung 12](#) dunkelgrün eingezeichneten Fläche. Die Gesamtfläche der einzelnen Grundstücke im Baugebiet beläuft sich nach Abzug der Gebäudegrundflächen auf ca. 40.000 m², wobei dies die Fläche ohne den Abzug von Flächen für Vegetation, Abständen zur Grundstücksgrenze oder sonstiger Nutzungen (Terrasse etc.) darstellt. Infolgedessen fällt die tatsächlich verfügbare Fläche viel kleiner aus, sodass das Nutzungsverfahren Erdwärmekollektoren (dezentral) individuell zu prüfen ist.

Erdsonden

Erdsonden müssen für hohe Entzugsenergien weit in das Erdreich eingebracht werden und unterliegen geologischen, hydrogeologischen und bergrechtlichen Anforderungen. Gegenüber den EWK werden Erdsonden vertikal und nicht flächig verlegt und weisen dadurch höhere Entzugsenergie auf einer kleineren Fläche auf. Über das Onlineportal „Geothermie in NRW“ und in Verbindung mit der VDI 4640 Blatt 2 – „Thermische Nutzung des Untergrundes“ wurde die theoretische Ergiebigkeit des Erdreichs bestimmt. In [Abbildung 13](#) ist das zu erwartende Schichtenprofil und die damit Verbundene Leitfähigkeit des Erdreichs dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit gibt Aufschluss über die Güte der Wärmeübergabe vom Erdreich an die Erdsonde.

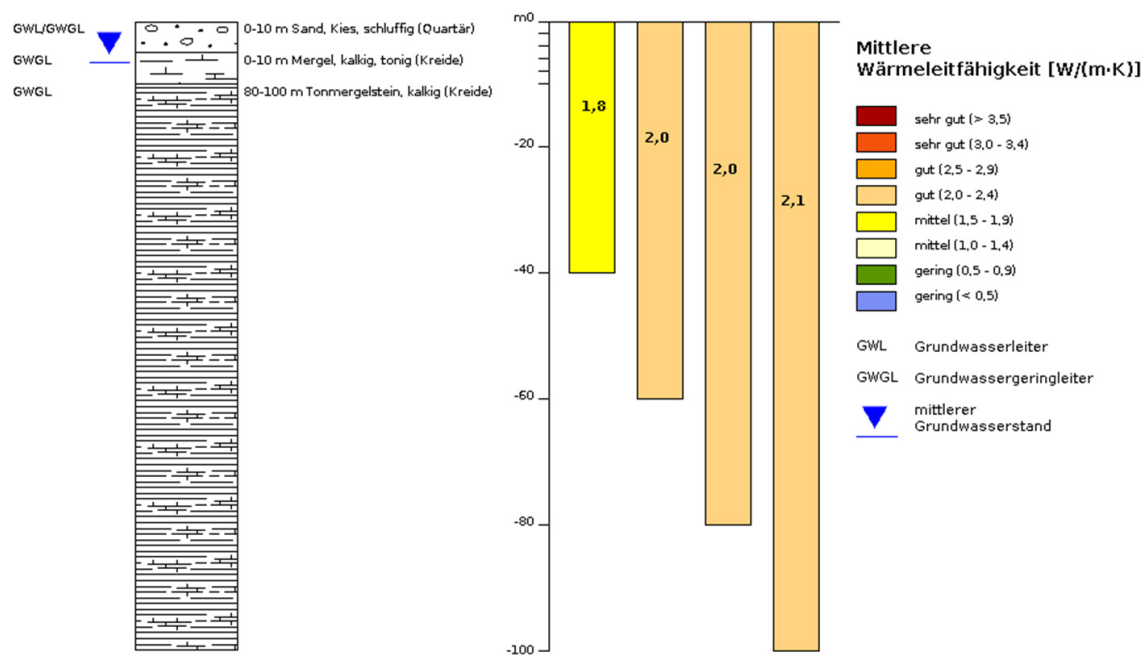


Abbildung 13 Zu erwartendes Bohrungsprofil und Wärmeleitfähigkeit (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

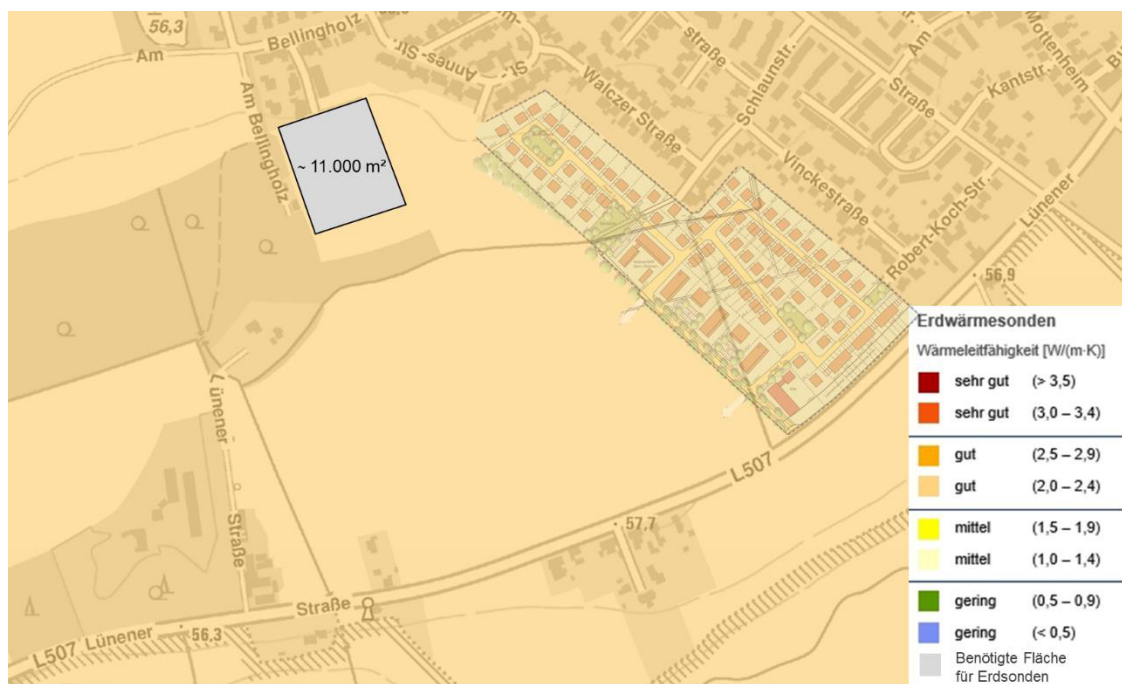


Abbildung 14 Flächenbedarf Erdsonden (Quelle: Geologischer Dienst NRW)

Bis 100 m Tiefe baut sich das Erdreich zu ca. 1/5 aus Sanden und Mergel und zu ca. 4/5 aus Tonmergelstein auf. Über die spez. Entzugsleistungen aus der VDI 4640-2¹² ist für diesen Schichtenaufbau ein theoretische Entzugsleistung von ca. 50 W/m zu erwarten. Wird auch hier ein COP von 4,0 angesetzt, die berechnete Heizleistung von 730 kW zugrunde gelegt und die maximale Tiefe der Sonde auf 100 m begrenzt, so werden in Summe 110 Erdsonden zur Versorgung des Baugebiets benötigt. Um eine thermische Beeinflussung der Sonden untereinander zu vermeiden, ist ein Abstand

¹² VDI 4640 Blatt 2:2019-06 Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen

von Sonde zu Sonde von ca. 10 m einzuhalten. Die erforderliche Gesamtfläche für die Installation der 110 Sonden beläuft sich folglich auf ca. 11.000 m². Die nordwestlich gelegenen Freiflächen können die erforderliche Fläche bereitstellen. Die Gesamtanzahl an Sonden kann über eine Verlängerung der Sonde verringert werden, wobei ab einer Überschreitung von 100 m Bohrtiefe das Bundesberggesetz (BBergG) berührt wird und gewisse Vorgaben zu erfüllen bzw. Erlaubnisse einzuholen sind.

Für eine dezentrale Erschließung sind die Erdsonden auf dem eigenen Grundstück zu installieren. Die Gesamtlänge der Sonde steigt mit der erforderlichen Heizleistung des Gebäudes und liegt ca. zwischen 90 m (EFH) und 840 m (MFH mit 19 WE). Um auch hier das BBergG nicht zu berühren kann die erforderliche Gesamtlänge auf mehrere Sonden aufgeteilt werden. Bei einer Einhaltung der Sondenlänge von 100 m erhöht sich die Anzahl an Erdsonden im Baugebiet auf 132, da jedes Grundstück einen eigenen Wärmeentzug vorsieht. Wie auch bei einem zentralen System sind bei einem dezentralen System gewissen Abstände zwischen den Erdsonden einzuhalten, um eine thermische Beeinflussung der Sonden untereinander als auch eine Beeinflussung des Nachbargrundstücks zu vermeiden. Demnach wurden die Grundstücke von Gebäuden mit einem höherem Wärmebedarf und die Grundstücke mit einer kleineren Freifläche hinsichtlich einer geothermischen Eignung bzw. Einhaltung der erforderlichen Abstände untersucht.



Abbildung 15 Prüfung Grundstücksflächen hinsichtlich geothermischer Eignung

Die Abbildung zeigt, dass bei den Mehrfamilienhäusern die Grundstücke ausreichend groß dimensioniert sind und es zu keiner thermischen Beeinflussung des Nachbargrundstücks kommt. Dieser Verhalt ist sowohl bei 6 m Sondenabstand (bei dez. Systemen < 30 kW Heizleistung) und größtenteils auch bei 10 m Sondenabstand gegeben. Des Weiteren können die Sondenabstände bei den EFH, der KiTa und bei den Doppelhäusern (6 m) eingehalten werden. Bei den Reihenhäusern im Süden beträgt die Grundstücksbreite ca. 5,5 m und somit zu wenig für einen Sondenradius von 3 m. Um eine thermische Beeinflussung der Sonden untereinander auszuschließen können die Erdsonden teils zur Straße hin versetzt oder im hinteren Bereich des Grundstücks in den Bereich des Lärmschutzwalls installiert

werden. Da es weiterhin zu einer thermischen Beeinflussung des Nachbargrundstücks kommt ist ggf. eine Gestattung des Nachbarn und eine Abstimmung mit der unteren Wasserbehörde erforderlich.

Eine Auflistung zu den erforderlichen Sondenlängen je Gebäude und die Gesamtsondenzahl (auf 100 m begrenzt) ist dem Anhang beigelegt.

Brunnenanlage

Geothermische Brunnenanlagen nutzen die im Grundwasser (GW) gespeicherte Wärme, indem über einen Saugbrunnen GW angesaugt wird, über das geschlossene System der Wärmepumpe ein Teil der Wärme übertragen und letztlich das abgekühlte Grundwasser über den Schluckbrunnen zurück in den Grundwasserleiter (GWL) geleitet wird. Für die Nutzung einer geothermischen Brunnenanlage kann eine wasserrechtliche Erlaubnis nach § 8 Abs. 1 WHG (Wasserhaushaltsgesetz) notwendig werden, da nach dem WHG ein Eingriff in das Grundwasser über die Entnahme und Wiedereinleitung vorgenommen wird. Ggf. ist eine Anzeige für das Vorhaben bei der unteren Wasserbehörde ausreichend. Ein allgemeines Verbot für die Installation eines GW-Brunnens ist in diesem Gebiet jedoch nicht zu erwarten, da sich der Standort nicht in einer Wasserschutzzone befindet.

Eine hydrogeologische Voraussetzung für die Errichtung eines GW-Brunnens ist die Ergiebigkeit des Entnahmebrunnens und die ausreichende Schluckfähigkeit des Brunnens für die Wiedereinleitung des Grundwassers. Die Förderfähigkeiten der Brunnen sind maßgeblich von der Beschaffenheit des Grundwasserleiters abhängig. So gelten Sande und Kiese mit einem geringen Anteil an Feinbestandteilen als gute GWL. Für eine genaue Auskunft einer Ergiebigkeit am Standort sind Probebohrungen oder ein Pumpversuch durchzuführen. Insofern eine Förderrate von 20 m³/h möglich ist, kann unter einer Temperaturspreizung von Vor- zu Rücklauf von 5 K der Brunnen eine Entzugsleistung von ca. 116 kW erbringen. Stark durchlässige GWL erreichen Werte von gut 270 kW. Mit dem Einsatz einer Wärmepumpe wird auch hier die Temperatur auf ein höheres Niveau angehoben (COP=4,0), sodass ca. 155 kW als potenzielle Wärmeleistung verfügbar wären. Die Wärmeleistung dieser Technik ist über den Einsatz größerer Brunnen bzw. mehrerer Brunnen skalierbar, jedoch stark Abhängigkeit von der Ergiebigkeit des Erdreichs. Neben der Ergiebigkeit hat auch der Wasserchemismus Einfluss auf die tatsächliche Umsetzbarkeit. Gelöste Inhaltsstoffe können bei der Förderung ausfallen und zu einer Verockerung des Schluckbrunnens führen. Demnach ist auch eine Grundwasseranalyse zwingend erforderlich.

Fazit geothermische Potenziale

Nach Untersuchung der geothermischen Potenziale ist festzuhalten, dass das Nutzungsverfahren Erdsonde sowohl als zentrale als auch dezentrale Versorgungsvariante umsetzbar wäre. Demnach würden für eine zentrale Versorgung des Baugebiets 110 Erdsonden und für eine dezentrale Versorgung 132 Erdsonden (bei Begrenzung auf 100 m Bohrtiefe) benötigt werden. Der Flächenbedarf für Erdwärmekollektoren kann im Baugebiet für eine zentrale Versorgung nicht bereitgestellt werden und auch für eine dezentrale Versorgung erscheint das Nutzungsverfahren EWK eher ungeeignet. Auch eine geothermische Brunnenanlage kann für die weitere Bearbeitung nicht in Betracht gezogen werden, da keine Betriebsparameter vorliegen, die Aufschluss über die Ergiebigkeit und Nutzbarkeit des Erdreichs geben.

3.3 Leitungsgebundene Versorgung

Eine Möglichkeit zur Versorgung des Baugebiets mit Erdgas, virtuellem Biomethan oder zukünftig auch Wasserstoff besteht über die Anbindung an das vorhandene Erdgasnetz. Die Lage des Bestandsnetzes wird in der folgenden Abbildung grob skizziert.



Abbildung 16 Erdgasbestandsnetz und mögliche Zuleitungen ins Baugebiet

Für das Baugebiet ergeben sich verschiedene Anbindungsmöglichkeiten an das Erdgasnetz. So verläuft sowohl nördlich entlang der Lytham-St. Annes Straße und Walczer Straße als auch östlich zum Baugebiet entlang der Vinckestraße und Lünener Straße eine Niederdruckleitung mit einem Rohraußendurchmesser von DA 150 bzw. DA 160 mm (angedeutet mit gelber Strichlinie). Somit besteht die Möglichkeit das Baugebiet über mehrere Anbindungspunkte mit Erdgas/Biomethan/Wasserstoff zu versorgen.

4 Bewertung und Vorauswahl

Für eine erste Bewertung werden mögliche Versorgungsoptionen für das Baugebiet qualitativ miteinander verglichen. Hierzu werden jeder Option Punkte in den Bereichen Klimaschutz, Wirtschaftlichkeit, Bedienung und Zukunftsfähigkeit zugeordnet. Die Punkte im Bereich Klimaschutz basieren auf den spezifischen CO₂-Äquivalenzemissionen der jeweiligen Technik sowie der Effizienz und des Transports. Die Punkteverteilungen zur Wirtschaftlichkeit basieren auf überschlägigen Investitions- und Brennstoffkosten sowie werden Aspekte wie die aktuelle Preisstabilität und Abhängigkeit miteinbezogen. Die Punkte zur Bedienbarkeit orientieren sich an den Angaben aus der VDI 2067 zur Bedienung der jeweiligen Wärmeerzeuger sowie Einschätzungen zum Platzbedarf und der Erschließung der Technik. Die Zukunftsfähigkeit orientiert sich an der Anpassungsmöglichkeit des Temperaturniveaus, der Preisstabilität und des Autarkiegrades.

Die Bewertung der Systeme stellt sich wie folgt dar, wobei 1 eine sehr gute und 6 eine sehr schlechte Bewertung ergibt:

Auswahl Versorgungsvarianten			Klimaschutz	Wirtschaftlichkeit	Bedienung/Akzeptanz	Zukunftsfähigkeit	Gesamt
			25%	25%	25%	25%	100%
dezentrale Systeme							
Quelle							
Gaskessel	Erdgas		6	5	5	5	5,3
Luft-Wp	Umwelt/Strom	Lüfter/Kanal	2	3	2	1	2,0
geoth. WP	Umwelt/Strom	Erdsonden	1	2	2	1	1,5
Holzfeuerung	Pellet		2	3	4	3	3,0
Solarthermie	i.V.m.	VRK	1	3	2	1	1,8
zentrale Systeme							
BHKW+Kessel	Erdgas		5	4	5	5	4,8
BHKW+Kessel	Biomethan/-gas		3	3	5	3	3,5
Holzfeuerung	HHS/Pellet		2	3	4	3	3,0
geoth. WP	low-ex	Erdsonden	2	3	3	2	2,5
Wasser WP	low-ex	Lippe	2	4	4	2	3,0
geoth. WP	kalte NW	Erdsonden	1	3	3	2	2,3
Aspekte der Bewertung			THG-Emissionen	Investitionskosten	Aufwand zur Bedienung	Technologieoffenheit	
			Effizienz	Brennstoffkosten	Platzbedarf	Mögl. zur Anpassung	
			Transport	Preisstabilität	Transport/Belieferung	Preisstabilität	
			sonst. Emissionen	Abhängigkeiten	Akzeptanz bei Bewohnern	Autarkiegrad	
			...	...	Erschließen ...	...	

Abbildung 17 Bewertung möglicher Versorgungsvarianten (Stand 11.10.22)

Aufgrund der erwähnten Unverhältnismäßigkeit von Wärmebedarf und Investitionsaufwand, scheidet eine zentrale Wärmepumpenversorgung auf Basis einer Flusswassernutzung (Lippe) aus der vertiefenden Betrachtung aus.

Die Geothermie kann mit dem Nutzungsverfahren Erdsonden sowohl dezentral als auch zentral über die ausreichend groß dimensionierten Freiflächen und Grundstücke zur Wärmeevollversorgung des Baugebiets führen. Für eine zentrale Nutzung der Geothermie stehen die Varianten Kalte Nahwärme und LowEx zur Verfügung. Für beide Varianten ist eine Zuleitung der geothermisch erwärmten Sole ins Baugebiet erforderlich.

Sowohl dezentrale Holzfeuerungen als auch eine zentrale Holzfeuerung stehen als Wärmeversorgungsmöglichkeit dem Baugebiet zur Verfügung. Dies liegt vorrangig an der ohnehin externen und straßengebundenen Anlieferung des Energieträgers Holz.

Die gasbetriebenen Versorgungstechniken wie Gaskessel und BHKW stehen potenziell zur Versorgung des Baugebiets zur Verfügung, auch vor dem Hintergrund der Anschlussmöglichkeit an das bestehende

Erdgasnetz. Mit Blick auf die ökologische Belastung und die geopolitische Situation soll der Energieträger Erdgas aus der weiteren Betrachtung fallen.

Potenziell kann ein BHKW auch mit den erneuerbaren Energieträgern Biogas und Biomethan betrieben werden, jedoch steht für Biogas kein Erzeuger in wirtschaftlich erreichbarer Nähe zur Verfügung. Für den Bezug von Biomethan (aufbereitetes Biogas im Erdgasnetz) ist ein Anschluss an das öffentliche Erdgasnetz und der Einkauf von Biogas- bzw. Grüngaszertifikaten erforderlich. Über die Zertifikate kann die ökologische Bilanz des Baugebiets ggü. einer Erdgasverbrennung verbessert werden, aus technischer Sicht erfolgt jedoch der Einsatz und die Verbrennung von Erdgas aus dem Erdgasnetz. Demnach steht auch diese Art der Versorgungstechnik einer vertiefenden Betrachtung nicht zur Verfügung.

Dezentrale Luft-Wasser Wärmepumpen bieten die Möglichkeit Wärme unabhängig und individuell bereitzustellen und können als potentielle Versorgungsmöglichkeit mitaufgenommen werden.

Für eine weitere Eingrenzung möglicher Versorgungsoptionen ist ein direkter Vergleich von zentraler und dezentraler Versorgung zu ziehen. Mit der nachfolgenden Tabelle werden Vor- und Nachteile dargelegt.

Bewertung	Zentrale Versorgung
+	Ein System zur Versorgung aller Eigentümer und nicht viele Einzelsysteme → höherer Kosten-Nutzen-Faktor
o	Zusätzlicher Flächenbedarf für Heizzentrale und je nach Versorgungsart für Erdsonden/ Erdkollektoren
-	Zwang zur Anbindung und Benutzung → Verlust der Entscheidungsfreiheit
-	Betreiber erforderlich → Öffentliche Ausschreibung notwendig
-	Aufbau eines Verteilnetzes → in Abhängigkeit der Versorgung erhöhte Wärmeverluste und Investitionskosten
-	Rechtlicher und organisatorischer Aufwand zur Sicherung der Errichtung und des Betriebs des Systems
	Dezentrale Versorgung
+	Entscheidungsfreiheit gemäß aktueller Verordnungslage
+	Unabhängigkeit von Dritten → kein Netzverbund, hoher Autarkiegrad möglich
+	Eigenverantwortung → Nutzung individueller Förder- und Finanzierungsmöglichkeiten
+	viele Best Practice-Beispiele in Bellingholz (dezentrale Wärmepumpen)
o	Wegfall von Einfluss auf die optische Gestaltung des Quartiers (Luft-Wasser Wärmepumpen) → jedoch Varianz in der Art der Wärmeerzeuger realistisch
-	Geringe/ keine Steuerungsmöglichkeit der Kommune

Tabelle 9 Pro und Contra von zentraler und dezentraler Versorgung

Die Tabelle zeigt, dass dezentrale Versorgungsvarianten spez. für das Baugebiet Bellingholz-Süd deutliche Vorteile gegenüber einer zentralen Versorgung besitzen. Nach Absprache mit den Projektteilnehmenden entfallen demnach für die weitere Betrachtung die zentralen Versorgungsmöglichkeiten. Darunter fällt auch die Geothermie mit den Betriebsarten LowEx und kalte Nahwärme. Eine zentrale geothermische Erschließung birgt, aufgrund der ausreichenden Flächenverfügbarkeit im Baugebiet, keine Effizienzvorteile oder betriebliche Vorteile gegenüber einer dezentralen Erschließung.

5 Beschreibung der Versorgungsvarianten

Auf Grundlage der vorangegangenen Ausführungen und projektbegleitenden Erörterungen werden in Abstimmung mit dem Auftraggeber die nachfolgenden Versorgungsvarianten näher untersucht und wie folgt zugeordnet:

- Referenzvariante: Dezentrale Luft-Wasser Wärmepumpe
- Var. 1: Dezentrale Sole-Wasser Wärmepumpe in Verbindung mit dem Nutzungsverfahren Erdsonden
- Var. 2: Dezentrale Holzfeuerung auf Basis von Holzpellets

Aufgrund der aktuellen Entwicklungen ist davon auszugehen, dass jede*r Gebäudeeigentümer*in bzw. Investor*in aus eigenem Interesse oder auf Grundlage zukünftiger, gesetzlicher Verordnungen eine Photovoltaikanlage auf seinem Gebäude installiert. Vor diesem Hintergrund ist eine Berücksichtigung der PV-Anlagen im Rahmen des Vergleichs der verschiedenen Wärmeversorgungslösungen nicht zielführend. Einzig bei der Ausweisung der CO₂-Emissionen kann und sollte die PV-Eigenstromerzeugung Berücksichtigung finden

Die Solarthermie ist die wohl klimafreundlichste Form der Wärmeerzeugung, kann aber nur als Ergänzung zu einem weiteren System genutzt werden. Die Solarthermie wird daher separat in der Empfehlung als dezentrale Ergänzung bewertet.

Im Folgenden werden die einzelnen Versorgungsvarianten bzgl. ihrer technischen Auslegung beschrieben.

Ref. Var.: Dezentrale Luft-Wasser Wärmepumpe

Um eine Orientierung im Vergleich mit den üblichen Systemen zu ermöglichen, wird im Folgenden das System Luft-Wasser Wärmepumpe als dezentrales Referenzsystem mitbetrachtet. Da jedes Gebäude einen eigenen Wärmeerzeuger erhält und die bereitzustellende Leistung abhängig von der Größe der Wohnfläche und Anzahl der wohnhaften Personen ist (TWW-Bedarf), variieren die Heizleistungen der Luft-Wasser Wärmepumpen. Nachfolgende Aufstellung soll Aufschluss über die theoretisch zu erwartenden Größen der Wärmeerzeuger geben. Dabei wurde die Heizleistung der Wärmeerzeuger auf die nächste ganze Zahl aufgerundet.

Gebäudetyp	Wärmepumpen-Leistung
EFH	6 kW
DH	2x5 kW
RH	5x5 kW
MFH	30 kW
KiTa	23 kW

Tabelle 10 Leistungen Luft-Wasser Wärmepumpen

Mit Blick auf Tabelle 10 variiert die Leistung der WP zwischen 5 und 30 kW. Da jedes Wohneigentum in den Doppelhäusern und Reihenhäusern einen eigenen Wärmeerzeuger erhält, sind bei einem DH zwei und bei einem RH fünf Wärmeerzeuger zu installieren.

Für die Luftansaugung und Wärmeübertragung stehen grundsätzlich zwei Wärmepumpensysteme zur Verfügung. Dies ist zum einen die Monoblock-Wärmepumpe und zum anderen die Split-Wärmepumpe. Bei der Monoblock Variante befinden sich alle Bauelemente wie Verdichter und Verflüssiger in der

Außeneinheit und die erzeugte Wärme wird über eine Wärmeleitung ins Gebäude geleitet. Vor allem bei größeren Gebäuden bzw. bei höheren Wärmebedarfen werden an kalten Tagen höhere Luft-Volumenströme zur Beheizung des Gebäudes benötigt. Dies kann bei der Monoblock-Variante zu einer höheren Geräuschentwicklung führen. Bei großen Gebäuden (z. B. MFH) ist eine Innenaufstellung der Wärmepumpe und eine Zuluftleitung ins und eine Abluftleitung aus dem Gebäude praktikabel. So kann die Luft über Luftkanäle angesaugt und der weitere Prozess im Gebäude erfolgen. Dies führt zu verringerten Geräuschemissionen und zur Vermeidung von Anlagenteilen im Außenbereich, jedoch zu höheren Kosten durch große Wanddurchbrüche und Luftkanäle. Bei der Split Variante befindet sich in der Regel nur der Lüfter in der Außeneinheit und die weitere Anlagentechnik im Gebäude. Die Geräuschentwicklung fällt dementsprechend geringer aus. Beide der hier vorgestellten Varianten benötigen Strom für die Temperaturerhöhung des Brauch- und Trinkwarmwassers. Bei einem zugrunde gelegten COP von 3,5 entsteht im Baugebiet ein zusätzlicher Strombedarf von ca. 249 MWh/a. Der solare Deckungsgrad beträgt dann ca. 131 %.

Var. 1: Dezentrale Sole-Wasser Wärmepumpe

Die erste Vergleichsvariante stellt ebenfalls eine wärmepumpenbasierte Versorgung dar und beruht auf einem Wärmeentzug aus dem Erdreich. Für den Wärmeentzug werden auf dem jeweiligen Grundstück Erdsonden installiert. Die Anzahl der zu installierenden Erdsonden variiert mit der benötigten Heizleistung des jeweiligen Gebäudes. Über eine Verlängerung der Sondenlänge ist eine Reduzierung der Sondenanzahl möglich, insofern die rechtlichen Voraussetzungen erfüllt sind. Die Temperaturerhöhung zur Heiz- und Trinkwarmwasserbereitung erfolgt dezentral in den jeweiligen Gebäuden. Die Leistungen der Sole/Wasser Wärmepumpen sind gleich zu den Luft-Wasser Wärmepumpen der Referenzvariante und der [Tabelle 10](#) zu entnehmen. Aufgrund der höheren Quelltemperatur in den Wintermonaten des Jahres (deutlich über 0 °C), wird für die Sole-Wasser Wärmepumpen ein höherer COP von 4,0 angesetzt. Der Strombedarf verringert sich folglich im Vergleich zur Referenzvariante und beträgt ca. 218 MWh/a. Der Strombedarf der Solepumpe, welche die Sole aus der Sonde/ den Sonden zieht und dem Verdampfer der WP zuführt ist im Strombedarf bereits mitinbegriffen. Der solare Deckungsgrad bei Variante 1 liegt bei ca. 134 %.

Var. 2: Dezentrale Holzfeuerung

Die zweite Vergleichsvariante basiert auf einer dezentralen Holzpelletfeuerung. Wie auch bei den vorherigen Varianten erhält jedes Wohneigentum, mit Ausnahme der MFH, einen eigenen Wärmeerzeuger. Bei den MFH ist ein Wärmeerzeuger je Gebäude ausreichend, was den Vorteil birgt, dass u.a. nur ein Pelletlager benötigt wird. So wäre bedarfsseitig für ein durchschnittliches MFH ein Lagervolumen von 7 m³ bei einer halbjährlichen Belieferung ausreichend groß dimensioniert. Für ein EFH reduziert sich das Lagervolumen auf ca. 3 m³ bei einer jährlichen Belieferung.

Der gesamte elektrische Energiebedarf für Variante 2 beträgt ca. 10 MWh/a und fällt im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Varianten marginal aus. Der bilanzielle solare Deckungsgrad beläuft sich hier auf ca. 157 %.

6 Variantenvergleich

Im Folgenden werden die drei beschriebenen Varianten in Bezug auf ihre ökologischen und ökonomischen Unterschiede miteinander verglichen. Da den Varianten bestimmte Rahmenparameter zugrunde liegen, werden diese ebenfalls dargelegt.

6.1 Rahmenparameter

Für den ökologischen Vergleich wurden den Berechnungen verschiedene Kennwerte zugrunde gelegt. Für eine Darstellung der ökologischen Auswirkungen nach dem derzeitigen gesetzlichen Standard werden die Angaben aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) Anlage 4 (inkl. § 22) und Anlage 9 gewählt. Die angesetzten Werte aus dem GEG (Stand 01.11.2020) GEG stellen sich wie folgt dar:

Energieträger	CO ₂ -Äquivalenzfaktor (CO ₂ e)	Primärenergiefaktor (PEF)
Strom	560 gCO ₂ e/kWh	1,80
Holz	20 gCO ₂ e/kWh	0,20

Tabelle 11 Verwendete CO₂e-Faktoren und PEF

Die spezifischen Emissionsfaktoren aus dem GEG beschreiben die ökologischen Auswirkungen bei einer energetischen Nutzung der Energieträger. Die zugrunde gelegte Einheit ist gCO₂e/kWh. CO₂-Äquivalente (CO₂e) fassen die Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase, darunter Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas (Distickstoffoxid) und F-Gase (fluorierte Kohlenwasserstoffverbindungen), zusammen, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Gasen herzustellen. So wird über das Global Warming Potential (GWP) die Wirkung eines Gases auf die Wirkung von CO₂ umgerechnet bzw. normiert. Das GWP von Methan beispielsweise liegt bei 28, sodass die Klimawirkung gegenüber dem Gas CO₂ 28-fach höher ist.

Für den wirtschaftlichen Vergleich wurden die nachfolgenden Rahmenparameter verwendet. Alle Angaben sind Netto.

Allgemeine wirtschaftliche Parameter:

- Nutzungsdauer: lt. VDI 2067
- Wartungs-, Instandhaltungs- und Betriebskosten: lt. VDI 2067
- Kalkulationszinssatz: 2,00 %¹³

Verbrauchskosten¹⁴:

- Strompreis: 35,00 ct/kWh
- Strompreis Wärmepumpentarif: 30,00 ct/kWh
- Holzpelletpreis: 15,00 ct/kWh

¹³ Stand Oktober 2022

¹⁴ Die spez. Kosten der Energieträger orientieren sich an den Beschaffungskosten zum Zeitpunkt der Bearbeitung (Oktober 2022). Im Zuge der politischen und wirtschaftlichen Situation in Europa, liegen die spez. Kosten höher als im Zeitraum des Vorjahres. Zwar liegen die Kosten Ende 2022/Anfang 2023 etwas niedriger als zum Betrachtungszeitpunkt (Holzpellets), jedoch kann eine weitere Absenkung/ Harmonisierung bzw. ein weiterer Anstieg (Strom) nicht hinreichend belegt werden.

6.2 Vergleich Umweltbilanz

Die Umweltbilanz soll die Auswirkungen der Wärmeerzeugung auf die Umwelt darstellen und bedient sich verschiedener Kennwerte. Der Primärenergiefaktor wird ebenfalls berechnet, stellt aber keine ökologische Kenngröße dar. Er nimmt Einfluss auf die Bewertung des Gebäudes und die Erreichung bestimmter Gebäudestandards. Der Primärenergiefaktor ist der Quotient aus eingesetzter Primärenergie und erzeugter Wärmeenergie.

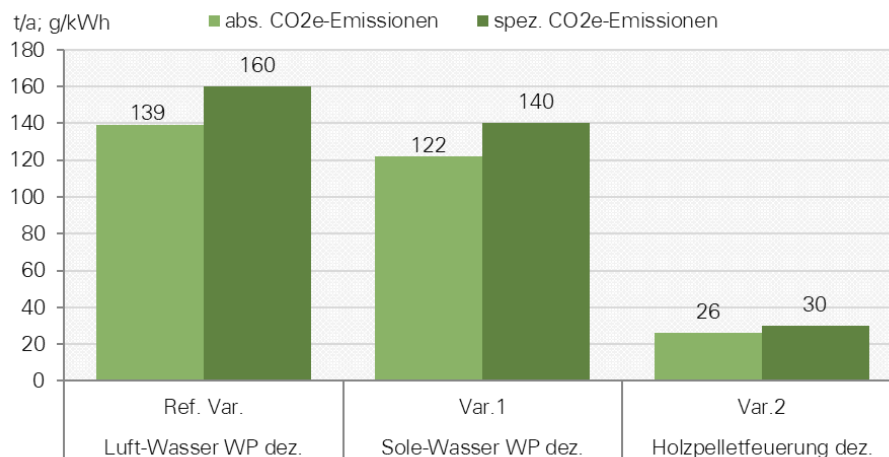


Abbildung 18 Absolute und spez. Emissionen nach GEG 2020

Nach aktueller Berechnungsweise gemäß GEG 2020 schneidet aus ökologischer Sicht eine Wärmeversorgung mit Hilfe einer Holzpelletfeuerung am besten ab. Mit ca. 30 gCO₂e/kWh bzw. 26 tCO₂e/a fallen die zu erwartenden Emissionen ggü. den beiden Vergleichsvarianten etwa 80 % niedriger aus. Dies liegt vorrangig an dem im GEG 2020 ausgewiesenen CO₂-Äquivalenzfaktor für Holz von 20 g/kWh. Je nach Herkunft des Holzes und den Emissionen in der Vorkette (Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Transport, etc.) können die Emissionen höher oder niedriger ausfallen. Die CO₂e-Kennwerte der Referenzvariante und der Variante 1 hingegen liegen sehr nah beieinander. Da die beiden Varianten den Energieträger Strom für die Erzeugung von Wärme einsetzen, ist die ökologische Belastung lediglich von der Effizienz des jeweiligen Systems abhängig. So verzeichnet die Variante 1 mit der besten Effizienz (konstante Vorlauftemperaturen aus dem geothermischen System) ggü. der Referenzvariante geringere Emissionen in Höhe von 140 gCO₂e/kWh bzw. 122 tCO₂e/a. Für eine reine Luft-Wasser Wärmepumpenversorgung ist die Effizienz, aufgrund niedriger Quelltemperatur während eines hohen Wärmebedarfs, niedriger anzusetzen, sodass Emissionen in Höhe von 160 gCO₂e/kWh bzw. 139 tCO₂e/a zu erwarten sind. Die Stromherkunft nimmt bei den wärmepumpenbasierten Varianten einen besonderen und beeinflussbaren Stellenwert ein. Da nach aktueller Gesetzeslage (GEG 2020) ein Emissionsfaktor von 560 g/kWh anzusetzen ist, fallen die absoluten bzw. spez. Emissionen dementsprechend hoch aus. Mit dem weiter steigenden Ausbau der erneuerbaren Energien ist eine weitere Senkung der Emissionen im deutschen Strommix zu erwarten, sodass mit einer der nächsten Novellierungen des GEG der Emissionsfaktor für den Bezug von Strom deutlich niedriger ausfallen und gesetzlich verankert werden könnte. Der reale Emissionsfaktor für Strom inkl. Vorkette lag im Jahr 2021 bei ca. 485 gCO₂e/kWh¹⁵. Wird ein Mix aus eigens erzeugtem PV-Strom und Strom aus dem Netz der öffentlichen Versorgung eingesetzt, so kann sich ein Wärmepumpensystem zukünftig zu einer treibhausgasneutralen Versorgung entwickeln.

¹⁵ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf

Ein weiterer Kennwert ist die Angabe der zu erwartenden Emissionen je m² Wohnfläche und der Primärenergiefaktor, welcher Einfluss auf die Erreichung der KfW-Gebäudeanforderungen nimmt.

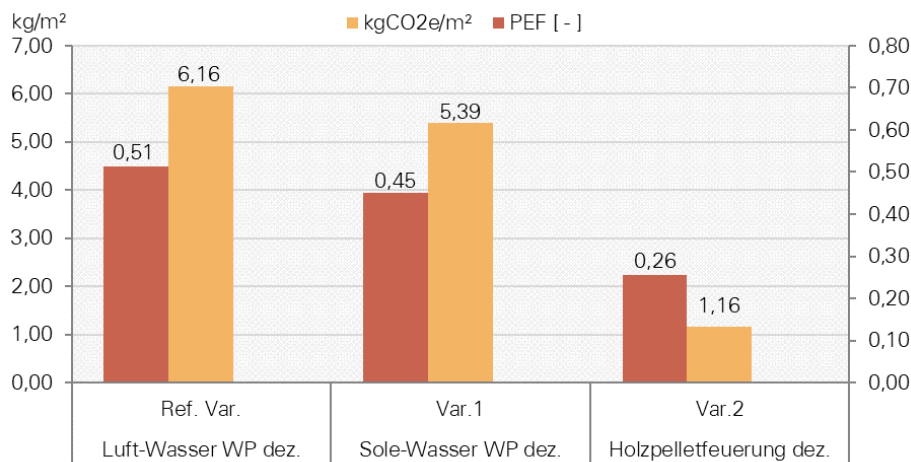


Abbildung 19 Flächenspezifische Emissionen und Primärenergiefaktor

Werden die wärmeseitigen Emissionen nun auf die ermittelte Wohnfläche von ca. 22.600 m² bezogen, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie Abbildung 18. Die höchsten flächenspezifischen Emissionen stellt die Referenzvariante mit 6,16 kgCO₂e/m² und die geringsten Emissionen die Variante 2 (Holzpelletfeuerung) mit 1,16 kgCO₂e/m². Die Referenzvariante liegt sowohl aus ökologischer Sicht als auch mit Blick auf den Primärenergiefaktor sehr nah am Ergebnis von Variante 1. So verzeichnet die Referenzvariante einen PEF von 0,51 und die Variante 1 einen PEF von 0,45, was auch hier auf den Effizienzunterschied der beiden Wärmepumpensysteme zurückzuführen ist. Die Variante 2 kann sich, durch den im GEG 2020 ausgewiesenen und grundlegend kleineren PEF von 0,2 PEF (anstatt 1,8 bei Strom), deutlich von den anderen Varianten abheben und liegt bei ca. 0,26.

6.3 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Im Wirtschaftlichkeitsvergleich werden folgende Bestandteile der Vollkosten unterschieden:

- Kapitalkosten: Kosten für die Anlagentechnik, Nahwärmenetz, Hausanschlüsse etc..
- Betriebskosten: Kosten für Wartung, Instandhaltung und Bedienung.
- Verbrauchskosten: Kosten des Endenergiebedarfs für Strom, Wärmepumpenstrom und Holzpellets

Der Vergleich der Kosten erfolgt durch Berechnung von Annuitäten. Die Annuitäten werden dann auf die in den Gebäuden verbrauchte Nutzenergie in ct/kWh bezogen, um eine Vergleichbarkeit aller Varianten zu ermöglichen. Die Investitionskosten in die jeweilige Anlagentechnik beruhen auf angefragten Richtpreisangeboten.

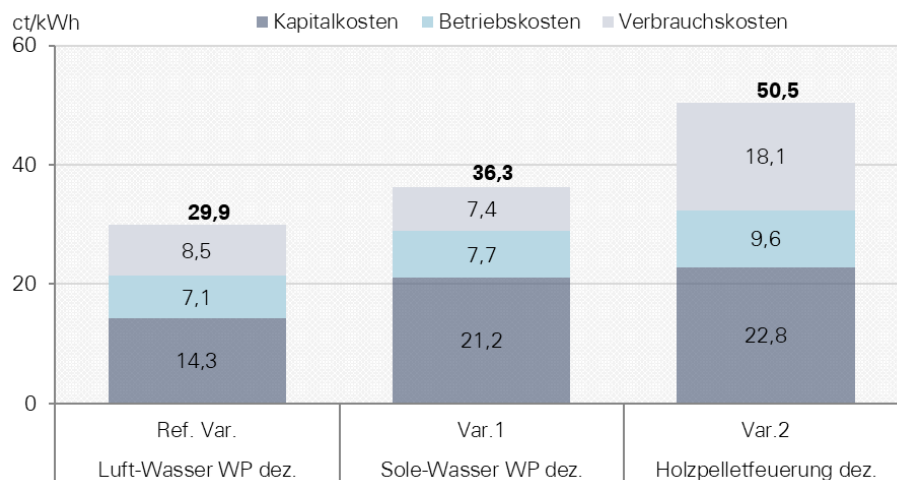


Abbildung 20 Spezifischer Wärmepreis über alle Gebäudetypen

Mit Blick auf [Abbildung 20](#) weist die Referenzvariante den geringsten und die Variante 2 den höchsten zu erwartenden Wärmemischpreis auf. Der Wärmepreis von Variante 2 in Höhe von ca. 50 ct/kWh setzt sich zu einem Großteil aus den Kapital- und den Verbrauchskosten zusammen. Im Vergleich zu den wärmepumpenbasierten Varianten, liegt der absolute Anteil der Verbrauchskosten mit 18,1 ct/kWh mehr als doppelt so, obwohl der angesetzte Pelletpreis mit 15 ct/kWh nur etwa halb so hoch ggü. dem Strompreis ausfällt. In diesem Punkt kann eine Wärmepumpe ihren Effizienzvorteil (höherer Wirkungsgrad) nutzen und in Abhängigkeit des COP's den Energiebedarf und letztlich die Verbrauchskosten um ein vielfaches senken. Dies führt maßgeblich dazu, dass sich der spez. Wärmepreis auf ca. 36 ct/kWh absenkt. Im Vergleich zur Referenzvariante jedoch liegt der Wärmepreis der Variante 1 deutlich höher. Mit Blick auf die einzelnen Bestandteile der Vollkosten wird nur ein größerer Unterschied bei den Kapitalkosten ersichtlich. Während bei einer Luft-Wasser Wärmepumpe lediglich ein Monoblock oder das Splitgerät vor dem Gebäude steht und Leitungen ins Gebäude zu verlegen sind, so benötigt eine Sole-Wasser Wärmepumpe ein Bauteil für den geothermischen Wärmeentzug. So sind je nach Wärmebedarf eine oder mehrere Bohrungen für die Erdsonden durchzuführen und Materialkosten für die Sonde selbst einzukalkulieren. Die Kosten für die Erdsonden machen gut ein Drittel der Kapitalkosten aus. Durch den Wegfall dieses Kostenfaktors reduziert sich der Wärmepreis bei der Referenzvariante auf ca. 30 ct/kWh.

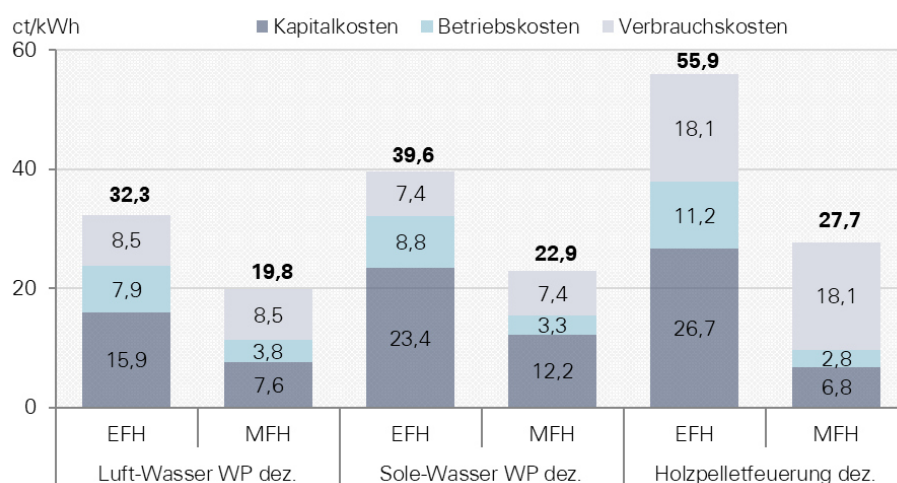


Abbildung 21 Spezifischer Wärmepreis für EFH und MFH

Während [Abbildung 20](#) einen gemittelten Wärmepreis über alle Gebäudetypen abbildet, geht [Abbildung 21](#) genauer auf den Wärmepreis für zwei unterschiedliche Gebäudetypen ein. Dabei wurde sich für ein EFH und ein MFH entschieden, welche sich durch einen größeren Unterschied im Wärmebedarf auszeichnen. Der Wärmebedarf für ein EFH liegt bei ca. 7.000 kWh/a und der eines MFH bei 35.000 kWh/a (gemittelt). Die Abbildung zeigt, dass die Spanne des Wärmepreises stark auseinander geht. So fällt der Wärmepreis unter Einsatz einer Holzpelletfeuerung in einem EFH ca. 28 ct/kWh teurer aus, als in einem MFH. Dadurch, dass die Kapital- und die Betriebskosten unabhängig von der Menge der erzeugten Wärme und vornehmlich von der Größe des Wärmeerzeugers abhängig sind, führt eine hohe Wärmeabnahme zu einer starken Verringerung bzw. Aufteilung der Kosten (hier auf die kWh). Eine geringe Wärmeabnahme, wie es beim EFH der Fall ist, führt somit zu einer verringerten Aufteilung der Kosten. Hinzu kommt, dass die spez. Kosten für die Anlagentechnik nicht linear mit der Leistung des Wärmeerzeugers wachsen, sondern sinken. So liegen die Kosten für einen Wärmeerzeuger mit höherer Leistung, hier MFH, nur gering über den Kosten für einen Wärmeerzeuger in einem EFH. Da im Baugebiet mehr Einfamilienhäuser als Mehrfamilienhäuser vorgesehen sind, orientieren sie die Kosten in [Abbildung 20](#) in Richtung der Wärmepreise für ein Einfamilienhaus.

6.4 Empfehlung

Für das Neubaugebiet „Bellingholz-Süd“ in Werne standen nach der Ermittlung von Energiepotenzialen in der Umgebung und auf dem Baugebiet mehrere potenzielle Versorgungslösungen zur Verfügung, die auf den erneuerbaren Energien/ der Abwärmenutzung beruhen. Nach Abwägung von Vor- und Nachteilen zwischen zentralen und dezentralen Systemen, überwiegen die Vorteile einer dezentralen Versorgung für das Baugebiet Bellingholz-Süd. Infolgedessen wurden zwei dezentrale und wärmepumpenbasierte Versorgungslösungen, darunter die Luft-Wasser und die Sole-Wasser Wärmepumpe, und eine dezentrale Holzpelletfeuerung genauer untersucht.

Der Vergleich der ökologischen Ergebnisse hat ergeben, dass nach aktueller Gesetzeslage (GEG 2020), unter Einsatz des Energieträgers Holz die besten ökologischen Ergebnisse erzielt werden. So schneidet die Holzpelletfeuerung emissionsseitig um ca. 80 % besser im Vergleich zu den Wärmepumpenvarianten ab. Die Referenzvariante „Luft-Wasser Wärmepumpe“ und Variante 1 „Sole-Wasser Wärmepumpe“ unterscheiden sich aus ökologischer Sicht nur geringfügig, sodass auf Basis der dargelegten Kennwerte keine weitere Präferenz für eines der beiden Systeme ausgesprochen werden kann. Die berechneten Primärenergiefaktoren aller Varianten liegen nah beieinander und stehen im Einklang mit den Anforderungen des KfW-40 Gebäudestandards. Beim ökonomischen Vergleich wiederum hat sich eine größere Unterscheidung zwischen den Varianten gegeben. Bei Betrachtung des Wärmepreises schneidet die Referenzvariante um ca. 18 % günstiger als die Variante 1 und ca. 41 % günstiger als Variante 2 ab. Da die Berechnungsergebnisse der Varianten zum Teil sehr nah beieinander liegen und Stärken und Schwächen sich teils ausgleichen, können die bis hierhin vorgestellten Ergebnisse nicht ausschließlich zur Favorisierung einer Variante herangezogen werden. Es gibt darüber hinaus noch weitere Themenbereiche, die bei einem Vergleich unterschiedlicher Versorgungslösungen berücksichtigt werden sollten: Komplexität der Umsetzung, Akzeptanz und Zukunftsfähigkeit.

Bei einer dezentralen Holzpelletfeuerung, wie sie Variante 2 darstellt, ist die Umsetzung teils komplexer als bei den wärmepumpenbasierten Versorgungslösungen. So sind beim Bau des Gebäudes u.a. ein Schornstein zur Ableitung der Verbrennungsgase und ein ausreichend dimensioniertes Pelletlager einzuplanen. Weiterhin sind die Emissionsgrenzwerte für Feinstaub und Kohlenmonoxid einzuhalten, die die Wahl des Wärmeerzeugers ggf. einschränken oder zumindest zusätzliche Kosten für z.B. einen Feinstaubpartikelfilter erfordern. Da bei Wärmepumpen keine Verbrennungsprozesse stattfinden, entstehen keine direkten Emissionen, sondern nur Indirekte, wonach hier keine Auflagen zu erfüllen sind. Jedoch sind bei den Wärmepumpenlösungen vor allem die einzuhaltenden Abstände zur

Grundstücksgrenze ein bedeutender Faktor bei der Umsetzung. Bei einer Sole-Wasser Wärmepumpe ist zu beachten, dass es durch den Betrieb der Erdsonde(n) zu keiner thermischen Beeinflussung des Nachbargrundstücks kommt. Sollte es bedingt durch eine geringe Flächenverfügbarkeit zu einer Unterschreitung der Mindestabstände (i.d.R. 6 m) kommen, so kann nach Rücksprache mit dem Nachbarn und der zuständigen unteren Wasserbehörde der Mindestabstand auch unterschritten werden. Da bei einer Luft-Wasser Wärmepumpe durch den Lüfter und/oder den Kompressor eine Geräuschentwicklung im Außenbereich entsteht, sind Anforderungen an den Immissions- bzw. Lärmschutz einzuhalten. Wird die Wärmepumpe durch den Wohneigentümer selbst aufgestellt, so ist die Einhaltung des Mindestabstands zur Grundstücksgrenze von einem Sachverständigen zu bescheinigen.

Beim Punkt Akzeptanz sind vor allem bei den Holzpelletfeuerungen das erhöhte Verkehrsaufkommen, durch die dezentrale Anlieferung der Holzpellets, und die dadurch entstehende Geräuschentwicklung (Verkehr, Einblasen der Holzpellets in das Pelletlager) zu nennen. Darüber hinaus entsteht durch eine externe Anlieferung des Energieträgers Holz eine Abhängigkeit in Bezug auf die Anlieferung und der regionalen/ überregionalen Verfügbarkeit. Durch den Verbrennungsprozess ist mit einem grundlegend höheren Wartungsaufwand (Reinigung, Leerung Aschetonnen etc.) als bei Wärmepumpen zu rechnen. Zwei Aspekte, die sich positiv auf die Akzeptanz von Wärmepumpen auswirken, sind die ökologische Beeinflussbarkeit der Emissionen und die gute Kombinierbarkeit mit einer PV-Anlage. Über eine PV-Anlage kann die Autarkie der Wärmeversorgung wesentlich erhöht werden, da der benötigte Strom direkt vor Ort erzeugt und verbraucht wird. Zudem besitzt PV-Strom nach GEG 2020 einen Emissionsfaktor von Null, was sich positiv auf die ökologische Bilanz einer Wärmepumpe auswirkt. Was die Akzeptanz einer Wärmepumpe und explizit einer Luft-Wasser Wärmepumpe schwinden lassen kann, ist die optische Beeinflussung des Baugebiets durch die Aufstellung der Wärmepumpe im Außenbereich. Demnach sollte die Wärmepumpe bestenfalls in die Gebäudearchitektur eingebunden oder im Innenbereich aufgestellt werden (nur Lüfter im Außenbereich oder Zuluftleitung ins Gebäude), um gleichzeitig auch die Geräuschentwicklung im Außenbereich zu verringern/vermeiden.

An den zuvor genannten Punkt der ökologischen Beeinflussbarkeit schließt der Themenbereich Zukunftsfähigkeit an. Über einen individuellen Photovoltaikausbau auf den Dachflächen mit einer festgesetzten Untergrenze (in Form von kWp, PV-Fläche (%) pro Dach, etc.) kann die Wärmepumpe zu einer treibhausgasneutralen Wärmeversorgung weiterentwickelt werden. Auch wenn kein PV-Ausbau auf dem eigenen Grundstück stattfindet, wird sich der bundesdeutsche Strommix in den nächsten Jahren grundlegend verbessern (Einhaltung Klimaziele) und zur Verbesserung der ökologischen Bilanz der Wärmepumpe führen.

Mit Bezug auf das in Kapitel 1 verfolgte Ziel einer bilanziellen Treibhausgasneutralität werden in der nachfolgenden Tabelle die Gesamtemissionen dargestellt, die sich aus der Wärmeerzeugung und dem Bezug von Strom (für Haushaltsstrom + E-Mobilität) aus dem öffentlichen Netz zusammensetzen. Darüber hinaus wird dargelegt, wie viel PV-Strom zu erzeugen und welche PV-Leistung insgesamt zu installieren ist, um eine bilanzielle Treibhausgasneutralität für das Baugebiet zu erreichen. Der zu erzeugende PV-Strom kompensiert Emissionen mit 560 gCO₂e/kWh (GEG 2020).

Zusammenfassung	Ref. Var.	Var.1	Var. 2
Wärmebedarf	870.726 kWh/a	870.726 kWh/a	870.726 kWh/a
CO ₂ e-Emissionen Wärme	139 t/a	122 t/a	26 t/a
Strombedarf Haushalt+KiTa	484.298 kWh/a	484.298 kWh/a	484.298 kWh/a
Strombedarf E-Mobilität	711.481 kWh/a	711.481 kWh/a	711.481 kWh/a
CO ₂ e-Emissionen Strom	670 t/a	670 t/a	670 t/a
CO ₂ e-Emissionen gesamt	809 t/a	792 t/a	696 t/a
PV-Strom für Ziel THGN	1.444.558 kWh/a	1.413.461 kWh/a	1.242.523 kWh/a
PV-Leistung	1.688 kWp	1.651 kWp	1.452 kWp
PV-Fläche	9.161 m ²	8.964 m ²	7.880 m ²
Anteil an pot. Dachfläche	48%	47%	41%

Tabelle 12 THG-Bilanz, PV-Leistung und Anteil PV-Fläche

Die Tabelle zeigt, dass je höher die Gesamtemissionen sind, desto mehr PV-Strom ist im Baugebiet zu erzeugen. Die Gesamtemissionen der Referenzvariante und der Variante 1 setzen sich vollständig aus dem Bezug von Netzstrom zusammen, da zur Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe lediglich Strom benötigt wird. Demnach entspricht der erforderliche PV-Strom für die Kompensation, dem Strombedarf für Haushalt+KiTa, E-Mobilität und der Wärmeerzeugung. Der benötigte PV-Strom errechnet sich aus dem Quotienten von den Gesamtemissionen und dem spez. Emissionsfaktor des Strombezugs (560 gCO₂e/kWh). Demnach sind je nach Variante 1.452 kWp (Var. 2) bis 1.688 kWp (Ref.Var.) zu installieren, wenn ein spez. solarer Ertrag von 856 kWh/kWp angesetzt wird (ermittelt in Kapitel 3.1). Auch hier liegen die Ergebnisse bzw. die Erfordernisse nah beieinander, sodass keine besondere Abgrenzung einer Variante ersichtlich wird. Wird sich nicht auf die Leistung bezogen, sondern auf die benötigte Dachfläche, so ist eine Dachausnutzung von ca. 41 % bis ca. 48 % erforderlich, bei einer zugrunde gelegten potentiellen Gesamtdachfläche (darunter alle Flächen die in Süd- oder Ost-West-Richtung ausgerichtet sind, ohne rein nördliche Flächen) von ca. 19.050 m² im Baugebiet und einer PV-Modulleistung von je 350 Wp. Die errechneten Dachflächenanteile werden als verträglich angesehen, unterschreiten die angenommene Dachausnutzung von 65 % (s. Kapitel 3.1) und stellen somit auch ein technisch/baulich realisierbares Potenzial dar.

Einen weiteren positiven Einfluss auf die ökologische Bilanz kann neben einem guten Baustandard und einer reduzierten Wohnfläche auch die Solarthermie nehmen. Aus dem in Kapitel 3.1 genannten Gründen (Entscheidung des Investors/ der Investorin, keine Abgrenzung im Variantenvergleich) wurde die Solarthermie bilanziell nicht betrachtet. Da sie jedoch in Abhängigkeit der Anlagengröße gute Erträge erzielt, können CO₂-emittierende Wärmeerzeuger (Holzfeuerung (direkt), Wärmepumpe (indirekt)) verdrängt und ggf. eine Abschaltung des Wärmeerzeugers in den Sommermonaten (Variante 2 + Variante 1, wenn nicht gekühlt wird) ermöglicht werden. Eine mögliche Flächenkonkurrenz zwischen der Photovoltaik und der Solarthermie kann weder bestätigt noch widerlegt werden. Insofern ein Gebäude ohnehin über eine Wärmepumpe mit Wärme (Heiz- und TWW-Wärme) versorgt wird, ist es sinnvoll, die freie Fläche des Daches im höchsten Maße mit PV auszustatten, da die Wärmepumpe über einen geringen Anteil an Strom das Drei- bis Vierfache an Wärme erzeugen kann (je nach Temperaturniveau). Ist in dem Gebäude keine Wärmepumpe installiert, so empfiehlt es sich einen Teil der Wärme solarthermisch und somit CO₂-neutral zu erzeugen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit allen Varianten über eine bilanzielle PV-Strom Anrechnung das verfolgte Ziel einer bilanziellen Treibhausgasneutralität für das Baugebiet Bellingholz-Süd zu erreichen ist. Der ökologische Vergleich zeigt, dass nach aktueller Gesetzeslage für eine Holzpelletfeuerung die geringsten Emissionen zu erwarten sind und die Emissionen der Wärmepumpenlösungen nahezu gleich hoch ausfallen. Im ökonomischen Vergleich hingegen stellte die

Luft-Wasser Wärmepumpe deutlich den geringsten (Misch-)Wärmepreis und die Holzpelletfeuerung den Höchsten. Der qualitative Vergleich führte zu einer deutlicheren Abgrenzung der Varianten, sodass folgendes Resümee gezogen wird: Eine Holzpelletfeuerung punktet zwar durch niedrige CO₂e-Emissionen, die genannten Punkte in den Bereichen Umsetzung und vor allem Akzeptanz überwiegen jedoch den ökologischen Vorteil nach dem derzeitigen gesetzlichen Standard. Insofern eine Versorgung über Holzpellets in Erwägung gebracht wird, so ist eine Installation in Mehrfamilienhäusern zu bevorzugen, um die Kosten zu senken und die Maßnahmen zu bündeln. Allgemein ist für das Baugebiet eine Wärmepumpenversorgung in Form einer Luft-Wasser oder Sole-Wasser Wärmepumpe empfehlenswerter, da auch vor dem Hintergrund der zukünftigen PV-Pflicht für Neubauten die Emissionen zu schmälern sind und die Energieunabhängigkeit erhöht wird.

7 Anhang

- Anhang A: Berechnungen zu den Bedarfen und Potenzialen
- Anhang B: Berechnungen des Variantenvergleichs

Grundstück [-]	Gebäudetyp [-]	Grundlagen			Wohnfläche [m²]	Wohneinheiten [-]	Personen [-]	Wärme				
		Grundfläche [m²]	Geschosse [-]	BGF [m²]				KfW 55 [kWh/a]	KfW 40 [kWh/a]	Passivhaus [kWh/a]	TWW [kWh/a]	Heizlast [kW]
1 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
2 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
3 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
4 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
5 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
6 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
7 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
8 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
9 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
10 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
11 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
12 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
13 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
14 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
15 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
16 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
17 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
18 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
19 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
20 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
21 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
22 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
23 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
24 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
25 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
26 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
27 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
28 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
29 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
30 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
31 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
32 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
33 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
34 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
35 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
36 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
37 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
38 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
39 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
40 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
41 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
42 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
43 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
44 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
45 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
46 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
47 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
48 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
49 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
50 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
51 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
52 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
53 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
54 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
55 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
56 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
57 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
58 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
59 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
60 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
61 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
62 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
63 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
64 DH		155	2,5	387	290	2	6	9.259	7.356	3.729	3.557	9,1
65 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
66 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
67 MFH		785	3	2.355	1.766	19	38	55.158	44.494	22.555	22.525	55,9
68 MFH		105	3	315	236	2	4	7.378	5.951	3.017	2.371	7,0
69 MFH		490	3	1.470	1.103	12	24	34.430	27.773	14.079	14.226	35,0
70 MFH		256	3	768	576	6	12	17.988	14.510	7.356	7.113	18,1
71 MFH		490	3	1.470	1.103	12	24	34.430	27.773	14.079	14.226	35,0
72 MFH		256	3	768	576	6	12	17.988	14.510	7.356	7.113	18,1
73 MFH		490	3	1.470	1.103	12	24	34.430	27.773	14.079	14.226	35,0
74 5RH		347	2,5	867	650	5	15	20.754	16.488	8.357	8.891	21,1
75 5RH		347	2,5	867	650	5	15	20.754	16.488	8.357	8.891	21,1
76 5RH		347	2,5	867	650	5	15	20.754	16.488	8.357	8.891	21,1
77 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
78 EFH		160	1,5	240	180	1	4	6.046	4.660	2.362	2.371	5,9
79 KiTa		703	1	703	527	0	97	17.711	13.651	6.918	7.760	22,1
Summen		15.426		30.146	22.609	165	578	734.697	577.848	292.872	292.878	730

Grundlagen		Strom				Solarthermie		Photovoltaik			
Grundstück	Gebäudetyp	Haushalt/KiTa	E-Mobilität	Fahrzeuge	Ladepunkte	Absorberfläche	Ertrag	Dachtyp	Dachfläche	PV-Fläche	Module
[-]	[-]	[kWh/a]	[kWh/a]	[-]	[-]		[kWh/a]	[-]	[m²]	[m²]	[-]
1 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
2 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
3 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
4 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
5 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
6 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
7 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
8 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
9 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
10 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
11 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
12 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
13 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
14 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
15 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
16 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
17 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
18 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
19 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
20 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
21 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
22 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
23 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
24 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
25 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
26 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
27 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
28 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
29 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
30 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
31 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
32 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
33 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
34 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
35 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
36 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
37 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
38 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
39 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
40 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
41 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
42 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
43 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
44 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
45 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
46 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
47 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
48 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
49 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
50 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
51 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
52 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
53 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
54 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
55 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
56 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
57 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
58 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
59 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
60 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
61 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
62 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
63 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
64 DH		6.800	8.838	2	2	4,3	2.452	Satteldach	202	131	69
65 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
66 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
67 MFH		34.200	55.976	19	5	27,4	15.531	Flachdach	785	510	242
68 MFH		3.600	5.892	2	1	2,9	1.635	Flachdach	105	68	32
69 MFH		21.600	35.353	12	3	17,3	9.809	Flachdach	490	319	151
70 MFH		10.800	17.677	6	1,5	8,6	4.904	Flachdach	256	166	79
71 MFH		21.600	35.353	12	3	17,3	9.809	Flachdach	490	319	151
72 MFH		10.800	17.677	6	1,5	8,6	4.904	Flachdach	256	166	79
73 MFH		21.600	35.353	12	3	17,3	9.809	Flachdach	490	319	151
74 5RH		17.000	22.096	5	5	10,8	6.130	Satteldach	453	294	140
75 5RH		17.000	22.096	5	5	10,8	6.130	Satteldach	453	294	140
76 5RH		17.000	22.096	5	5	10,8	6.130	Satteldach	453	294	140
77 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
78 EFH		3.700	5.892	1	1	2,9	1.635	Satteldach	209	136	71
79 KiTa		17.198	2.946	2	2	9,4	5.350	Flachdach	703	457	217
Summen		484.298	711.481	167	116	355,8	201.934		19.045	12.379	6.324

Grundlagen		Photovoltaik		Geothermie		
Grundstück	Gebäudetyp	Leistung	Ertrag	Entzugsleistung	Länge Sonde	Anzahl Sonden
[-]	[-]	[kWp]	[kWh/a]	[kW]	[m]	[-]
1	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
2	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
3	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
4	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
5	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
6	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
7	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
8	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
9	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
10	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
11	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
12	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
13	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
14	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
15	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
16	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
17	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
18	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
19	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
20	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
21	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
22	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
23	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
24	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
25	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
26	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
27	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
28	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
29	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
30	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
31	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
32	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
33	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
34	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
35	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
36	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
37	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
38	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
39	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
40	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
41	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
42	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
43	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
44	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
45	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
46	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
47	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
48	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
49	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
50	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
51	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
52	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
53	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
54	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
55	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
56	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
57	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
58	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
59	DH	24,2	20.678	6,8	137	2
60	DH	24,2	20.678	6,8	137	2
61	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
62	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
63	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
64	DH	24,2	20.658	6,8	137	2
65	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
66	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
67	MFH	84,7	72.522	41,9	838	9
68	MFH	11,2	9.590	5,3	106	2
69	MFH	52,9	45.251	26,2	525	6
70	MFH	27,7	23.674	13,5	271	3
71	MFH	52,9	45.251	26,2	525	6
72	MFH	27,7	23.674	13,5	271	3
73	MFH	52,9	45.251	26,2	525	6
74	5RH	49,0	41.955	15,8	316	4
75	5RH	49,0	41.955	15,8	316	4
76	5RH	49,0	41.955	15,8	316	4
77	EFH	24,9	21.277	4,4	88	1
78	EFH	24,9	21.257	4,4	88	1
79	KiTa	76,0	65.030	16,6	332	4
Summen		2.213	1.894.552	548	10.955	132

		Referenzvariante	Variante 1	Variante 2
		Luft-Wasser WP dez.	Sole-Wasser WP dez.	Holzpelletfeuerung dez.
sämtliche Kosten und Preise ohne Mehrwertsteuer	Dimension			
Versorgungsaufgabe	Gebäudeteile	79	79	79
Wärmebedarf	kW	730	730	730
Vollbenutzungsdauer	h/a	1.193	1.193	1.193
Heizwärmebedarf	kWh/a	577.848	577.848	577.848
TWW	kWh/a	292.878	292.878	292.878
Wärmebedarf gesamt	kWh/a	870.726	870.726	870.726
Auslegung				
Wärmepumpe	kW	730	730	-
Vollbenutzungsdauer	h/a	1.193	1.193	-
Wärmeerzeugung	kWh/a	870.726	870.726	-
Arbeitszahl	-	3,5	4,0	-
Stromeinsatz	kWh/a	248.779	217.682	-
Pelletkessel				
therm. Leistung	kW	-	-	730
Vollbenutzungsdauer	h/a	-	-	1.193
Wärmeerzeugung	kWh/a	-	-	870.726
Nutzungsgrad	-	-	-	0,85
Brennstoffeinsatz	kWh/a	-	-	1.024.384
Heizwert	kWh/kg	-	-	4,6
Schüttdichte	kg/m³	-	-	650
Pelletmenge	m³/a	-	-	343
Hilfsenergie Strom				
Stromverbrauch	kWh/a	-	-	10.158
Endenergiebedarf				
Holzpellets	kWh/a	-	-	1.024.384
Stromverbrauch Mix	kWh/a	-	-	10.158
Stromverbrauch Wärmepumpe	kWh/a	248.779	217.682	-
Umweltbilanz PE und CO2e				
Primärenergiebedarf	kWh/a	447.802	391.827	223.162
Primärenergiefaktor	-	0,51	0,45	0,26
CO2e-Emissionen	kg/a	139.316	121.902	26.176
CO2e-Emissionen	t/a	139	122	26
CO2e-Faktor Wärmelieferung	g/kWh	160	140	30
CO2e-Emissionen	kg/m²	6,16	5,39	1,16
Kostenrahmen/-schätzung				
Wärmepumpe inkl. Montage	€	1.543.371	1.591.650	-
Pelletkessel	€	-	-	1.632.960

Pellet-Bunker	€	-	-	in Pelletkessel-Preis
Schnecke und Saugsystem	€	-	-	in Pelletkessel-Preis
Erdsonden	€	-	690.552	-
Schornstein	€	-	-	326.000
Hydr. Anbindung	€	in WP-Preis	in WP-Preis	160.000
Elt. Anbindung	€	in WP-Preis	in WP-Preis	156.000
MSR	€	in WP-Preis	in WP-Preis	in Pelletkessel-Preis
Sonstiges	€	154.337	228.220	227.496
Investitions-Summe	€	1.697.708	2.510.422	2.502.456
Planung	€	339.542	502.084	500.491
Gesamtinvestition inkl. Planung	€	2.037.250	3.012.507	3.002.947

Kapitalkosten

Kalkulationszins	%/a	2,0	2,0	2,0
Annuität	€/a	124.592	184.235	198.914
mittlerer Annuitätsfaktor	%/a	6,1	6,1	6,6

W,I+B-Kosten

Bedienkosten	€/a	-	-	-
W+I-Kosten	€/a	61.735	67.119	83.163
W,I+B-Kosten	€/a	61.735	67.119	83.163

Verbrauchskosten

Strompreis Wärmepumpenstrom	ct/kWh(el)	30	30	-
Stromkosten Wärmepumpenstrom	€/a	74.012	64.760	-
Pelletpreis	ct/kWh	-	-	15
Pelletkosten	€/a	-	-	153.658
Strompreis Hilfsenergie	ct/kWh(el)	35	35	35
Stromkosten Hilfsenergie	€/a	-	-	3.555
Verbrauchskosten gesamt	€/a	74.012	64.760	157.213

Gesamtkosten	€/a	260.338	316.114	439.290
---------------------	-----	---------	---------	---------

Gesamtkosten	ct/kWh(th)	29,9	36,3	50,5
---------------------	------------	------	------	------

	Dimension	Referenzvariante		Variante 1		Variante 2	
		Luft-Wasser WP dez.		Sole-Wasser WP dez.		Holzpelletfeuerung dez.	
sämtliche Kosten und Preise ohne Mehrwertsteuer		EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
Versorgungsaufgabe	Gebäudeteile	1	1	1	1	1	1
Wärmebedarf	kW	6	29	6	29	6	29
Vollbenutzungsdauer	h/a	1.192	1.192	1.192	1.192	1.192	1.192
Heizwärmebedarf	kWh/a	4.660	23.255	4.660	23.255	4.660	23.255
TWW	kWh/a	2.371	11.686	2.371	11.686	2.371	11.686
Wärmebedarf gesamt	kWh/a	7.031	34.941	7.031	34.941	7.031	34.941
Auslegung							
Wärmepumpe	kW	6	29	6	29	-	-
Vollbenutzungsdauer	h/a	1.192	1.192	1.192	1.192	-	-
Wärmeerzeugung	kWh/a	7.031	34.941	7.031	34.941	-	-
Arbeitszahl	-	3,5	3,5	4,0	4,0	-	-
Stromeinsatz	kWh/a	2.009	9.983	1.758	8.735	-	-
Pelletkessel							
therm. Leistung	kW	-	-	-	-	6	29
Vollbenutzungsdauer	h/a	-	-	-	-	1.192	1.192
Wärmeerzeugung	kWh/a	-	-	-	-	7.031	34.941
Nutzungsgrad	-	-	-	-	-	0,85	0,85
Brennstoffeinsatz	kWh/a	-	-	-	-	8.272	41.107
Heizwert	kWh/kg	-	-	-	-	4,6	4,6
Schüttdichte	kg/m³	-	-	-	-	650	650
Pelletmenge	m³/a	-	-	-	-	3	14
Hilfsenergie Strom							
Stromverbrauch	kWh/a	-	-	-	-	82	408
Endenergiebedarf							
Holzpellets	kWh/a	-	-	-	-	8.272	41.107
Stromverbrauch Mix	kWh/a	-	-	-	-	82	408
Stromverbrauch Wärmepumpe	kWh/a	2.009	9.983	1.758	8.735	-	-
Umweltbilanz PE und CO2e							
Primärenergiebedarf	kWh/a	3.616	17.970	3.164	15.723	1.802	8.955
Primärenergiefaktor	-	0,51	0,51	0,45	0,45	0,26	0,26
CO2e-Emissionen	kg/a	1.125	5.591	984	4.892	211	1.050
CO2e-Faktor Wärmelieferung	g/kWh	160	160	140	140	30	30
Kostenrahmen/-schätzung							
Wärmepumpe inkl. Montage	€	13.845	32.817	14.803	25.101	-	-
Pelletkessel	€	-	-	-	-	15.424	19.222
Pellet-Bunker	€	-	-	-	-	in Pelletkessel-Preis	in Pelletkessel-Preis
Schnecke und Saugsystem	€	-	-	-	-	in Pelletkessel-Preis	in Pelletkessel-Preis
Erdsonden	€	-	-	5.542	27.559	-	-
Schornstein	€	-	-	-	-	3.000	4.750
Hydr. Anbindung	€	in WP-Preis	in WP-Preis	in WP-Preis	in WP-Preis	1.500	2.000
El. Anbindung	€	in WP-Preis	in WP-Preis	in WP-Preis	in WP-Preis	1.500	1.500
MSR	€	in WP-Preis	in WP-Preis	in WP-Preis	in WP-Preis	in Pelletkessel-Preis	in Pelletkessel-Preis
Sonstiges	€	1.385	3.282	2.035	5.266	2.142	2.747
Investitions-Summe	€	15.230	36.098	22.380	57.926	23.566	30.219
Planung	€	3.046	7.220	4.476	11.585	4.713	6.044
Gesamtinvestition inkl. Planung	€	18.276	43.318	26.856	69.511	28.279	36.263
Kapitalkosten							
Kalkulationszins	%/a	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Annuität	€/a	1.118	2.649	1.642	4.251	1.876	2.372
mittlerer Annuitätsfaktor	%/a	6,1	6,1	6,1	6,1	6,6	6,6
W,I+B-Kosten							
Bedienkosten	€/a	-	-	-	-	-	-
W+I-Kosten	€/a	554	1.313	620	1.142	784	995
W,I+B-Kosten	€/a	554	1.313	620	1.142	784	995
Verbrauchs-kosten							
Strompreis Wärmepumpenstr ct/kWh(el)		30	30	30	30	-	-
Stromkosten Wärmepumpenstr €/a		598	2.970	523	2.599	-	-
Pelletpreis	ct/kWh	-	-	-	-	15	15
Pelletkosten	€/a	-	-	-	-	1.241	6.166
Strompreis Hilfsenergie	ct/kWh(el)	35	35	35	35	35	35
Stromkosten Hilfsenergie	€/a	-	-	-	-	29	143
Verbrauchs-kosten gesamt	€/a	598	2.970	523	2.599	1.269	6.309
Gesamtkosten	€/a	2.269	6.932	2.785	7.992	3.929	9.676
Gesamtkosten	ct/kWh(th)	32,3	19,8	39,6	22,9	55,9	27,7