

Angebot Nr. 2024000

Klimaschutzfachbeitrag

Energiekonzept für den Bebauungsplan SK46 „Osterfeld“ der Stadt Salzkotten



November 2022

Bearbeitung durch:

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

Auftraggeber:

Stadt Salzkotten
Am Grarock 19
33154 Salzkotten
+49 5258 507-1140
j.kruse@Salzkotten.de

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
2 Bedarfsanalyse	10
2.1 Wärme	10
2.2 Strom	12
2.3 Kälte (Kühlung, Wärmeschutz)	14
3 Versorgungsoptionen	16
3.1 Begriffserläuterungen in der Wärmeverteilung und Erzeugung	16
3.2 Techniken in der Wärmeerzeugung	17
4 Potenzialanalyse	20
4.1 Solare Potenziale	21
4.2 Geothermische Potenziale	25
4.3 Biogas	27
5 Bewertung und Vorauswahl	28
6 Beschreibung der Versorgungsvarianten	30
7 Variantenvergleich	36
7.1 Rahmenparameter	36
7.2 Vergleich Energie- und Umweltbilanz	37
7.3 Wirtschaftlichkeitsvergleich	42
7.4 Empfehlung	45
Anhang	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Stdb. Entwurf (Stand 17.05.2022)	9
Abbildung 2	Wärmebedarf nach Gebäudestandard	11
Abbildung 3	Verteilung elektrische Energie bei vollständiger Ladung im Quartier	13
Abbildung 4	Solerer Ertrag in Abhängigkeit der Anlagenausrichtung	21
Abbildung 5	Solarer Deckungsgrad am Beispiel EFH	24
Abbildung 6	Geothermische Energiequellen	25
Abbildung 7	Wasser- und Heilquellenschutzgebiete in Umgebung Salzkotten	26
Abbildung 8	Biogasproduzenten in der Umgebung	27
Abbildung 9	Bewertung möglicher Versorgungsvarianten (Stand 17.05.22)	28
Abbildung 10	Erzeugerlastgang Holzfeuerung	31
Abbildung 11	Wärmenetz und Anbindung Heizzentrale	32
Abbildung 12	Erzeugerlastgang Holzfeuerung plus Biogas-BHKW	33
Abbildung 13	Erzeugerlastgang Holzfeuerung plus Wärmelieferung	34
Abbildung 14	Biogas- bzw. Wärmeleitung ins Quartier	35
Abbildung 15	Absolute und spez. Emissionen nach GEG 2020	38
Abbildung 16	Absolute Emissionen bei PV-Stromanrechnung	39
Abbildung 17	Spez. Emissionen bei PV-Stromanrechnung	39
Abbildung 18	Absolute und spez. Emissionen nach Strommix 2030	40
Abbildung 19	Flächenspezifische Emissionen und Primärenergiefaktor	40
Abbildung 20	Flächenspezifische Emissionen bei PV-Strom Anrechnung	41
Abbildung 21	Primärenergiefaktoren bei PV-Strom Anrechnung	41
Abbildung 22	Flächenspezifische Emissionen und Primärenergiefaktor bei Strommix 2030	42
Abbildung 23	Wärmepreis ohne und mit Förderung nach zukünftigen BEW	43
Abbildung 24	Kapital-, Betriebs- und Verbrauchskosten ohne Förderung	43
Abbildung 25	Flächenspezifischer Wärmepreis	44
Abbildung 26	Wärmepreis ohne u. mit Förderung nach zukünftigen BEW bei Passivhausstandard	44
Abbildung 27	Flächenspezifischer Wärmepreis bei Passivhaus Standard	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Gebäudekennwerte Wärme (KfW 40 Standard)	11
Tabelle 2	Strombedarf an Abhängigkeit der Personenzahl, in Anlehnung an (CO2online, 2021)	12
Tabelle 3	Kennwerte E-Mobilität	13
Tabelle 4	Übersicht der Versorgungsoptionen	18
Tabelle 5	Flächenverfügbarkeit Gebäudetypen	22
Tabelle 6	Gerundete PV-Kennwerte	22
Tabelle 7	Leistungen Luft-Wasser Wärmepumpen	30
Tabelle 8	Verwendete CO ₂ e-Faktoren und PEF	36
Tabelle 9	Prognostizierte Emissionsfaktoren nach der Studie dena, prognos und nach dem NECP	36
Tabelle 10	Nach GEG-Berechnung anrechenbare Energieströme der PV-Strom Erzeugung	39
Tabelle 11	THG-Bilanz, PV-Leistung und Anteil PV-Fläche bei GEG Strommix	47
Tabelle 12	THG Bilanz, PV-Leistung und Anteil PV-Fläche bei Strommix 2030	48

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
BGF	Bruttogrundfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
COP	Coefficient of performance
CO _{2e}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DHH	Doppelhaushälfte
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
EWK	Erdwärmekollektoren
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GW	Grundwasser
GWP	Global Warming Potential
HA	Hausanschluss
Hi	Heizwert
Hs	Brennwert
HZ	Heizzentrale
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kW _{th}	Kilowatt thermisch
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MFH	Mehrfamilienhaus
NECP	Nationaler Energie- und Klimaplan
NGF	Nettogrundfläche
PEF	Primärenergiefaktor
PV	Photovoltaik
ST	Solarthermie
STA	Solarthermische Anlage
stdb.	städtebaulich
THG	Treibhausgas
TWW	Trinkwarmwasser
VRK	Vakuumröhrenkollektor
WE	Wohneinheiten
WP	Wärmepumpe

1 Ausgangslage

Für die weitere Konzeptionierung des Wohnbaugebiets „Osterfeld“ in Salzkotten soll ein Fachbeitrag zum Thema „Energie/Klimaschutz“ erstellt werden, der das Plangebiet auf eine energieeffiziente und klimagerechte Wohngebietsplanung überprüft.

Zielsetzungen

Die effiziente und klimaschonende Versorgung von Baugebieten mit Energie leistet einen erheblichen Beitrag zur Einhaltung von Klimaschutzziele. 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 Salzkotten 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 Salzkotten soll angesichts der klimapolitischen Herausforderungen eine bilanzielle und auf das Jahr gerechnete Treibhausgasneutralität für das Quartier erzielt werden. Demnach erfolgt eine Bilanzierung der Energiebedarfe und -erzeugungen innerhalb der Bilanzgrenze „Baugebiet Osterfeld“. So werden bedarfsseitig die Energiemengen für Heizwärme, Trinkwarmwasser (TWW), 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 neu 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 Quartier 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 „Osterfeld“, welches sich im östlichen Teil der Kernstadt Salzkotten ansiedeln soll, liegt ein städtebaulicher (stdb.) Entwurf zugrunde. Der darin dargestellte Geltungsbereich obliegt dem Flächeneigentum der Stadt Salzkotten, welche auch entscheidungstragend ist, und umfasst eine Fläche von rund 104.000 m². Davon entfallen ca. 15.500 m² auf öffentliche Grünflächen, ca. 1.200 m² auf private Grünflächen und ca. 12.000 m² auf Verkehrsflächen. Die übrige Fläche soll der Wohnbebauung dienen und v. a. jungen Familien die Möglichkeit bieten Eigentumsgrundstücke zu erwerben. Für das Baugebiet sind 130 Grundstücksflächen vorgesehen, auf die sich die Gebäudetypen Einfamilienhaus (EFH), Doppelhaushälfte (DHH) und Mehrfamilienhaus (MFH) verteilen. In Summe können dem stdb. 95 EFH (davon 24 mit Einliegerwohnung), 64 DHH und 3 MFH zugeordnet werden. Für die Möglichkeit der Platzierung einer Heizzentrale zur zentralen Wärmeversorgung des Gebiets ist im Nord-Osten des Baugebiets eine zweckmäßige Fläche vorhanden. In der Mitte des Plangebiets ist eine Gemeinschaftsfläche für z.B. den ÖPNV, Packstationen etc. vorgesehen. Die Dachausrichtungen der Gebäude in Süd bzw. Ost-West stellen eine gute Grundlage für die solare Energieerzeugung dar. Mit der im B-Plan festgelegten PV-Pflicht können Dachflächen für die PV-Nutzung gesichert und der Grundstein für eine bilanzielle Treibhausgasneutralität gelegt werden. Die Möglichkeit der Kombination von Photovoltaik und Dachbegrünung trägt nicht nur zur optischen Aufwertung der Dächer, sondern auch zu einer passiven Abkühlung der Gebäude in den Sommermonaten bei. Durch den leichten Versatz der in vertikaler Richtung geplanten Gebäude kann einer gegenseitigen Verschattung entgegengewirkt, ein solarer Gewinn am Gebäude und die Reduzierung des Wärmebedarfs erzielt werden. Auch durch die Anordnung der Hauptnutzungsräume in südlicher bzw. ost- und westlicher Richtung (Wohnzimmer-/ Terrassenseite) können ebenfalls solare Gewinne erzielt und der Wärmebedarf gesenkt werden. Die dargestellten Straßenführungen in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung unterstützen eine natürliche Durchlüftung und vermeiden die Bildung von Hitzeinseln im Baugebiet. Die groß angelegten Grünflächen im Norden und in der Mitte des Baugebiets tragen zur natürlichen Versickerung von Niederschlag bei und lockern die Bebauung zum angrenzenden Baugebiet auf. Nachfolgend ist der beschriebene stdb. Entwurf dargestellt.



Abbildung 1 Stdb. Entwurf (Stand 17.05.2022)

2 Bedarfsanalyse

Ein entscheidender Hebel bei der Realisierung eines klimaneutralen Quartiers 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 und höchste Energiestandards vorauszusetzen.

Der Energiebedarf des Quartiers 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 der Stadt Salzkotten entnommen. Im Zuge der Bedarfsanalyse sind die Energieformen Wärme, Strom – inklusive Elektromobilität - und ggf. Kälte zu berücksichtigen.

2.1 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 (QH) sehr unterschiedlich ausfallen. Nur bei den KfW-Standards ist auch die bessere Hüllflächenqualität (als H'T = mittlerer Transmissionswärmeverlust) ein zusätzliches Kriterium. 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 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 AN des GEG. Neben eines veranschlagten Heizwärmebedarfs, ist der Bedarf für Trinkwarmwasser (TWW) der Heizwärme hinzuzurechnen, um den Gesamtwärmebedarf abzubilden.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Gebäudeeffizienzstandards auf den Wärmebedarf des Quartiers 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 Energiebedarfe (Wärmebedarfe) wie folgt dar:

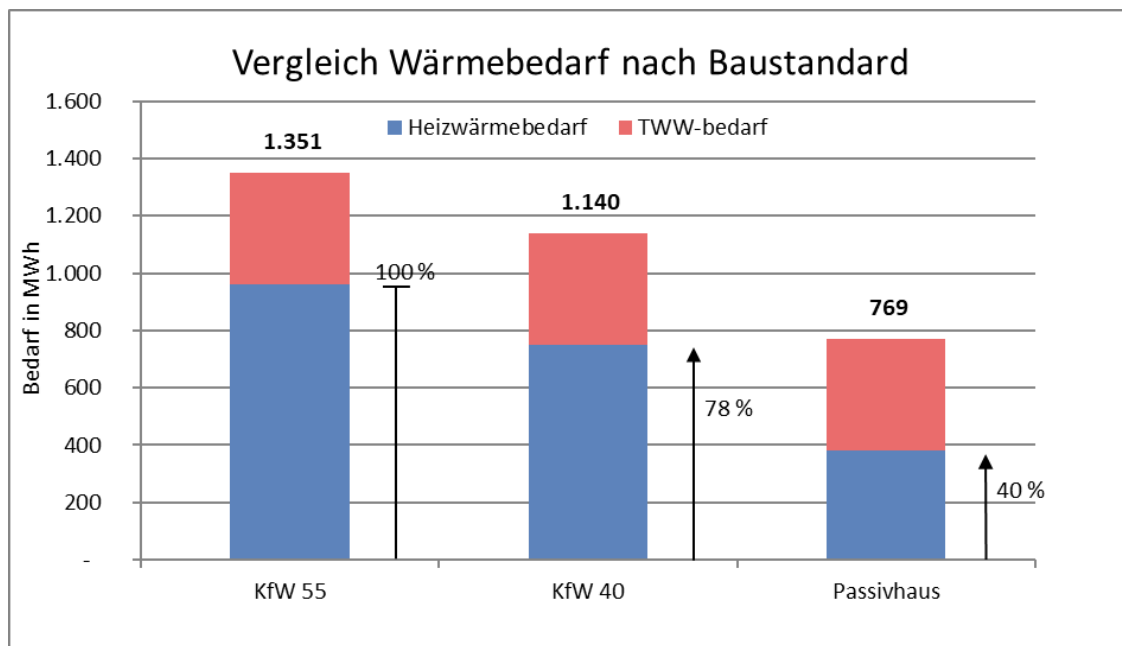


Abbildung 2 Wärmebedarf nach Gebäudestandard

Die Grafik verdeutlicht den direkten Einfluss des Gebäude- bzw. Dämmstandards auf den Heizwärmebedarf. In Folge einer verbesserten Dämmung und dem Einsatz 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 Absprache mit den Projektteilnehmenden der Stadt Salzburg, soll für weitere Berechnungen der KfW 40 Standard zugrunde gelegt werden. Der Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasserbereitung summiert sich für den gewählten Standard auf rund 1.140 MWh/a bei einer aufsummierten Wohnfläche von ca. 28.000 m². Davon entfallen ca. 390 MWh auf den Trinkwarmwasserbedarf. Die bereitzustellende Heizleistung beläuft sich auf ca. 1.040 kW, insofern eine Gleichzeitigkeit von 1 in der Trinkwarmwasserbereitung vorausgesetzt wird (der Fall bei dezentraler Versorgung). Wird eine Regelung der TWW-Bereitung ermöglicht (zeitliche Varianz im Quartier), so kann die Heizleistung im Quartier auf ca. 850 kW gesenkt werden (der Fall bei zentraler Versorgung). Im Zuge der Auswertung des stdb. Entwurfs konnten verschiedenen Gebäudetypen ermittelt werden, deren Gebäudekennwerte in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind.

Gebäudetypen	Anzahl	Wohnfläche m ²	Heizwärme kWh/a	TWW kWh/a	Wärme gesamt kWh/a	Heizlast inkl. TWW kW
EFH	71	180	4.863	2.371	7.234	6,6
EFH+Einlieger	24	180	4.863	3.557	8.420	7,7
DHH	64	145	3.838	1.778	5.616	5,1
MFH	3	547	14.385	7.113	21.498	19,6
Summe	162	28.022	750.810	388.851	1.139.661	1.038

Tabelle 1 Gebäudekennwerte Wärme (KfW 40 Standard)

Mit Verweis auf das Protokoll vom 17.05.2022 wird jedem vierten EFH eine Einliegerwohnung angerechnet, wodurch sich die Personenzahl und letztlich der TWW-Bedarf je Gebäude erhöht. Der tägliche TWW-Bedarf wurde auf ca. 40 Liter pro Person abgeschätzt. Die je Gebäudetyp zu erwartende Personenzahl wurde in Anlehnung an die durchschnittliche Wohnfläche je Einwohner bestimmt. Diese beträgt pro Kopf im Jahr 2021 ca. 47 m² (destatis, 2021). Mit Bezug auf [Tabelle 1](#) werden für ein EFH vier Personen, für ein EFH+Einlieger sechs Personen und für eine DHH drei wohnhafte Personen veranschlagt. Die Personenzahl je MFH variiert in Abhängigkeit der Wohnfläche des jeweiligen Gebäudes. Da für die MFH sechs Wohneinheiten (WE) je Gebäude eingeplant werden, beläuft sich die Größe einer Wohneinheit auf ca. 90 m² und die Gesamtwohnfläche auf ca. 550 m². Insgesamt wird für das Quartier eine Einwohnerzahl von 656 Personen kalkuliert, die sich auf insgesamt 201 Wohneinheiten verteilen. Im Quartier leben demnach durchschnittlich 3,7 Personen in einer Wohneinheit.

2.2 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. Des Weiteren wird zwischen dem Gebäudetyp Haus und dem Typ Wohnung unterschieden. Für die Bedarfsermittlung wurde für das Quartier eine mittlere Verbrauchsklasse (Klasse C) ausgewählt. Die zu erwartenden Bedarfe der Kategorie Haushaltsstrom stellen sich in Anlehnung der Daten von CO₂online wie folgt dar.

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

Tabelle 2 Strombedarf an Abhängigkeit der Personenzahl, in Anlehnung an (CO₂online, 2021)

Wie auch bei der Ermittlung des TWW-Bedarfs hat die Personenzahl in 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 Quartiersebene vergleichen ließen. Wenn gleich 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 Quartiersebenen nicht hinreichend abgebildet werden. Der Strombedarf für die Anwendungen „Licht & Kraft“ – also für Haushaltsstrom – summiert sich für die angesetzte Anzahl an Personen auf ca. 645 MWh/a.

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



Gebäudetyp	Anzahl E-Fahrzeuge [-]	Anzahl Ladepunkte [-]	Strombedarf [kWh/a]
EFH	1	1	3.038
EFH+Einlieger	2	1	6.078
DHH	1	1	3.038
MFH	6	2	18.232
Summe	201	165	610.785

Tabelle 3 Kennwerte E-Mobilität

Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass mittelfristig jede Wohneinheit ein Elektro-Fahrzeug besitzt. Wird jedem E-Fahrzeug eine durchschnittliche Fahrstrecke von ca. 42 km/Tag zugrunde gelegt (Mittelwert aus Studie „Mobilität in Deutschland“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021)) und ein spez. Energiebedarf von ca. 20 kWh/100 km hinzugerechnet, so beläuft sich der Strombedarf der E-Mobilität auf ca. 611 MWh/a. Dies ist die bereitzustellende Energie, insofern die Fahrzeuge ausschließlich im Quartier beladen werden. Werden nur drei Viertel der Ladevorgänge im Quartier getätigt und ein Viertel auswärts, im Sinne einer Beladung der Fahrzeuge außerhalb des Quartiers (Arbeitsstelle, öffentliche Ladepunkte etc.), so verringert sich der Bedarf an Ladestrom auf ca. 306 MWh/a. In Summe erhöht sich der Strombedarf demnach auf rund 1670 MWh/a bei einer vollständigen Ladung der E-Fahrzeuge im Quartier. Das nachstehende Diagramm verdeutlicht noch einmal den deutlichen Einfluss der E-Mobilität auf den Gesamtstrombedarf im Quartier.

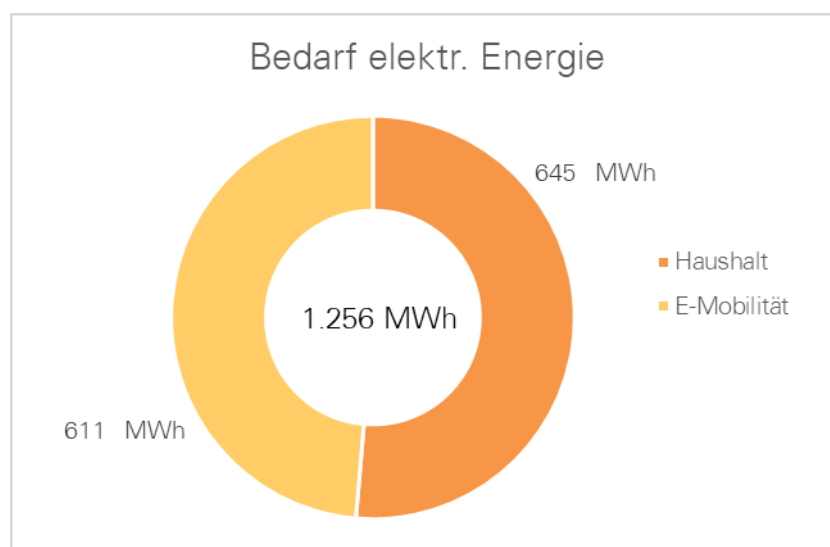


Abbildung 3 Verteilung elektrische Energie bei vollständiger Ladung im Quartier

Die benötigte Ladeleistung der E-Mobilität nimmt einen besonderen Stellenwert in der Bereitstellung von elektrischer Leistung ein. Unter der Annahme, dass jedes EFH und jede DHH mindestens einen Stellplatz aufweist und mit einem Ladepunkt ausgestattet werden kann, beläuft sich die Anzahl an Ladepunkten auf den privaten Grundstücken auf 159. Werden die Ladepunkte der MFH mit je zwei Ladepunkten pro Gebäude hinzugerechnet, erhöht sich die Anzahl auf insgesamt 165 im gesamten Quartier. Wird nun jedem Ladepunkt eine Ladeleistung von 11 kW zugeschrieben, ergibt dies eine maximale Gesamtleistung von 3.600 kW. 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.

Auf Basis einer Untersuchung des Bordersteps Instituts mit dem Titel „Elektromobilität in Stadtquartieren. Abschätzung von Flexibilitätspotentialen mit intelligenter Ladeinfrastruktur in einem Beispielquartier“ aus dem Jahr 2019 kann bei ca. 160 Ladepunkten im Quartier ein Gleichzeitigkeitsfaktor von ca. 0,23 angesetzt werden. Demnach wird die Last so verteilt, dass nur ca. 20 % der angesetzten Leistung zum gleichen Zeitpunkt benötigt wird, wodurch sich der tatsächliche Leistungsbedarf auf ca. 417 kW reduziert.

2.3 Kälte (Kühlung, Wärmeschutz)

Mit Blick auf den Energiebedarf des Quartiers soll 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. Die Notwendigkeit eines ausreichenden Schutzes 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.“¹

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.

¹ 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 Quartier, vor allem im direkt an die Fassade angrenzenden Umfeld, hat Auswirkung 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 Quartier.

Ein hoher Grünflächenanteil in der Flächennutzungszuteilung im Quartier 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), einem Verbot von Stein-Gärten oder einer Gebäudebegrünung bilden eine gute Grundlage für die Sicherstellung eines Schutzes vor sommerlicher Überhitzung.

3 Versorgungsoptionen

3.1 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, Salz 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 eine Umkehrung des Wärmepumpenprozesses stattfinden 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 dabei auch von einem Low-Ex-Netz.

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.

3.2 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
Holzackschnitzel	zentrale Versorgung	niedrige Brennstoffkosten; keine Kopplung an den Ölpreis; regionale Verfügbarkeit der Brennstoffe; niedrige CO ₂ Emissionen; Grund- und Spitzenlastfähig	aufwändige Anlagentechnik; hoher Betriebsaufwand; 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; 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
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	Temperaturniveau der Wärmeabgabe <50 °C, besser <40 °C; Je nach Dämmstandard Geräuschemissionen
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	WP je Haus zentrale Versorgung über ein kaltes Nahwärmenetz	wie geoth. WP; Nahwärmenetz ohne Isolierung; keine Netzverluste; Kühlung im Sommer möglich	Temperaturniveau der Wärmeabgabe <50 °C, besser <40 °C; flächen- & kostenintensive Quellenerschließung; geologische Eignung nicht immer gegeben
Solarthermie	zentrale/ dezentrale Versorgung	minimale CO ₂ Emissionen; gute Kombinierbarkeit mit anderen Energie Quellen; geringer Betriebsaufwand	vorwiegend für Warmwasser und zur Heizungsunterstützung
Erdgaskessel	zentrale/ dezentrale Versorgung	geringer Platzbedarf gute Kombinierbarkeit	hohe CO ₂ Emissionen fossiler Energieträger; Abhängigkeit von Energie-Importen; steigende CO ₂ Kosten

Tabelle 4 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 Flächenheizungen optimal auf das niedrige Temperaturniveau ausgelegt werden.

4 Potenzialanalyse

Eine THG-neutrale Energieversorgung ist ein wesentlicher Baustein für die Entwicklung eines nachhaltigen und klimaneutralen Wohnquartiers. 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 Solarthermieanlagen verpflichtend in die Energieversorgung des Quartiers 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 Industrie- oder Kläranlagen konnten in der Umgebung des Baugebiets identifiziert werden, wurden jedoch in Abstimmung mit dem Auftraggeber nicht weiter betrachtet. Hintergrund dafür sind die zu großen Entfernungen zu den möglichen Energiepotenzialen, die sich zum einen unverhältnismäßig auf den Wärmepreis auswirken als auch zu hohen Wärmeverlusten in der Wärmelieferung führen. Die Entfernungen zum Baugebiet betragen ca. 4 bis 6 km.
- Ausreichende Abwärmepotenziale aus Abwasserleitungen sind bedingt durch die geografische Lage des Baugebiets, welches sich am Anfang der Abwassersammlung befindet, nicht vorhanden.
- Geothermische Potenziale im Quartier oder in direkter Nachbarschaft sind vorhanden, können jedoch teils aus wasserrechtlicher Sicht nicht genutzt werden, da sich das Quartier in der Wasserschutzzone 3A befindet. Eine Installation von Erdwärmekollektoren wird aufgrund der geringen Verfügbarkeit von größeren Freiflächen nicht ermöglicht.
- Fließgewässer weisen am Standort kein ausreichendes Potenzial auf.
- Eine potenzielle Anbindung des Baugebiets an das Erdgasnetz wird lt. Stadt Salzkotten vsl. nicht erfolgen. Nach Auswertung der Planauskunft sind keine nahe gelegenen Erdgasleitungen vorhanden, die einen Bezug zukünftig von Biomethan ermöglichen könnten.
- Biogasproduzenten sind in der Umgebung vorhanden, sodass ein Potenzial ermittelt werden konnte.
- Bergbauliche Grubenwasser- oder Grubengasförderungen sind in der Region nicht vorzufinden.
- Eine Produktion von Wasserstoff wird zukünftig in der näheren Umgebung stattfinden (Gelände AVE Entsorgungszentrum Paderborn), jedoch wird der aus Überschussstrom erzeugte Wasserstoff dem Quartier nicht zur Erzeugung von Wärme/ Strom (BHKW) zur Verfügung stehen. Die zukünftige Wasserstoffproduktion soll auf die Versorgung der E-Mobilität ausgelegt werden.

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

4.1 Solare Potenziale

Auf Grundlage des städtebaulichen Entwurfes können die für eine solare Nutzung zur Verfügung stehenden Dachflächen ermittelt werden. Für die Gebäude im Baugebiet stehen die Dachtypen Sattel-, Krüppelwalm- oder Walmdach zur Verfügung. Um die solare Ertragsermittlung vereinfacht zu gestalten, wird für die Simulation allgemein der Dachtyp Satteldach zugrunde gelegt (keine Einschränkungen durch die Dachform). In der folgenden Betrachtung wird zwischen 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 Quartier „Osterfeld“ eine vollständige bilanzielle Bedarfsdeckung 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, Krüppelwalm- und Walmdach zugeordnet, sodass über den Dachfirst eine potenzielle Ausrichtung des Daches ersichtlich wird. Eine Süd-Ausrichtung stellt den optimalen Fall hinsichtlich des Ertrags einer PV-Anlage dar, da so die meiste Energie der Sonne aufgefangen und transformiert werden kann. Eine Ost-West-Ausrichtung hingegen senkt den Wirkungsgrad der Module, führt aber zeitgleich zu einem höheren Nutzungsgrad der 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. Die nachstehende Abbildung zeigt den Einfluss der Ausrichtung auf den Ertrag der PV-Anlage.

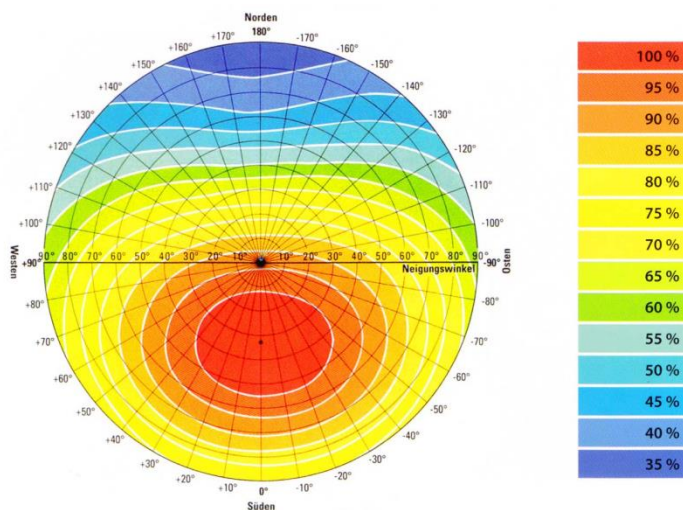


Abbildung 4 Solerer Ertrag in Abhängigkeit der Anlagenausrichtung (Quelle: Verbund AG)

Über die Simulationssoftware PV-SOL wurde für die Region Salzkotten der spezifische Ertrag einer PV-Anlage ermittelt. Dabei wurden die Module je nach Ausrichtung des Gebäudes in Süd-Richtung oder in Ost-West-Richtung ausgerichtet. Für PV-Module in Süd-Ausrichtung ergibt sich ein spezifischer Ertrag von ca. 1000 kWh/kW_p und in Ost-West-Ausrichtung von ca. 835 kWh/kW_p. Mit der Anpassung der Wohnfläche je Gebäudetyp (s. Tabelle 1) verändert sich die Kubatur des Gebäudes. Demnach sind die im stdb. Entwurf dargestellten Abmaße der Gebäude in Bezug auf die festgelegten Wohnflächen

nicht mehr korrekt, weshalb folgende Eckdaten für die solarthermische Auslegung der Dachflächen festgelegt wurden:

Gebäudetyp	BGF [m ²]	Grundfläche [m ²]	Ausrichtung [-]	Dachfläche [m ²]	PV-Fläche [m ²]
EFH Süd	239	160	Süd	92	64
EFH O/W	239	160	Ost/West	184	129
DHH Süd	386	257	Süd	148	104
DHH O/W	386	257	Ost/West	297	208
MFH Süd	728	364	Süd	185	130
MFH O/W	728	364	Ost/West	370	259

Tabelle 5 Flächenverfügbarkeit Gebäudetypen

Für die Bestimmung der Grundfläche wurden für die EFH und DHH eine Geschosszahl von 1,5 angesetzt und für die MFH eine Geschossigkeit von 2. Für die Simulation wurden die Dachneigungen für EFH und DHH auf 30° (Mittelwert aus Vorgabe 1-gesch. Gebäude 35° bis 45° und 2-gesch. Gebäude 15° bis 25°) und die der MFH auf 15° festgesetzt. Über einen Dachnutzungsgrad von 70 % ergibt sich ein plausibles und technisches umsetzbares PV-Flächenpotenzial. Die kumulierte potentiell nutzbare Dachfläche für das Baugebiet beträgt demnach rund 13.300 m² bei eine Gesamtdachfläche von 19.050 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 [kWp]	Pot. Ertrag [kWh/a]	Anteil Ertrag [-]
EFH Süd	11	11.000	36 %
EFH O/W	23	19.205	22 %
DHH Süd	9	9.000	13 %
DHH O/W	19	15.856	25 %
MFH Süd	23	39.245	2 %
MFH O/W	47	23.000	2 %
Summe	2.354	2.144.780	100 %

Tabelle 6 Gerundete PV-Kennwerte

Die Tabelle zeigt, dass die EFH den Großteil des solaren Ertrags (58 %) im Quartier generieren. Gefolgt von den DHH, die zahlenmäßig und in der Dimensionierung der Dachflächen kleiner ausfallen und dementsprechend einen geringeren solaren Ertrag erzielen.

In Summe beträgt die gesamte potenziell installierbare Leistung ca. 2.350 kWp. Unter Hinzunahme der spezifischen Erträge je kWp (kWh/kWp) ergibt sich ein bilanzielles und solares Potenzial von ca. 2.145 MWh/a. Der gemittelte spez. Ertrag je kWp installierter Leistung beläuft sich auf 911 kWh/kWp. Wird der Bedarf für Haushaltsstrom (645 MWh) und E-Mobilität (611 MWh) hinzugezogen, ergäbe sich ein bilanzieller Deckungsgrad von ca. 170 %.

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 stark von den Einstrahlungsverhältnissen der Sonne und somit von der Jahreszeit abhängig. Für die Beschreibung des Potenzials wird eine vollständige Deckung des Warmwasserbedarfs 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 führen.

Solarthermieanlagen 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 Solarthermieanlage wird aufgrund der geringen Freiflächen im stdb. Entwurf und den sich daraus ergebenden Restriktionen im öffentlichen Raum abgesehen. Demnach ist die Solarthermie (ST) 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 von ca. 60 %, bezogen auf den Warmwasseranteil, 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 Solarthermieanlagen im Quartier 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 beträgt dieser ca. 200 kWh/Monat. Über den spezifischen Wärmeertrag des VRK, der im Monat Mai/Juni die besten Ertragswerte von gut 72 kWh/m² aufweist, bestimmt sich die benötigte Fläche aus der Division von Bedarf und Ertrag. Für das Einfamilienhaus mit einem Bedarf von 200 kWh/Monat kann demnach über eine Absorberfläche von ca. 2,8 m² der Warmwasserbedarf nahezu vollständig bilanziell in den Sommermonaten gedeckt werden. Da ein ST-Modul je nach Modell eine festgesetzte Absorberfläche aufweist, wird die benötigte Anzahl an ST-Modulen über die Division von benötigter Absorberfläche und Absorberfläche des Moduls (1,51 m²/Modul) berechnet. Das Ergebnis wird ggf. auf die nächste ganze Stelle bzw. das nächste ganze Modul aufgerundet. Nachfolgende Abbildung zeigt den solaren Ertrag einer ST-Anlage mit 3 m² Absorberfläche und den TWW-Bedarf eines EFH im Jahresverlauf.

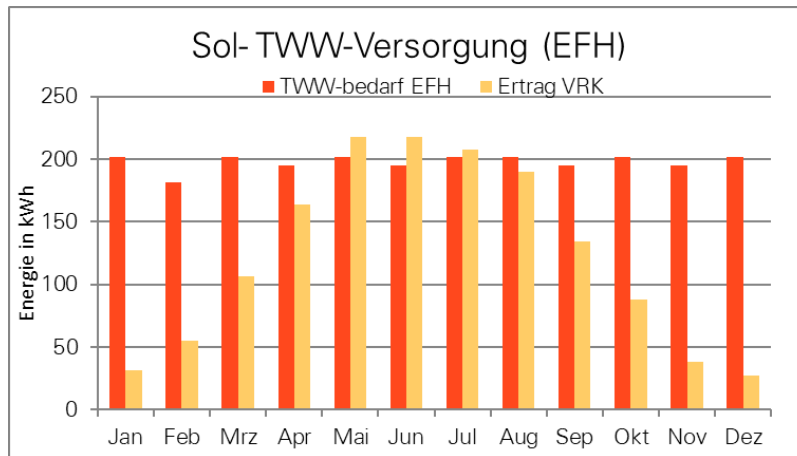


Abbildung 5 Solarer Deckungsgrad am Beispiel EFH

Die Abbildung zeigt, dass die ST v. a. in den Wintermonaten nur einen Bruchteil des Warmwasserbedarfs decken kann, jedoch die Sommermonate Mai bis August teils vollständig solarthermisch versorgt werden können. Eine Vollversorgung in den Sommermonaten ermöglicht die Abschaltung des dezentralen Wärmeerzeugers in den jeweiligen Gebäuden bzw. der zentralen Wärmeerzeuger in einer Heizzentrale, wodurch das Nahwärmenetz im Quartier ebenfalls außer Betrieb genommen werden kann. 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. 240 MWh. Dies entspricht unter Hinzunahme des TWW-Bedarfs im Quartier (390 MWh) einem Deckungsgrad von gut 60 %.

Fazit Solare Potenziale

Der städtebauliche Entwurf weist ein ausreichendes PV-Flächenpotenzial zur bilanziellen Deckung des Strombedarfs für Haushalt und E-Mobilität auf. So kann mit einem PV-Ertrag von ca. 2.145 MWh/a, der Bedarf von 1.256 MWh/a bilanziell vollständig gedeckt werden. Über eine ausreichend große Dimensionierung der Solarthermie für die Sommermonate ist in den Monaten Mai bis Juli (und teils August) eine eigenständige und unabhängige Warmwasserversorgung zu erreichen. Bilanziell beläuft sich die solare Deckung des Warmwasserbedarfs auf ca. 60 %. Eine Aufstellung der einzelnen Dachflächen inkl. der Anzahl an Modulen, Leistung und theoretischem Ertrag sind dem Anhang beigefügt.

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 Wärme solarthermisch und dahingehend CO₂-neutral zu erzeugen.

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. In der abschließenden Empfehlung des Berichts wird nochmal auf die Thematik der ST eingegangen.

4.2 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 Wärmetzug aus dem Erdreich kann auf verschiedene Arten geschehen.

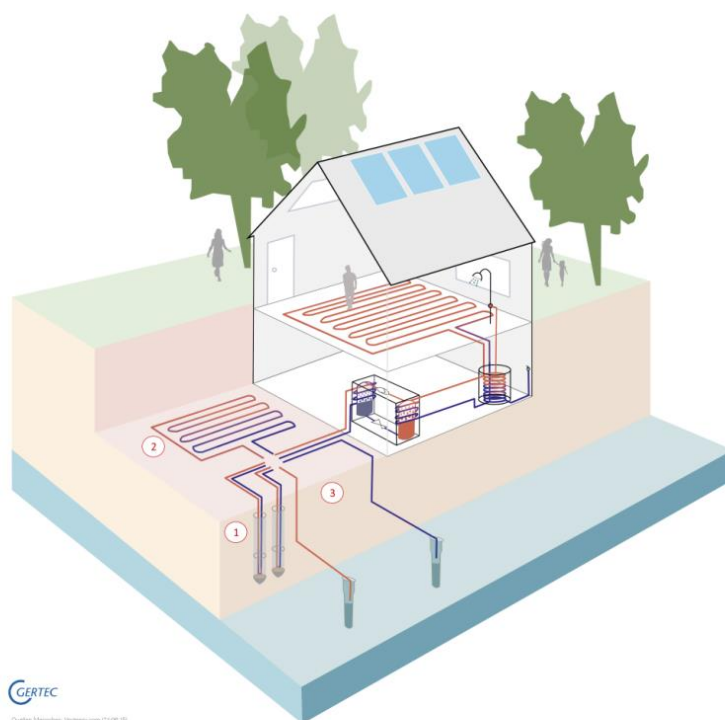


Abbildung 6 Geothermische Energiequellen

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 vollständig in der Wasserschutzzone 3A (WSZ IIIA) befindet. Demnach ergeben sich Hemmnisse und Pflichten für die Nutzung der Geothermie in diesem Bereich.

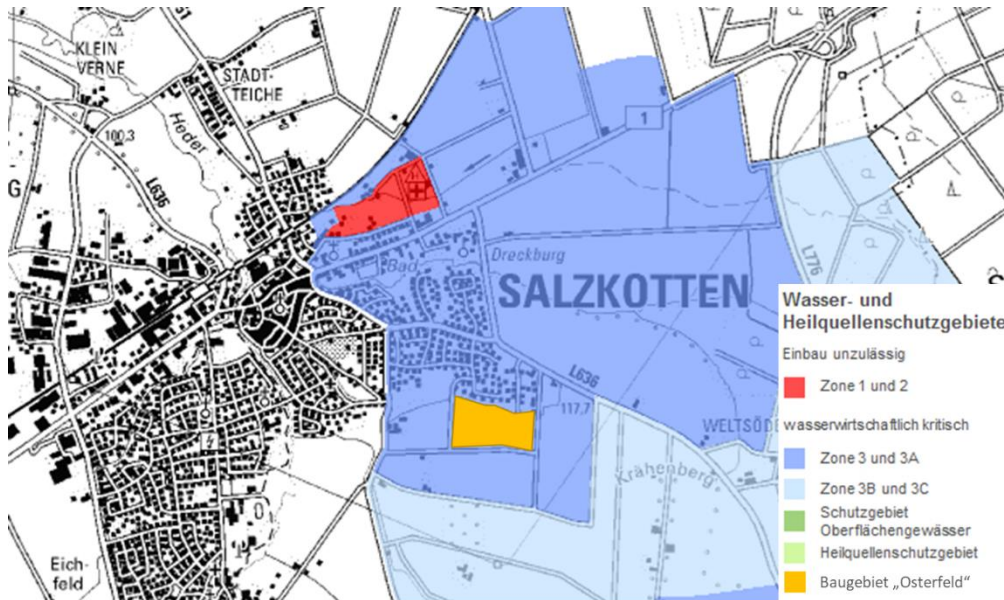


Abbildung 7 Wasser- und Heilquellenschutzgebiete in Umgebung Salzkotten

Erdsonden müssen für hohe Entzugsenergien weit in das Erdreich eingebracht werden und unterliegen geologischen, hydrogeologischen und bergrechtlichen Anforderungen. Das LANUV berichtet im Arbeitsblatt 39 von möglichen nachteiligen Auswirkungen auf das Grundwasser, die schon bei der Bohrung in das Erdreich in der Wasserschutzzone IIIA, aber auch beim Betrieb der Erdsonde durch den Eintrag wassergefährdender Stoffe oder durch Temperaturveränderungen entstehen können. Aufgrund dessen kann eine Zulassung für Erdsonden auf dem Baugebiet und auf den direkt angrenzenden Feldern nicht erteilt werden.

Da Erdwärmekollektoren (EWK) nahe der Erdoberfläche und mit Abstand zum ersten Grundwasserleiter verlegt werden, ist laut LANUV von keiner nachteiligen Auswirkung auf das Grundwasser auszugehen, insofern die Anforderungen an die Verwendung wassergefährdender Stoffe erfüllt werden. „Nach Angaben des geologischen Dienstes NRW besteht für die Installation von Erdwärmekollektoren in dieser Zone eine Anzeigepflicht“ und es „(...) kann ein erlaubnispflichtiger Tatbestand nach §3 Abs. 2 Nr.2 Wasserhaushaltsgesetz erfüllt sein (...) (Geologischer Dienst NRW 2022). Darüber hinaus benötigen EWK große Flächen, um die benötigte Energie und Leistung zur Verfügung zu stellen. Da dem Baugebiet allgemein keine großen Freiflächen zur Verfügung stehen, sowohl auf dem Baugebiet (Flächen ohne unterirdische Rigolen etc.) als auch in direkter Nachbarschaft (landwirtschaftlich genutzte Flächen), kann den EWK kein Potenzial zugeschrieben werden.

Wie auch bei den Erdsonden bestehen bei geothermischen Grundwasserbrunnen die gleichen hydrogeologischen Problematiken und Genehmigungspflichten. Durch eine potenzielle chemische Beeinträchtigung des Grundwassers in der WSZ IIIA wird auch hier eine Genehmigung nicht erteilt werden, sodass dieses Potenzial nicht in die weitere Bearbeitung einfließt.

4.3 Biogas

Bei der natürlichen Zersetzung von organischen Stoffen (Gülle, Bioabfall, Energiepflanzen...) unter Luftabschluss entsteht ein energiereiches Gasmisch, welches ohne Methanisierung als Biogas bezeichnet wird. Mit einem Energiegehalt von 5,0 bis 7,5 kWh/m³ stellt Biogas eine ernst zu nehmende Alternative ggü. Erdgas dar und wird laut dem EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) als erneuerbare Energiequelle bezeichnet. Da sich das Baugebiet in einer landwirtschaftlich geprägten Region befindet, wurde die Verfügbarkeit von regionalem Biogas geprüft.

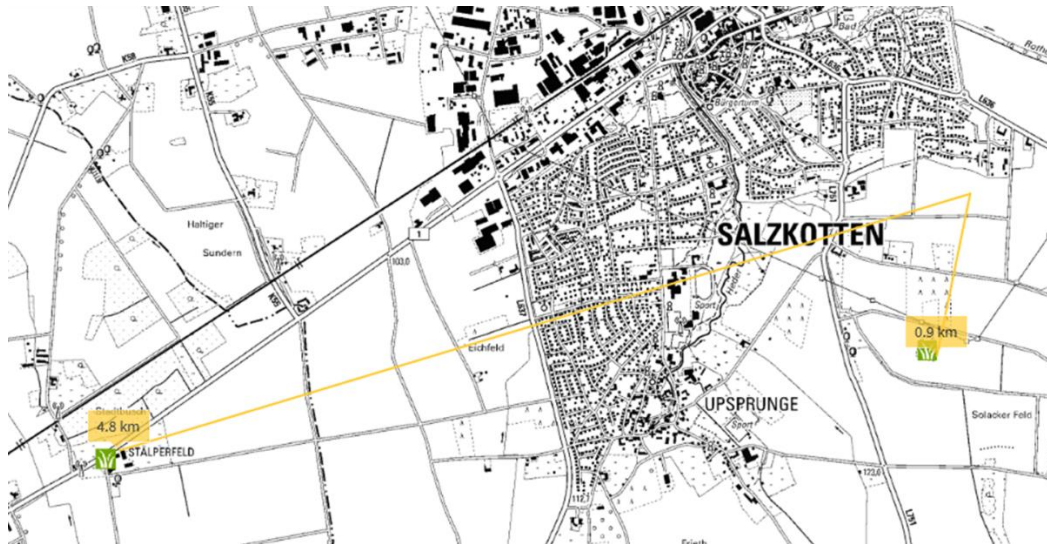


Abbildung 8 Biogasproduzenten in der Umgebung (Quelle: LANUV NRW)

Die Abbildung zeigt zwei Biogasproduzenten, die theoretisch in der näheren Umgebung Biogas produzieren und zur Strom- und/ oder Wärmeerzeugung nutzen. Nach Kontaktierung und Absprache mit dem Landwirt des südlich gelegenen Potenzials in ca. 0,9 km Entfernung können ca. 70 kW thermisch dem Baugebiet zur Verfügung gestellt werden. Eine Anbindung an das Quartier ist über eine Wärmeleitung vom Bauernhof an die im Nordosten des Quartiers gelegene Fläche für eine Heizzentrale möglich. Auch wenn die Leistung von 70 kW die Heizlast des Quartiers bei weiten unterschreitet, stellt diese eine solide und auf erneuerbaren Energien basierenden Grundlast dar, die in der weiteren Betrachtung Anwendung finden wird.

5 Bewertung und Vorauswahl

Für eine erste Bewertung werden die möglichen Versorgungsoptionen qualitativ 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 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						
Gaskessel	Erdgas	6	4	4	5	4,8
Luft-Wp	Umwelt/Strom	2	3	2	1	2,0
geoth. WP	Umwelt/Strom	1	3	2	1	-
Holzfeuerung	Pellet	2	4	4	2	3,0
Solarthermie	i.V.m.	1	4	2	1	2,0
zentrale Systeme						
BHKW+Kessel	Erdgas	5	2	4	5	4,0
BHKW+Kessel	Biomethan/-gas	3	3	2	3	2,8
Holzfeuerung	HHS	2	3	3	2	2,5
geoth. WP	low-ex	2	3	2	2	-
geoth. WP	kalte NW	1	3	2	1	-
Aspekte der Bewertung		THG-Emissionen	Investitionskosten	Aufwand zur Bedienung	Technologieoffenheit	
		Effizienz	Brennstoffkosten	Platzbedarf	Mögl. zur Anpassung	
		Transport	Preisstabilität	Transport/Belieferung	Preisstabilität	
		sonst. Emissionen	Abhängigkeiten	Aktzeptanz bei Bewohnern	Autarkiegrad	
		Erschließen	

Abbildung 9 Bewertung möglicher Versorgungsvarianten (Stand 17.05.22)

Aufgrund der dargestellten wasserrechtlichen Einschränkungen und einer darüber hinaus mangelnden Flächenverfügbarkeit im Quartier scheidet zentrale geothermische Erschließungen aus den Versorgungslösungen aus. Auch eine dezentrale geothermische Versorgung mittels Erdsonden kann angesichts der dargelegten Begründungen nicht weiter verfolgt werden. Des Weiteren ist eine dezentrale Versorgung mit einem Gaskessel vor allem mit Blick auf die klimapolitischen Ziele der Stadt Salzkotten und der Bundesregierung nicht mehr zeitgemäß. Infolgedessen ist auch eine Förderung schon zum jetzigen Zeitpunkt für den späteren Eigentümer des Hauses nicht verfügbar. Eine dezentrale Holzfeuerung ebnet einerseits einen entscheidenden Weg hin zu einer CO₂-armen Versorgung, hat aber im Gegenzug zu einer zentralen Versorgung konkrete Nachteile wie ein erhöhtes Transport- und Emissionsaufkommen im Quartier und wird im Zuge dessen nicht in den Variantenvergleich mit einfließen.

Im Variantenvergleich sollen nach Absprache mit den Projektbeteiligten die folgenden vier Wärmeversorgungsvarianten sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht miteinander

verglichen werden. Als dezentrale Versorgungsvariante soll eine athermische Versorgungslösung in Form von Luft-Wasser-Wärmepumpen in den Vergleich einfließen. Als zentrale Versorgungsmöglichkeiten werden eine Holzfeuerung mit dem Energieträger Holzpellets, eine Holzfeuerung inkl. BHKW mit dem Energieträger Biomethan und eine Holzfeuerung mit einer externen Wärmelieferung betrachtet. Eine genaue Beschreibung und Erörterung der Varianten erfolgen im nachfolgenden Kapitel.

6 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:

- REF Var.: Luft-Wasser-Wärmepumpe zur dezentralen Versorgung der einzelnen Gebäude
- Var. 1: Holzpelletfeuerung zur zentralen Versorgung über ein Hochtemperatur Nahwärmenetz (ca. 70° VL-Temperatur)
- Var. 2: Holzpelletfeuerung und Biogas BHKW in der Grundlastabdeckung.
- Var. 3: Holzpelletfeuerung und externe Wärmelieferung über Wärmeleitung

Aufgrund der aktuellen politischen Entwicklungen und der Festsetzung einer PV-Pflicht im B-Plan wird zukünftig auf jedem Dach im Baugebiet eine PV-Anlage installiert sein. Vor diesem Hintergrund ist eine Berücksichtigung der PV-Anlagen im Rahmen des Vergleichs der verschiedenen Wärmeversorgungsvarianten nicht zielführend. Einzig bei der Ausweisung der CO₂-Emissionen kann und sollte die PV-Eigenstromerzeugung Berücksichtigung finden.

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

REF Var.: Dezentrale Luft-Wasser-Wärmepumpen

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, variieren die Heizleistungen der Luft-Wasser Wärmepumpen. Nachfolgende Aufstellung soll Aufschluss über die theoretisch zu erwartenden Größen der Wärmeerzeuger geben. Dabei wurde die Heizlast der Gebäude auf die nächste ganze Zahl aufgerundet.

Gebäudetyp	Wärmepumpen-Leistung
EFH	7 kW
EFH+Einlieger	8 kW
DHH	6 kW
MFH	20 kW

Tabelle 7 Leistungen Luft-Wasser Wärmepumpen

Da eine Luft-Wasser-Wärmepumpe die Luft über einen Ventilator ansaugt und an den Wärmetauscher der Wärmepumpe weiterleitet, wird ein Split-Gerät im Außenbereich des Gebäudes oder eine Zuluftleitung ins Gebäude bzw. an den Standort des Aggregats benötigt. V.a. bei größeren MFH, die an kalten Tagen höhere Volumenströme zur Beheizung des Gebäudes benötigen, ist eine Innenaufstellung der Wärmepumpe empfehlenswert, da so eine Aufstellung der Außergeräte in der Umgebung vermieden wird. Der erforderliche Strombedarf zur Wärmeerzeugung beläuft sich auf ca. 326 MWh/a.

Var. 1: Zentrale Holzpelletfeuerung

Die erste Vergleichsvariante bildet eine zentrale Holzpelletfeuerung, die sich aus zwei in Kaskade geschalteten Feuerungsanlagen zusammensetzt. Um die verbrauchsorientierte thermische Leistung von ca. 850 kW bereitstellen zu können, wurden ein 500 kW und 350 kW Pelletkessel gewählt, wobei eine ggf. spätere Fachplanung eine genauere Größenverteilung und Dimensionierung veranschlagen kann. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen möglichen Erzeugerlastgang der beiden Holzfeuerungsanlagen.

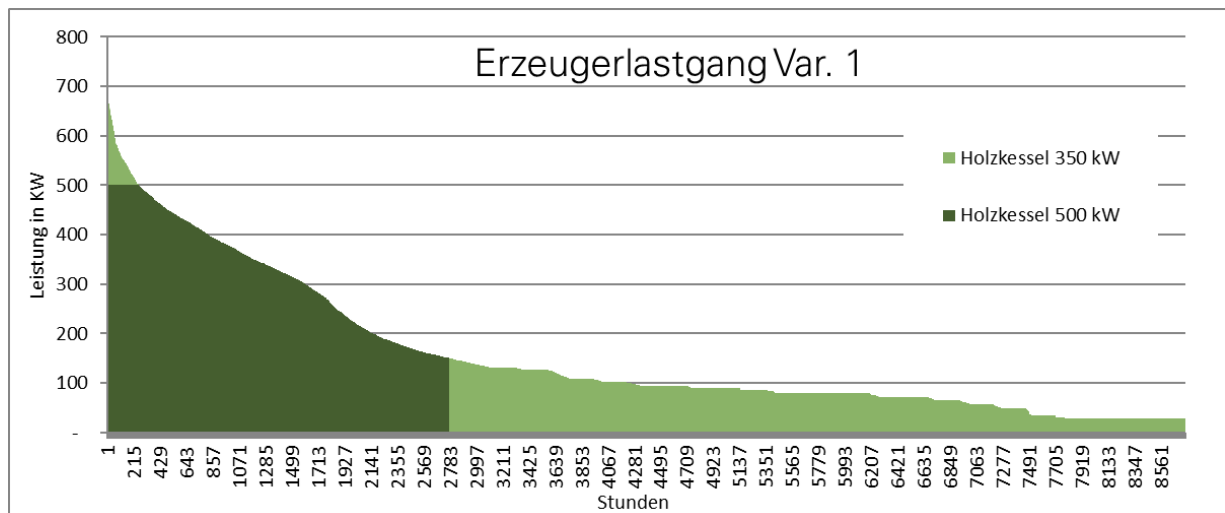


Abbildung 10 Erzeugerlastgang Holzfeuerung

Aufgrund der Möglichkeit einer Teillastfahrweise kann der 500 kW Holzessel eine große Bandbreite des Wärmebedarfs bzw. der Wärmeleistung bereitstellen. Der etwas kleiner dimensionierte Holzessel kann v. a. in Verbindung mit den Puffersystemen Schwachlasten abdecken, die besonders in den Sommermonaten auftreten.

Da der Energieträger bzw. der Brennstoff für die Holzfeuerung nicht leitungsgebunden aus einem öffentlichen Netz zu beziehen ist, wird ein Pelletlager für die Zwischenlagerung benötigt. Dieses sollte ein Lagervolumen von ca. 50 m³ aufweisen, sodass an kalten Wintertagen pro Woche nur eine einmalige Befüllung des Lagers erforderlich wird. Darüber hinaus wird für die Aufstellung der Wärmeerzeuger inkl. Pufferpeicher, die Einhausung sonstiger Anlagenteile und die Unterbringung des Lagers eine Heizzentrale (HZ) benötigt. Die veranschlagte NGF der Heizzentrale beläuft sich auf ca. 110 m². Eine mögliche Positionierung der HZ wird im stdb. Entwurf dargelegt und befindet sich demnach im Nord-Osten des Baugebiets.

Um die zentral erzeugte Wärmeenergie im Quartier zu verteilen, wird ein Wärmenetz benötigt. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, beträgt die Vorlauftemperatur eines hochtemperierten Netzes ca. 70 °C und führt in Verbindung mit der Leitungslänge zu Wärmeverlusten, die durch die Wärmeerzeuger über den Bedarf hinaus bereitzustellen sind. Der Verlust, der sich aus der Wärmeverteilung ergibt, beläuft sich auf ca. 240 MWh, was einem Anteil von ca. 18 % am Gesamtwärmebedarf ausmacht. Es wird darauf hingewiesen, dass die Dämmung der Wärmeleitung einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmeverlust nimmt. Zudem sinkt mit einem verbesserten Dämmstandard des Gebäudes die Wärmeabnahme aus dem Wärmenetz, wodurch die Wärmeverluste bedingt durch geringere Volumenströme ebenfalls zunehmen. In Abbildung 11 wurde eine mögliche Wärmeverteilung in den stdb. Entwurf eingetragen.



Abbildung 11 Wärmenetz und Anbindung Heizzentrale

Das Wärmenetz wurde in der Abbildung als eine Art Strahlennetz ausgeführt, welches sich über die Hauptverteilungen im Nordosten bis zu den äußersten Gebäuden im Nordwesten erstreckt. Über die Lage der HZ im Nordosten des Baugebiets und der direkten verkehrlichen Anbindung an die Straße Bümers Grund wird eine direkte Durchquerung von Transportfahrzeugen zur Belieferung der HZ durch Wohngebiet vermieden. Demnach können zum einen Schallemissionen wesentlich reduziert und Immissionen, die sich aus der Verbrennung von Energieträgern ergeben, weitestgehend über die Hauptwindrichtung am Standort (Süd-West/Süd-Ost) davongetragen und verringert werden. Die Anbindung an die Straße Bümers Grund ermöglicht zudem überregionale Lieferungen von Brennstoffen über die Bundesstraße 1 (B1) und Landesstraße 776 (L776).

Die kalkulierte Netzlänge beträgt ca. 2.750 m. Darin inbegriffen sind die Hauptleitungen, die Zuleitungen, welche in die einzelnen Sackgassen der Wohnbebauungen führen, und die Hausanschlussleitungen (HA), über die die Wärme an das Gebäude übergeben wird.

Var. 2: Holzfeuerung mit Biogas-BHKW

Die zweite Vergleichsvariante basiert ebenfalls auf zwei in Kaskade geschalteten Holzfeuerungsanlagen. Dadurch, dass die HZ noch durch ein BHKW ergänzt wird, verringert sich die kumulierte Leistung der Holzpelletfeuerungen auf ca. 800 kW. Das BHKW leistet ca. 70 kW thermisch und 35 kW elektrisch und deckt somit die benötigte Restleistung für das Baugebiet ab. [Abbildung 12](#) zeigt eine mögliche und geordnete Wärmeerzeugungsstruktur der drei Anlagen.

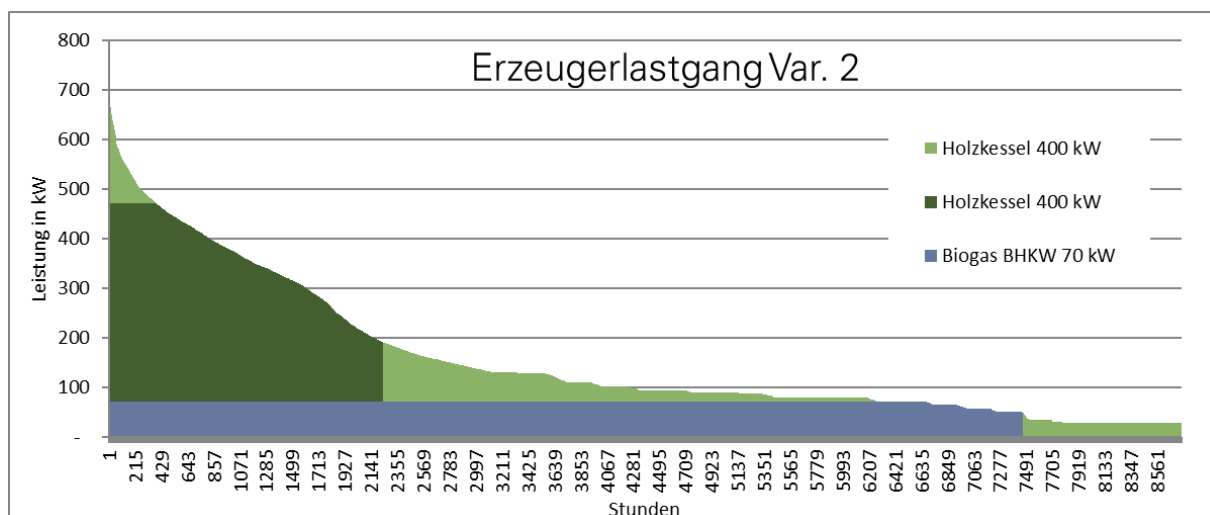


Abbildung 12 Erzeugerlastgang Holzfeuerung plus Biogas-BHKW

Die Erzeugungsstruktur weist ähnliche Merkmale zu Variante 1 auf. Die Grundlast wird hier jedoch weitestgehend über das BHKW mit 70 kW_{th} gedeckt. Das BHKW deckt zu ca. 37 % den Wärmebedarf des Quartiers und erzeugt in Abhängigkeit davon ca. 250 MWh Strom. Der Brennstoff für das BHKW kann vom ca. 950 m (Luftlinie) südlich gelegenen landwirtschaftlichen Betrieb über eine Gasleitung bezogen werden. Der Inhaber des Betriebs, Herr Göke, hat sich potenziell für eine Biogaslieferung mit einer Leistung von ca. 70 kW bereit erklärt.

Die Heizzentrale im Nordosten des Baugebiets fällt durch Hinzunahme des BHKWs flächenmäßig etwas größer aus. Demnach werden für die Aufstellung ca. 20 m² hinzugerechnet, sodass sich die NGF der HZ auf ca. 130 m² erhöht. Das Pelletlager für die zwei 400 kW Holzessel bleibt mit ca. 50 m³ ähnlich groß dimensioniert.

Die zu erwartenden Wärmeverluste der Variante 2 liegen auf dem gleichen Niveau wie von Variante 1 und belaufen sich auf ca. 18 % des Gesamtwärmebedarfs. Im Baugebiet selbst treten infrastrukturell (Wärmenetz, Anbindung HZ) keine Veränderungen auf. Zur leitungsgebundenen Biogaslieferung ist jedoch noch die Trasse vom Landwirt bis zum Baugebiet bzw. der HZ infrastrukturell und finanziell zu berücksichtigen. Die erforderliche Leitungslänge wird auf ca. 1.300 m bemessen. Auf die Anbindung der externen Versorgung wird in Variante 3 genauer eingegangen.

Var. 3: Holzfeuerung mit Wärmelieferung

Die dritte und letzte Variante zeichnet sich wie auch Variante 2 durch zwei ähnlich groß dimensionierte Holzfeuerungen aus. Abweichend von Variante 2 ist die Bereitstellung der Grundlast. Diese wird nun nicht durch ein BHKW, welches in der quartierseigenen HZ steht, erzeugt sondern von einem BHKW auf dem landwirtschaftlichen Hof (Herr Göke). Die theoretische Erzeugungsstruktur stellt sich wie folgt dar:

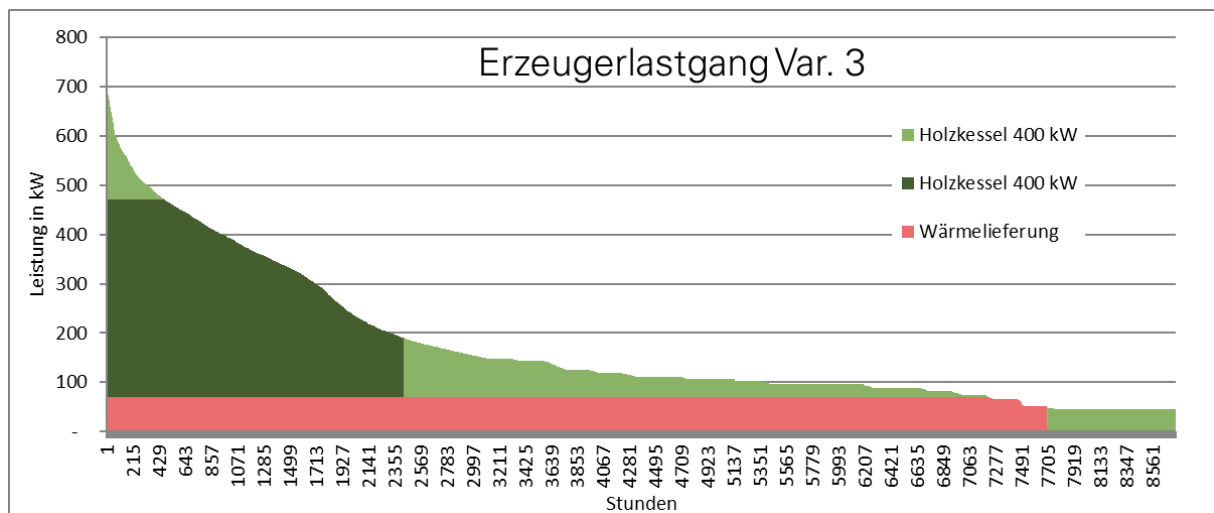


Abbildung 13 Erzeugerlastgang Holzfeuerung plus Wärmelieferung

In Variante 3 wird die 800 kW Holzfeuerung durch eine 70 kW Wärmelieferung vom landwirtschaftlichen Betrieb unterstützt. Mit Blick auf die Anlagenkonfiguration entfällt im Vergleich zu Variante 2 das BHKW im Quartier, sodass die Größe der HZ ähnlich groß wie in Variante 1 ausfällt. Das Pelletlager für die Holzfeuerungen wird auch hier auf ca. 50 m³ kalkuliert. Die Länge der Wärmeleitung vom Landwirt in die HZ des Quartiers bemisst sich auch hier auf ca. 1.300 m. Es ist jedoch zu beachten, dass es ggü. einer Biogasleitung einen Vor- und Rücklauf gibt und sich dadurch auch dementsprechende Wärmeverluste einstellen. Diese werden auf ca. 26 % inkl. der Netzverluste im Quartier am Gesamtwärmebedarf berechnet. Die bereitzustellende Wärmeenergie für das gesamte Baugebiet erhöht sich demnach auf ca. 1.500 MWh. Die höheren Wärmeverluste werden durch eine höhere Volllaststundenzahl und Brennstoffbedarf der Holzfeuerungen ausgeglichen. Der höhere Bedarf zeigt sich in der Abbildung in Form einer bauchigeren Kurve und einer höheren Grundlast. Die nachgelagerte [Abbildung 14](#) zeigt schematisch eine Biogas-/bzw. Wärmeleitung vom landwirtschaftlichen Betrieb Göke ins Quartier.

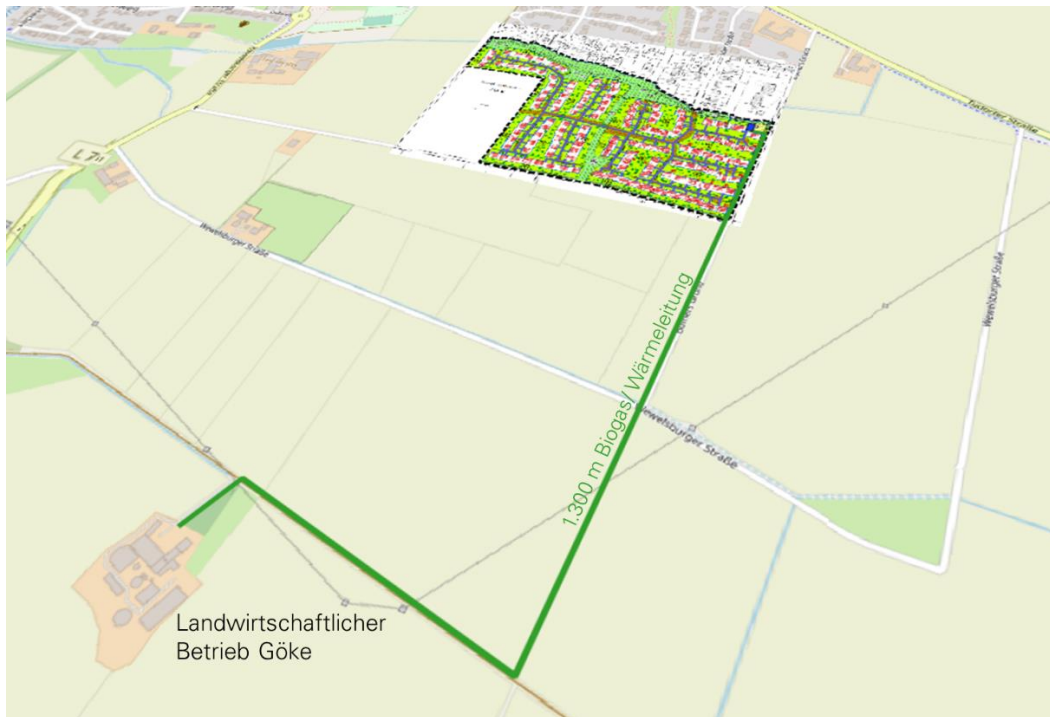


Abbildung 14 Biogas- bzw. Wärmeleitung ins Quartier

7 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.

7.1 Rahmenparameter

Für den ökologischen Vergleich wurden den Berechnungen verschiedene Kennwerte zugrunde gelegt. Für eine Darstellung der ökologischen Auswirkungen nach dem derzeitigen Stand 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) stellen sich wie folgt dar:

Energieträger	CO ₂ -Äquivalenzfaktor (CO ₂ e)	Primärenergiefaktor (PEF)
Strom	560 gCO ₂ e/kWh	1,80
Stromverdrängung KWK	860 gCO ₂ e/kWh	2,80
Holzpellet	20 gCO ₂ e/kWh	0,20
Rohbiogas	75 gCO ₂ e/kWh	0,30

Tabelle 8 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 von den unterschiedlichen Treibhausgasen, 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.

Da insbesondere der deutsche Strommix in naher Zukunft erheblichen Transformationen unterliegt und dies v. a. bei stromintensiven Versorgungsmöglichkeiten einen bedeutenden Einfluss auf die ökologische Bewertung nimmt, werden die Berechnungen mit den prognostizierten Emissionsfaktoren zum Jahr 2030 erweitert. Grundlage der spez. Emissionsfaktoren bildet eine Kurzstudie des IINAS (Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH) mit dem Titel „Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2020 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050“. In der Kurzstudie werden die prognostizierten Emissionsfaktoren aus den Studien der dena und prognos und des NECP (Nationaler Energie- und Klimaplan) der Bundesregierung zusammengefasst. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Emissionsfaktoren und PEF für den Strombezug für das Zielszenario 2030.

Quelle	CO ₂ -Äquivalenzfaktor (CO ₂ e)	Primärenergiefaktor
dena	121 gCO ₂ e/kWh	0,48
prognos	138 gCO ₂ e /kWh	0,53
NECP Deutschland	260 gCO ₂ e /kWh	0,78

Tabelle 9 Prognostizierte Emissionsfaktoren nach der Studie dena, prognos und nach dem NECP

Zur Abbildung der zu erwartenden Emissionen im Jahr 2030 werden die Kennwerte des NECP der Bundesregierung verwendet, da diese einen konservativen Weg zur Erreichung der Klimaschutzvorgaben (Einhaltung des Pariser Abkommens, Begrenzung der Erderwärmung um 2°C) abbilden und nicht den Best Case eines zukünftigen deutschen Strommixes. Auch im Hinblick auf die aktuelle Debatte einer Verlängerung der Kohleverstromung in Deutschland und dem Einsatz von Kohle als Gasersatz wird der Kennwert des NECP als plausibel angesehen. Für die Stromverdrängung durch BHKWs werden keine Kennwerte angegeben. Wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 nur noch Strom aus einem hocheffizienten Erdgaskraftwerk (Wirkungsgrad ~ 59 %) verdrängt werden kann, kann ein Emissionsfaktor von 409 gCO_{2e}/kWh und ein PEF von ca. 1,9 angenommen werden.

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 %

Verbrauchskosten:

- Biogas 9,00 ct/kWh
- Wärmelieferung Landwirt Göke 12,45 ct/kWh
- Pelletpreis: 7,83 ct/kWh
- Strompreis: 25,00 ct/kWh
- Strompreis Wärmepumpentarif: 21,50 ct/kWh

Erlöse:

- EEG-Vergütung Biomethan ab 2026 12,28 ct/kWh

7.2 Vergleich Energie- und Umweltbilanz

Der Energie- und Umweltbilanz können unterschiedliche Bilanzierungsarten zugrunde gelegt werden. Im Zuge der Ausarbeitung des Variantenvergleichs werden drei Bilanzierungsmethoden angewendet. So findet beginnend eine ökologische Bilanzierung nach den aktuellen Emissionskennwerten des GEG 2020 statt, bei der die in [Tabelle 8](#) abgebildeten Kennwerte in die Berechnung einfließen. Des Weiteren wird der im Quartier erzeugte PV-Strom auf die Emissionen der Wärmeherzeugung gutgeschrieben bzw. in Abzug gebracht. Die Berechnungsweise folgt hier der Regelung nach §23 Absatz 3 des GEG, bei der der monatliche und nach der DIN 18599-9 berechnete Stromertrag der Photovoltaik dem tatsächlichen monatlichen Strombedarf, der bei der Wärmeherzeugung benötigt wird, gegenübergestellt wird. Diese Berechnungsart dient in der Regel einer ökologischen Verbesserung der dezentralen Wärmeversorgung eines nach KfW 40 zu fördernden Gebäudes, um z. B. den KfW 40 EE (Erneuerbare Energien) Standard zu erreichen und demnach Fördermittel beantragen zu können. Da jedoch die Versorgungsvarianten 1, 2 und 3 keinen wärmeseitigen Stromverbrauch im Gebäude vorsehen (weil lediglich Strom außerhalb des Gebäudes für die Umwälzung des Nahwärmenetzes benötigt wird), werden diese ggü. der

dezentralen Variante benachteiligt. Um nun eine Vergleichbarkeit zwischen den Varianten herzustellen, wird der wärmebedingte Stromverbrauch nicht auf die Bezugsgröße „Gebäude“, sondern auf die Bezugsgröße „Quartier“ erweitert. Demnach wird der gesamte für die Wärmebereitung anfallende Strom (für Wärmepumpe, Hilfsstrom etc.) der Varianten in die Berechnung einfließen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass der in Varianten 1, 2 und 3 in Abzug gebrachte PV-Strom nach dieser Berechnungsweise zu keinem Erreichen des KfW 40 EE Standards führt. Die dritte Bilanzierungsart betrachtet eine zeitliche Variable in der Entwicklung der CO₂-Emissionen des Bezugsstroms. Dazu wird der Emissionsfaktor des Strombezugs nach GEG gegen den prognostizierten Emissionsfaktor des NECP im Jahr 2030 ersetzt (s. [Tabelle 9](#)).

Im Folgenden werden die verschiedenen ökologischen Kennwerte nach den drei genannten Berechnungsmethoden vorgestellt.

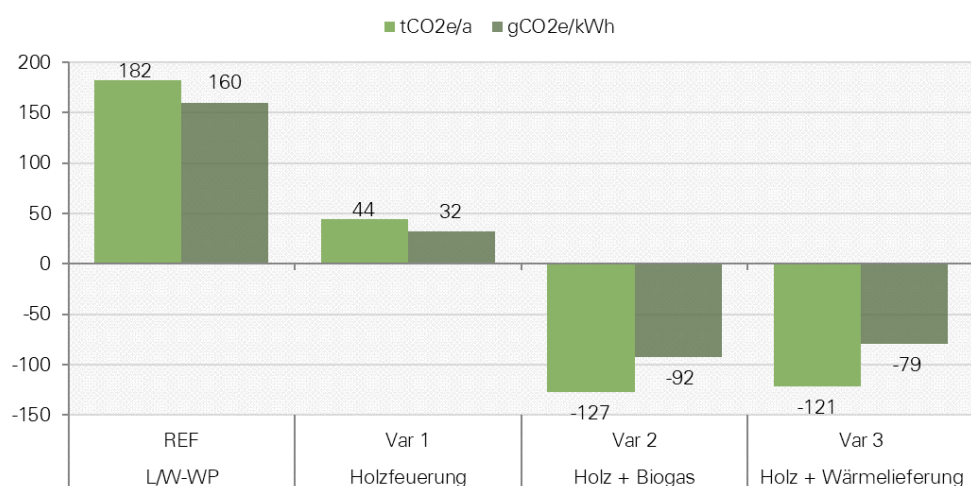


Abbildung 15 Absolute und spez. Emissionen nach GEG 2020

Mit Blick auf die CO₂e-Kennwerte schneidet nach aktueller Berechnungsweise gem. GEG 2020 die Variante 2 am besten ab. Der niedrige Emissionsfaktor von 20 gCO₂e/kWh für die Verbrennung von Holz plus die Gutschrift des erzeugten KWK Stroms durch das BHKW führt zu den niedrigen bzw. negativen Emissionen in der Wärmeerzeugung von ca. -92 gCO₂e/kWh bzw. -127 tCO₂e/a. Variante 3 schneidet ggü. Variante 2 leicht schlechter ab, da zur Kompensation der Netzverluste die Wärmeerzeugung und demnach der Brennstoffeinsatz höher ausfällt. Die höchsten zu erwartenden Emissionen weist die Referenzvariante aufgrund des hohen Emissionsfaktors von 560 gCO₂e/kWh im Strombezug auf.

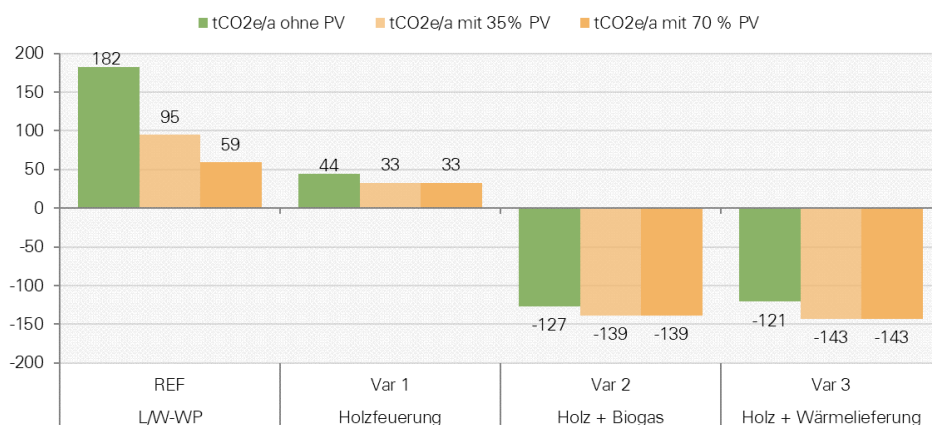


Abbildung 16 Absolute Emissionen bei PV-Stromanrechnung

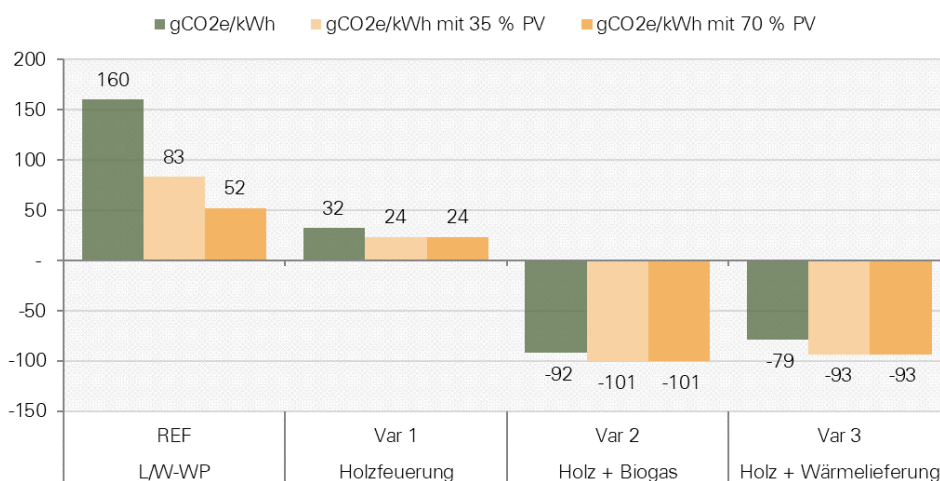


Abbildung 17 Spez. Emissionen bei PV-Stromanrechnung

Bei der Anrechnung von PV-Strom gemäß GEG ist der anrechenbare Anteil des erzeugten PV Stroms vom Strombedarf im Gebäude bzw. – hier verallgemeinert dargestellt – im Quartier abhängig. Bei einer 35%igen und 70%igen Belegung der Dachflächen können folgende PV-Erträge in Abzug gebracht werden.

PV-Fläche	REF	Var. 1	Var. 2	Var. 3
35%ige Belegung	156 MWh	21 MWh	21 MWh	38 MWh
70%ige Belegung	219 MWh	21 MWh	21 MWh	38 MWh

Tabelle 10 Nach GEG-Berechnung anrechenbare Energieströme der PV-Strom Erzeugung

Die Tabelle zeigt, dass je größer der Strombedarf im Gebäude bzw. Quartier ist, desto höher fällt der anrechenbare PV-Strom aus. In den Varianten 1 bis 3 stagniert somit der anrechenbare PV-Strom, da der wärmeseitige Strombedarf zu gering ist. Dies spiegelt sich auch in den CO₂e-Kennwerten in Abbildung 16 und Abbildung 17 wider. In allen Varianten führt der angerechnete PV-Strom zu verbesserten Emissionskennwerten. Die Referenzvariante verbessert sich hierbei am stärksten, sodass die absoluten Emissionen auf ein Minimum von 59 tCO₂e/a absinken. Die Varianten 1 bis 3 weisen nur geringfügig verbesserte CO₂-Äquivalente auf. Am besten schneidet hier die Variante 3 mit absoluten



Emissionen von -143 tCO₂e/a ab, da ggü. der Variante 2 der anrechenbare PV-Strom höher ist und zu einer stärkeren Kompensation führt.

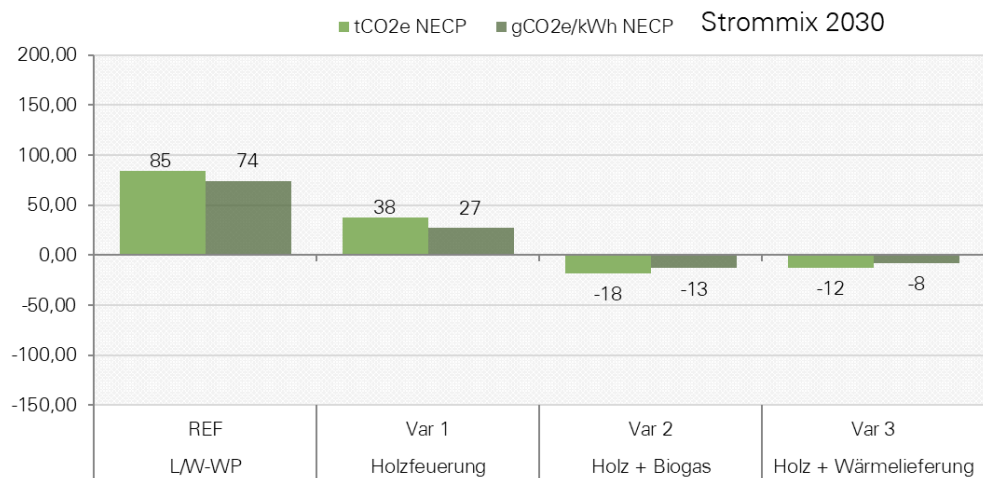


Abbildung 18 Absolute und spez. Emissionen nach Strommix 2030

Bei einem verbesserten deutschen Strommix, der nach dem nationalen Energie- und Klimaplan der Bundesregierung spez. Emissionen von ca. 260 gCO₂e/kWh im Strombezug vorsieht, führt dies zu verringerten absoluten und spez. Emissionen bei der Referenzvariante und der Variante 1. Die Emissionen der Referenzvariante verringern sich dabei um mehr als die Hälfte, da der Strom in dieser Variante der Hauptenergieträger ist. Die BHKW-basierten Varianten 2 und 3 verschlechtern sich gegenüber der Berechnung nach GEG (s. Abbildung 15). Dies liegt vorrangig daran, dass der prognostizierte Emissionsfaktor für den KWK-Verdrängungsstrom nur noch halb so groß ist (409 anstatt 860 gCO₂e/kWh). Die Variante 2 weist nach dieser Bilanzierungsmethode die ökologischsten Kennwerte auf.

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.

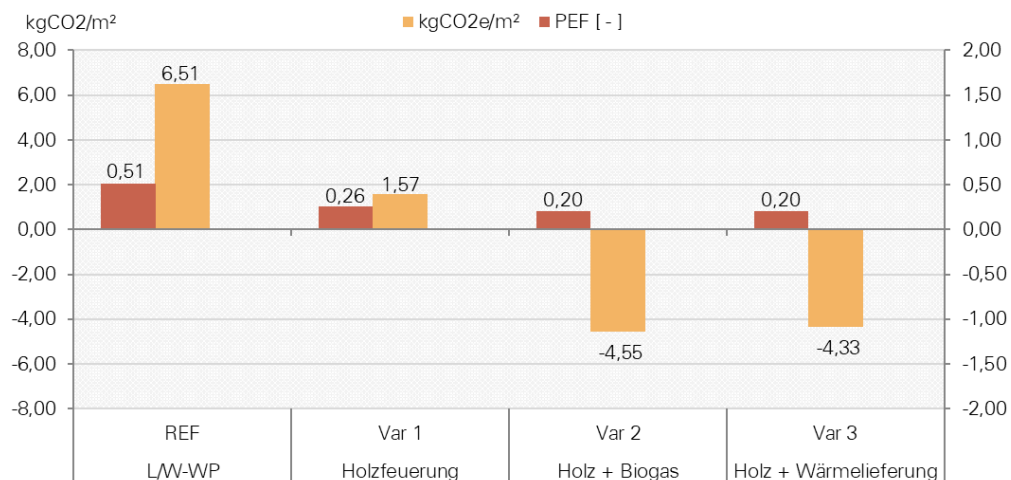


Abbildung 19 Flächenspezifische Emissionen und Primärenergiefaktor

Werden die wärmeseitigen Emissionen nun auf die ermittelte Wohnfläche von ca. 28.000 m² bezogen, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie [Abbildung 15](#). Die höchsten flächenspezifischen Emissionen stellt die Referenzvariante mit 6,51 kgCO₂e/m² und die geringsten Emissionen die Variante 2 (Holzfeuerung plus BHKW) mit -4,55 kgCO₂e/m², da auch hier KWK-Strom verdrängt wird und dies zu negativen Emissionen führt. Der geringste nach GEG zu erreichende PEF in Wärmenetzen liegt bei 0,2 und wird aufgrund der KWK Stromverdrängung bei den Varianten 2 und 3 erreicht. Der PEF der Holzfeuerung liegt mit 0,26 nur geringfügig darüber.

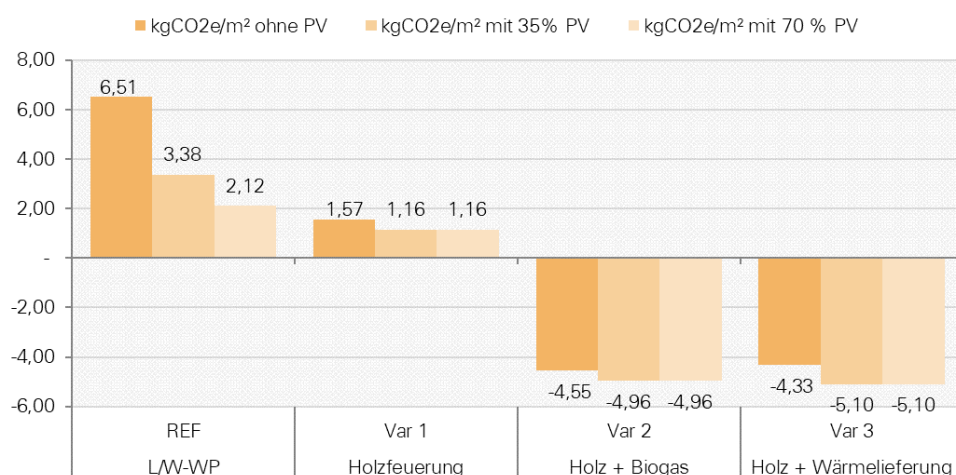


Abbildung 20 Flächenspezifische Emissionen bei PV-Strom Anrechnung

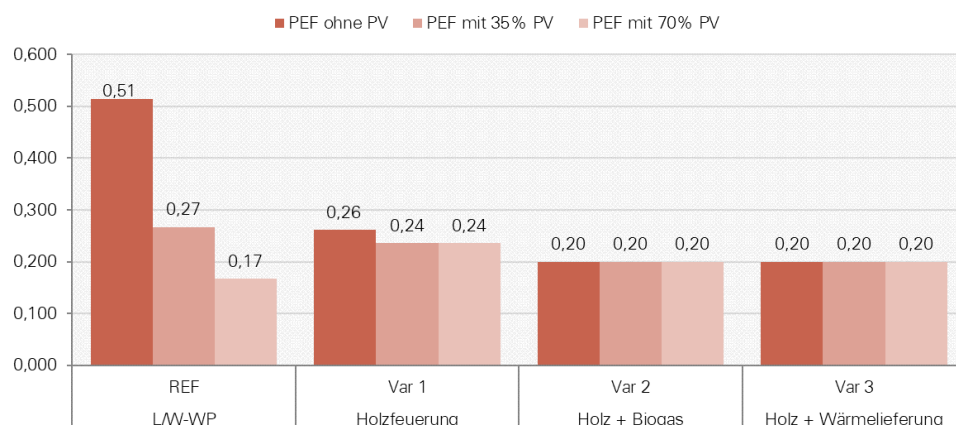


Abbildung 21 Primärenergiefaktoren bei PV-Strom Anrechnung

Wird bei dem flächenspezifischen Emissionskennwert auch hier der nach GEG anrechenbare PV-Strom in Abzug gebracht, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie in [Abbildung 16](#). Die spez. Emissionen der Referenzvariante verringern sich am stärksten, wobei in den übrigen Varianten mit geringerer PV-Strom Anrechnung die Emissionen marginal kleiner werden. Mit Blick auf den PEF kann in der Referenzvariante der kleinste PEF bei 70 % PV-Fläche erreicht werden, da bei einer dezentralen Versorgung keine Kappung des PEF vorhanden ist. Die PEF der Varianten 2 und 3 können sich durch eine PV-Stromanrechnung nicht weiter verbessern.

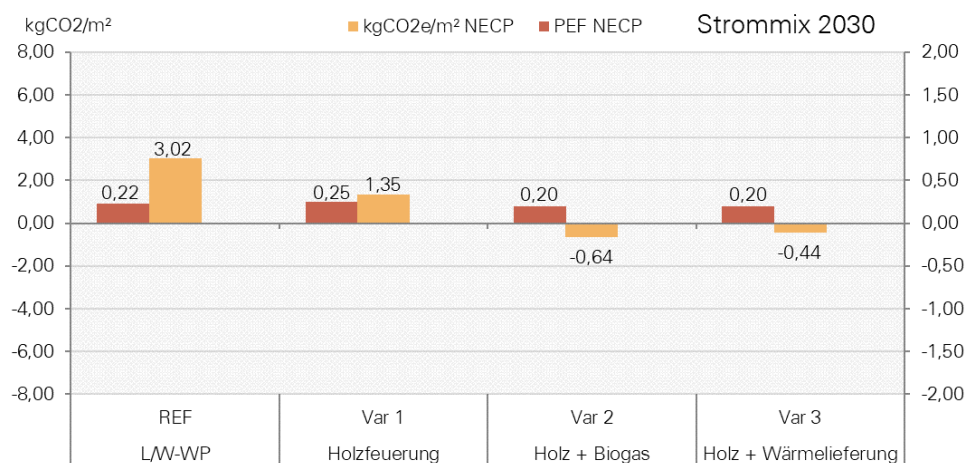


Abbildung 22 Flächenspezifische Emissionen und Primärenergiefaktor bei Strommix 2030

Verringerte Emissionen im Strombezug führen bei den Varianten mit einem hohen Anteil von Strom in der Wärmeerzeugung und Verteilung zu geringeren spez. Emissionen je Wohnfläche. Die Emissionen der Referenzvariante und der Variante 1 werden geringer, wohingegen die spez. Emissionen der Variante 2 und 3 weniger stark im negativen Bereich sind aufgrund des kleineren KWK-Verdrängungsstromfaktors. Mit Blick auf das Jahr 2030 kann die Referenzvariante mit 0,22 eine besseren PEF als die Holzfeuerung erreichen.

7.3 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Im Wirtschaftlichkeitsvergleich werden folgende Bestandteile der Vollkosten unterschieden:

- Kapitalkosten: Kosten für die Anlagentechnik, Nahwärmenetz, Hausanschlüsse, Förderung etc.
- Betriebskosten: Kosten für Wartung, Instandhaltung und Bedienung.
- Verbrauchskosten: Kosten des Endenergiebedarfs für Biogas, Wärmelieferung, Strom, Wärmepumpenstrom und Holzpellets sowie Erlöse nach EEG.

Der Vergleich der Kosten erfolgt durch Berechnung von Annuitäten. Die Annuitäten werden dann auf die in den Gebäuden verbrauchte Nutzenergie in €/MWh bzw. €/MWh./Förderung bezogen, um eine Vergleichbarkeit aller Varianten zu ermöglichen. Zusätzlich wird ein flächenbezogener Kennwert in €/m²*Monat ohne und mit Förderung abgebildet. Die Förderung erfolgt nach der BEW (Bundesförderung für effiziente Wärmenetze), welche noch in diesem Jahr von der EU-Kommission genehmigt werden soll. Die Förderung nach BEW sieht eine 40%ige Bezuschussung der förderfähigen Investitionskosten vor. Dazu gehören bspw. Infrastrukturmaßnahmen, wie das Wärmenetze und Übergabestationen, Umfeldmaßnahmen und Maßnahmen in der Wärmeerzeugung. Im dargestellten Wärmepreis ist die Umsatzsteuer nicht enthalten, wohingegen in den Kosten je m² und Monat die Umsatzsteuer enthalten ist, um die Belastung an den Endkunden abzubilden.

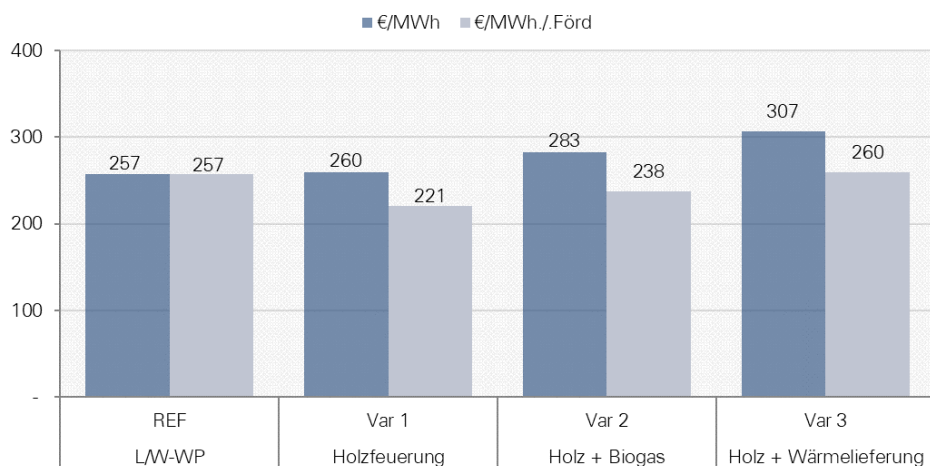


Abbildung 23 Wärmepreis ohne und mit Förderung nach zukünftigen BEW

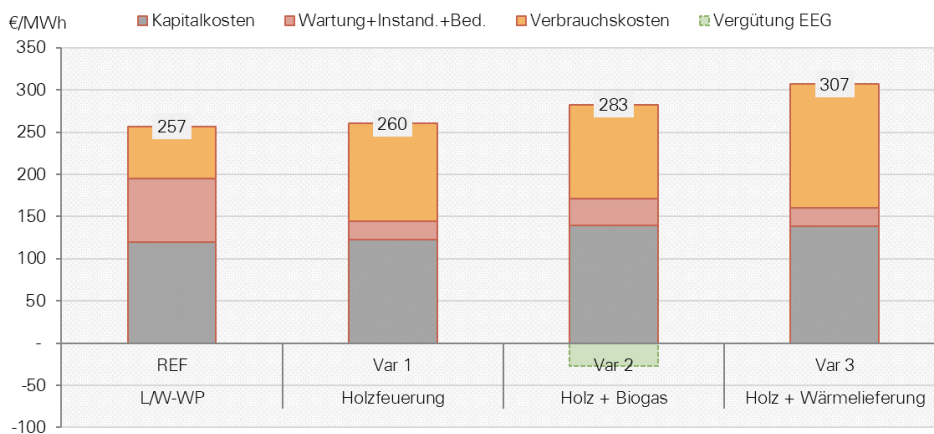


Abbildung 24 Kapital-, Betriebs- und Verbrauchskosten ohne Förderung

Da gemäß BEW nur Maßnahmen, die in Verbindung mit Wärmenetzen stehen, gefördert werden, entfällt bei der dezentralen Versorgungsvarianten REF die Förderung nach BEW. Der Wärmepreis der Referenzvariante in Höhe von 257 €/MWh setzt sich knapp zur Hälfte aus Kapitalkosten und zu ca. je einem Viertel aus Betriebs- und Verbrauchskosten zusammen. Die Verbrauchskosten der Wärmepumpen sind insbesondere vom Stromeinsatz und demnach vom Nutzerverhalten (Vorlauftemperatur) und dem COP, also der Effizienz der Wärmepumpe, abhängig. Die Variante 3 verzeichnet ohne und mit Förderung den höchsten Wärmepreis, was grundsätzlich auf den höheren Energieeinsatz in der Kompensation der Wärmeverluste und den Wärmepreis für die Wärmelieferung vom Landwirt zurückzuführen ist. Wird eine Förderung nach BEW angesetzt so liegt der Wärmepreis von Variante 3 mit dem Wärmepreis der Referenzvariante nahezu gleichauf. Variante 1 und 2 können die Referenzvariante sogar unterbieten.

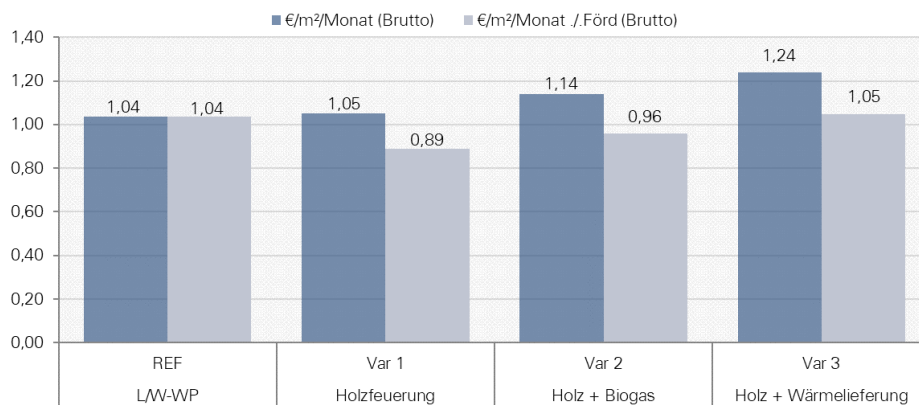


Abbildung 25 Flächenspezifischer Wärmepreis

Mit Blick auf den Wärmepreis (Brutto), der sich in [Abbildung 25](#) auf die Wohnfläche und pro Monat bezieht, liegt die Variante 3 inkl. Förderung gleichauf mit der Referenzvariante. Den günstigsten spez. Wärmepreis (Brutto) weist die Holzfeuerung inkl. der Förderung nach BEW auf. Dort liegen die Kosten bei 0,89 €/m² und Monat.

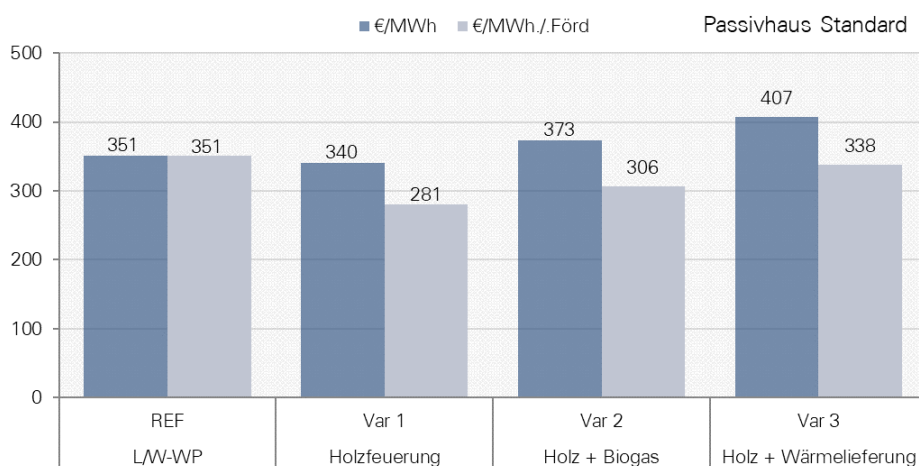


Abbildung 26 Wärmepreis ohne u. mit Förderung nach zukünftigen BEW bei Passivhausstandard

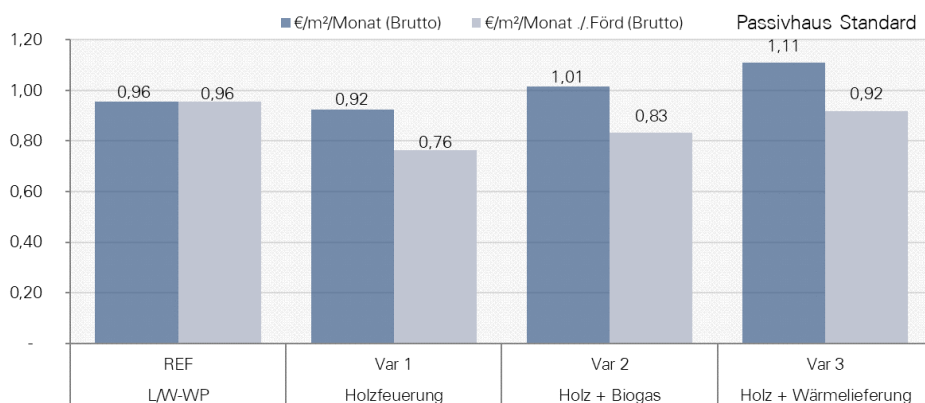


Abbildung 27 Flächenspezifischer Wärmepreis bei Passivhaus Standard

Insofern ein Grundstückskäufer über den festgesetzten Gebäudestandard KfW 40 hinaus sein Gebäude errichten möchte, so wirkt sich ein verringerter Wärmebedarf auf den Wärmepreis der unterschiedlichen Versorgungsvarianten aus. In [Abbildung 26](#) und [Abbildung 27](#) sind die ökonomischen Ergebnisse für eine Dämmung des Gebäudes nach dem Passivhausstandard dargestellt. Durch den verringerten Wärmebedarf sinken die verbrauchsgebundenen Kosten in der Wärmeerzeugung. Dadurch, dass die Anlagengröße zur Bereitstellung einer gewissen Leistung für Heizzwecke und der Trinkwarmwassererzeugung nicht sinkt, bleiben die Investitionskosten unverändert. Die verringerte Wärmeabnahme führt dazu, dass der spez. Wärmepreis auf bis zu 407 €/MWh (Var. 3) ansteigt. Wird eine Förderung nach BEW herangezogen, sind die Varianten 1 bis 3 günstiger als die Referenzvariante mit 351 €/MWh. Mit Blick auf die Belastung für den Endkunden ergibt sich ein gegensätzliches Bild. Der spez. Wärmepreis beim Bau nach Passivhausstandard liegt bei allen Varianten unter dem Wärmepreis nach dem Bau nach KfW 40 Standard. Durch die verringerten Energiekosten sinken die Gesamtkosten der Varianten und die Bezugsgröße, die Wohnfläche bleibt beim Passivhausstandard und KfW 40 Standard gleich. Den günstigsten flächenspezifischen Wärmepreis weist Variante 1 mit 0,92 €/m² und Monat ohne Förderung und 0,76 €/m² und Monat mit Förderung auf.

7.4 Empfehlung

Für das Neubaugebiet „Osterfeld“ in Salzkotten standen nach der Ermittlung von Potenzialen in der Umgebung und auf dem Baugebiet mehrere Versorgungslösungen zur Verfügung. Infolgedessen wurden eine dezentrale Wärmepumpentechnologie und drei zentrale Versorgungsmöglichkeiten mit dem Schwerpunkt Holzfeuerung genauer untersucht, da eine geothermische Nutzung am Standort und zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht möglich ist (Wasserschutzzone). Der Vergleich der ökonomischen Ergebnisse der vier Varianten hat ergeben, dass die Referenzvariante den geringsten Wärmepreis stellt. Dies liegt vorrangig an den vergleichsweise niedrigen Investitionskosten in die Anlagentechnik. Die Variante 3 schneidet mit dem höchsten Wärmepreis ab, da hier, neben den Wärmeerzeugern, eine Investition in die Wärmeleitung vom Landwirt bis zum Baugebiet zu tätigen ist. Angesichts der hohen Verbrauchskosten von Variante 3, welche sich aus dem Bezug von Holz und dem Wärmeeinkauf vom nahe gelegenen Landwirt zusammensetzen, wirken sich hier Energiepreisschwankungen am stärksten auf den Wärmepreis aus. Unter Hinzunahme der Förderung nach BEW, besitzt die Variante 1 den niedrigsten Wärmepreis, da die mit dem Wärmenetz zusammenhängenden Investitionskosten weiter gesenkt werden können. Im Vergleich zum nächst höheren Wärmepreis (Variante 2) liegen die Kosten jedoch nur um ca. 7 % niedriger. Aus ökologischer Sicht schneidet, unter Einbezug der aktuellen GEG Emissionsfaktoren, Variante 2 mit der Holzpelletfeuerung und dem Biogas-BHKW am besten ab. Wie bereits beschrieben liegt dies an dem hohen Verdrängungsfaktor des erzeugten KWK-Stroms. Mit dem geplanten Kohleausstieg der Bundesregierung ist eine Senkung dieses Faktors und ein Anstieg der Emissionen von Variante 2 zu erwarten. Mit Blick auf den steigenden Anteil der erneuerbaren Energien im Bundesdeutschen Strommix und/oder einer PV-Eigenstromerzeugung nehmen die spezifischen Emissionen im Strombezug/Stromeinsatz ab. So verbessert sich die strombasierte Referenzvariante im Bezugsjahr 2030 gegenüber den übrigen Varianten, jedoch bliebe auch dann die Variante 2 unter den getroffenen Annahmen weiterhin die Ökologischste. Mit einer zukünftigen PV-Pflicht auf den Gebäuden (Festsetzung B-Plan) und einem allgemein hohen Interesse der Wohneigentümer*innen Photovoltaik zur Eigenstromerzeugung auf dem eigenen Dach zu installieren (über die Festsetzung im B-Plan hinaus), können die absoluten Emissionen der dezentralen und zentralen Wärmeversorgung weiter gesenkt werden.

Darüber hinaus gibt es noch weitere Themenbereiche, die bei einem Vergleich von dezentralen und zentralen Versorgungslösungen berücksichtigt werden sollten: Komplexität der Umsetzung, Akzeptanz und Zukunftsfähigkeit.

Bei der Wahl einer zentralen Versorgung, wie sie Variante 2 zum Beispiel darstellt, ist die Umsetzung komplexer als bei einer dezentralen Versorgungsvariante. So muss für die Wirtschaftlichkeit einer zentralen Wärmeversorgung ein Anschluss an das Nahwärmenetz und die Benutzung verpflichtend durchgesetzt werden. Darüber hinaus ist die Planung der Anlagentechnik und vor allem des Nahwärmenetzes aufwendig. Diese Punkte entfallen bei einer dezentralen Versorgung.

Beim Punkt Akzeptanz spricht die Verpflichtung zum Anschluss an ein Nahwärmenetz und dessen Nutzung i.d.R. gegen eine zentrale und für eine dezentrale Variante, da sich der/ die Wohneigentümer*in frei für eine Art der Wärmeversorgung entscheiden kann. Jedoch bietet der Standort gute Möglichkeiten, eine Wärmeversorgung zu zentralisieren. Dazu zählt zum einen, dass eine Fläche für eine Heizzentrale bereits im stdb. Entwurf eingeplant und über die Verkehrsführung gut erreichbar ist und zum anderen eine erneuerbare Energiequelle in der nahen Umgebung unmittelbar vorhanden ist. Die vorhandene Biogasquelle trägt zur Energiesicherheit des Baugebiets und zur Unterstützung der örtlichen Landwirtschaft bei, indem das Biogas einer zukünftig nach EEG ausgeführten Anlage weiter genutzt wird. Eine zentrale Versorgung birgt an diesem Standort den Vorteil, dass nur ein Gebäude mit Anlagentechnik bzw. eine Heizzentrale zur Versorgung der 162 Eigentümer ausreichend ist. Eine dezentrale Versorgung hingegen führt bei einer solch kleinkörnigen Siedlung, wie sie hier vorliegt (viele EFH und DH), zu vielen Versorgungslösungen, die vor allem bei Luft-Wasser Wärmepumpen zu optischen Beeinflussungen des Baugebiets führen kann.

Mit abschließendem Blick auf die Zukunftsfähigkeit zeigt sich bei der Wärmepumpentechnologie eine besondere und steuerbare Beeinflussung der ökologischen Bilanz. Eine Verbesserung des eingesetzten Stroms (hohe Anteile erneuerbare Energien) führt zu verminderten Emissionen, wobei hier besonders hervorzuheben ist, dass keine direkten Emissionen frei werden. Ein Bezug und die energetische Nutzung von Biogas in einem BHKW bietet eine gesicherte Strom- und Wärmeversorgung über einen festgelegten Zeitraum.

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 erzeugt und welche PV-Leistung insgesamt zu installieren ist, um eine bilanzielle Treibhausgasneutralität für das Baugebiet zu erreichen. Dabei wird zwischen den Zeiträumen 2020 (GEG) und 2030 unterschieden. Der zu erzeugende PV-Strom kompensiert Emissionen mit 560 gCO₂e/kWh (2020).

GEG Strommix	REF	Var.1	Var. 2	Var.3
Wärmebedarf	1.139.661 kWh	1.381.699 kWh	1.381.699 kWh	1.530.386 kWh
Emissionen Wärme	182 t/a	44 t/a	-127 t/a	-121 t/a
Strombedarf HH	644.700 kWh/a	644.700 kWh/a	644.700 kWh/a	644.700 kWh/a
Strombedarf E-Mob.	610.785 kWh/a	610.785 kWh/a	610.785 kWh/a	610.785 kWh/a
Emissionen Strom	703 t/a	703 t/a	703 t/a	703 t/a
Emissionen gesamt	885 t/a	747 t/a	576 t/a	582 t/a
PV-Strom für Ziel	1.581.102 kWh/a	1.334.056 kWh/a	1.028.699 kWh/a	1.039.414 kWh/a
PV-Leistung	1.736 kWp	1.464 kWp	1.129 kWp	1.141 kWp
Anteil PV-Fläche	52 %	44 %	34%	34%
PV-Strom für Ziel ohne E-Mobilität	970.317 kWh/a	723.271 kWh/a	417.914 kWh/a	428.629 kWh/a
PV-Leistung <u>ohne E-Mobilität</u>	1.065 kWp	794 kWp	459 kWp	471 kWp
Anteil PV-Fläche <u>ohne E-Mobilität</u>	32 %	24%	14%	14%

Tabelle 11 THG-Bilanz, PV-Leistung und Anteil PV-Fläche bei GEG Strommix

Die Tabelle zeigt, dass je höher die Gesamtemissionen sind, desto mehr PV-Strom ist im Quartier zu erzeugen. Die Emissionen der Referenzvariante setzen sich dabei vollständig aus dem Bezug von Netzstrom zusammen, da zur Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe lediglich Strom benötigt wird (ca. 326 MWh/a). Demnach entspricht der erforderliche PV-Strom für die Kompensation, dem Strombedarf für Haushalt, E-Mobilität und der Wärmeerzeugung. Der benötigte PV-Strom errechnet sich aus dem Quotienten von den Gesamtemissionen und dem spez. Emissionsfaktor des Strombezugs (560 gCO_{2e}/kWh). Demnach sind je nach Variante 1.129 kWp bis 1.736 kWp zu installieren, wenn ein spez. solarer Ertrag von 911 kWh/kWp angesetzt wird (ermittelt in Kapitel 4.1). Wird sich nicht auf die Leistung bezogen, sondern auf die benötigte Dachfläche, so ist eine Dachausnutzung von 34 % bis 52 % erforderlich, bei einer zugrunde gelegten Gesamtdachfläche (darunter alle Flächen die in Süd- oder Ost-West-Richtung ausgerichtet sind, ohne nördliche Flächen) von ca. 19.050 m² im Baugebiet und einer PV-Modulleistung von je 350 Wp. Wird der Bedarf der E-Mobilität außen vor gelassen, so reduzieren sich die zu generierenden PV-Erträge und somit auch die zu installierende PV-Leistung auf eine Spanne von 459 bis 1.065 kWp. Der prozentual zu belegende Anteil der Dachfläche sinkt auf eine Spanne von 14 bis 32 %.

Wird für den Strombezug ein Emissionsfaktor von 260 anstatt 560 gCO_{2e}/kWh angesetzt (Prognose NECP im Jahr 2030) und auch der Faktor der KWK-Verdrängungsstroms von 860 auf 409 gCO_{2e}/kWh reduziert, so ergibt sich das in [Tabelle 12](#) dargestellte Ergebnis.

Strommix 2030	REF	Var.1	Var. 2	Var.3
Emissionen Wärme	85 t/a	38 t/a	-18 t/a	-12 t/a
Emissionen Strom	326 t/a	326 t/a	326 t/a	326 t/a
Emissionen gesamt	411 t/a	364 t/a	308 t/a	314 t/a
PV-Strom für Ziel	1.581.102 kWh/a	1.401.251 kWh/a	1.186.290 kWh/a	1.208.156 kWh/a
PV-Leistung	1.736 kWp	1.538 kWp	1.302 kWp	1.326 kWp
Anteil PV-Fläche	52 %	46 %	39 %	40 %
<u>PV-Strom für Ziel ohne E-Mobilität</u>	970.317 kWh/a	790.466 kWh/a	575.505 kWh/a	597.371 kWh/a
<u>PV-Leistung ohne E-Mobilität</u>	1.065 kWp	868 kWp	632 kWp	656 kWp
<u>Anteil PV-Fläche ohne E-Mobilität</u>	32 %	26 %	19 %	20 %

Tabelle 12 THG Bilanz, PV-Leistung und Anteil PV-Fläche bei Strommix 2030

Aufgrund des alleinigen Strombezugs in der Referenzvariante bleiben die zu installierenden PV-Leistungen ggü. der [Tabelle 11](#) unverändert. Durch die verringerte spez. Verdrängung des PV-Stroms erhöht sich der zu generierende PV-Strom in den Varianten 1 bis 3. Eine zusätzliche Erhöhung erfolgt bei den KWK-Varianten 2 und 3 durch den verringerten Faktor für den KWK-Verdrängungsstrom. So sind für eine THG-Neutralität des Baugebiets 1.320 bis 1.736 kWp zu installieren (auch hier bei einem spez. Ertrag von 911 kWh/kWp). Der PV-Dachflächenanteil liegt bei 39 bis 52 %. Gegenüber der Bilanzierung nach GEG 2020 erhöht sich die Mindestleistung der Photovoltaik und somit auch die benötigte Dachfläche. Wird der Bedarf der E-Mobilität auch hier weggelassen, so beläuft sich die zu installierende PV-Leistung je nach Variante auf 632 bzw. 1.065 kWp bzw. 19 bis 32 % Dachfläche.

Als Rahmenparameter für die Ausgestaltung der PV-Pflicht kann somit festgehalten werden, dass im Hinblick auf die maximal möglichen Emissionen im Baugebiet (Referenzvariante nach GEG und 2030) 52 % bzw. 32 % (ohne E-Mobilität) der potenziellen Dachfläche (darunter Süd- und Ost-West-Flächen ohne Nord) mit PV belegt sein müssen, um die zu erwartenden Emissionen (Wärme + Strom) mit PV-Strom kompensieren zu können. Weiterhin hat die PV-Modulleistung mindestens 350 Wp zu betragen, um den erforderlichen solaren Ertrag zu erzielen. Eine Abweichung von der potenziellen Gesamtdachfläche, der Ausrichtung der Dächer und der Mindestmodulleistung kann zu einer Verschiebung des Dachflächenanteils führen.

Einen weiteren positiven Einfluss auf die ökologische Bilanz kann neben einem guten Baustandard und einer reduzierten Wohnfläche auch die Solarthermie nehmen. Aus den in [Kapitel 4.1](#) genannten Gründen (Entscheidung des Investors, keine Abgrenzung im Variantenvergleich) wurde die Solarthermie bilanziell nicht betrachtet. Da sie jedoch in Abhängigkeit der Anlagengröße gute Erträge erzielt, können CO₂-emittierende Wärmeerzeuger (Wärmepumpe (indirekt), BHKW oder Holzfeuerung (direkt)) verdrängt werden. Dies könnte dazu führen, dass z. B. bei einer Wärmeerzeugung durch eine Holzfeuerung die Laufzeit über die Sommermonate stark reduziert bis vollständig unterbrochen werden kann und die Emissionen allgemein sinken.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Variante 2 „Holzfeuerung + Biogas“ ggü. der Referenzvariante „Luft-Wasser Wärmepumpe“ und den zentralen Varianten „Holzfeuerung“ (Var.1) und „Holzfeuerung + Wärmelieferung“ (Var. 3) nach derzeitiger Gesetzeslage als auch nach angenommener zukünftiger Entwicklung (Jahr 2030) die ökologischsten Ergebnisse erzielt. Die Ergebnisse der Referenzvariante sind stark von der Stromherkunft (Strommix, PV-Strom) abhängig, sodass sich hier eine besondere Einflussnahme auf die Ökologische Bilanz der Wärmepumpe abbildet. Aus ökonomischer Sicht und unter Berücksichtigung der Förderung nach BEW stellt Variante 2 einen

verträglichen Wärmepreis, bindet die Nutzung regionaler erneuerbarer Energiequellen mit ein und senkt den Brennstoffeinsatz von Holz ggü. der Variante 1 und 3. Auch die Referenzvariante weist im Vergleich zu den anderen Varianten einen verträglichen Wärmepreis auf. Auf Basis der Darlegungen stellen die Variante 2 und die Referenzvariante nahezu gleichwertige Bedingungen dar. Mit Blick auf die aktuellen und sich ggf. zukünftig ändernden Rahmenbedingungen können die Variante 2 und die Referenzvariante als geeignet angesehen werden. In Verbindung mit den in Kapitel 1 zusammengefassten energetischen Maßnahmen im stdb. Entwurf, kann vor allem durch den guten Gebäudestandard, die solarfreundliche Ausrichtung der Gebäude und Dächer, und durch die Festsetzung einer PV-Pflicht die verfolgte bilanzielle Treibhausgasneutralität in den untersuchten Varianten erreicht werden.

Anhang

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

		Grundlagen					Wärme				
Geb.Nr	Typ	Grundstücks- fläche	Geschossig- keit	Wohn- einheiten	Personen	Wohn- fläche	Heizwärme- bedarf	TWW-Bedarf	Gesamtwärme	Heizlast	
[-]	[-]	[m²]	[-]	[-]	[-]	[m²]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kW]	
1	EFH	640	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
2	DHH	640	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
3	EFH	590	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
4	EFH	591	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
5	EFH	656	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
6	EFH	632	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
7	EFH	571	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
8	EFH	508	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
9	EFH	458	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
10	DHH	638	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
11	DHH	606	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
12	DHH	565	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
13	DHH	537	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
14	DHH	500	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
15	DHH	608	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
16	DHH	583	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
17	DHH	557	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
18	DHH	549	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
19	DHH	604	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
20	EFH	612	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
21	EFH	558	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
22	EFH	581	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
23	EFH	586	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
24	EFH	609	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
25	EFH	549	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
26	EFH	501	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
27	EFH	526	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
28	EFH	553	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
29	EFH	550	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
30	EFH	505	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
31	EFH	586	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
32	EFH	599	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
33	EFH	620	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
34	EFH	561	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
35	EFH	543	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
36	EFH	697	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
37	EFH	692	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
38	EFH	597	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
39	EFH	565	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
40	EFH	552	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
41	EFH	575	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
42	EFH	520	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
43	EFH	572	2	1	6	180	4.863	3.557	8.420	7,7	
44	EFH	629	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
45	EFH	670	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
46	EFH	581	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
47	DHH	500	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
48	DHH	506	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
49	DHH	547	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
50	DHH	576	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
51	DHH	574	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
52	EFH	664	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
53	EFH	642	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
54	EFH	611	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
55	EFH	622	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
56	EFH	684	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
57	EFH	529	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
58	EFH	481	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
59	EFH	512	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
60	EFH	513	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
61	EFH	513	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
62	DHH	570	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
63	DHH	570	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
64	EFH	576	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
65	DHH	615	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
66	DHH	633	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
67	DHH	744	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	

Geb.Nr	Typ	Grundlagen					Wärme				
		Grundstücks- fläche [m²]	Geschossig- keit [-]	Wohn- einheiten [-]	Personen [-]	Wohn- fläche [m²]	Heizwärme- bedarf [kWh/a]	TWW-Bedarf [kWh/a]	Gesamtwärme [kWh/a]	Heizlast [kW]	
68	EFH	717	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
69	DHH	613	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
70	DHH	620	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
71	DHH	531	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
72	EFH	677	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
73	EFH	641	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
74	EFH	685	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
75	EFH	475	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
76	EFH	463	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
77	EFH	436	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
78	EFH	410	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
79	EFH	620	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
80	EFH	610	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
81	EFH	647	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
82	MFH	906	2	6	12	547,2	14.385	7.113	21.498	19,6	
83	MFH	817	2	6	12	547,2	14.385	7.113	21.498	19,6	
84	MFH	886	2	6	12	547,2	14.385	7.113	21.498	19,6	
85	EFH	540	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
86	EFH	540	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
87	EFH	500	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
88	EFH	519	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
89	EFH	534	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
90	EFH	490	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
91	EFH	741	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
92	EFH	605	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
93	EFH	571	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
94	EFH	561	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
95	EFH	569	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
96	EFH	540	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
97	EFH	660	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
98	EFH	424	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
99	EFH	465	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
100	EFH	511	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
101	EFH	559	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
102	EFH	628	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
103	EFH	647	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
104	EFH	607	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
105	EFH	555	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
106	EFH	537	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
107	EFH	523	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
108	EFH	551	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
109	EFH	507	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
110	EFH	545	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
111	EFH	549	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
112	EFH	460	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
113	EFH	585	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
114	EFH	595	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
115	EFH	607	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
116	EFH	590	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
117	EFH	579	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
118	EFH	556	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
119	EFH	672	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
120	DHH	646	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
121	EFH	633	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
122	EFH	536	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
123	DHH	531	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
124	DHH	540	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
125	DHH	545	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
126	DHH	570	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
127	DHH	581	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
128	DHH	564	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
129	DHH	509	2	2	6	290	7.676	3.557	11.233	10,2	
130	EFH	693	2	1	4	180	4.863	2.371	7.234	6,6	
Summe		75.628		177	656	28021,6	750.810	388.851	1.139.661	1.038	
			+24 Einlieger	201							

Geb.Nr	Typ	Grundlagen			Photovoltaik						
		Wohnfläche	BGF	Grundfläche	Ausrichtung	spez. Ertrag	Dachfläche	Pot. Dachfläch	Module	Leistung	Ertrag
[-]	[-]	[m²]	[m²]	[m²]	[-]	[kWh/kWp]	[m²]	[m²]	[-]	[kWp]	[kWh/a]
1	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
2	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
3	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
4	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
5	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
6	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
7	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
8	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
9	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
10	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
11	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
12	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
13	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
14	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
15	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
16	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
17	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
18	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
19	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
20	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
21	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
22	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
23	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
24	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
25	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
26	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
27	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
28	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
29	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
30	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
31	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
32	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
33	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
34	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
35	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
36	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
37	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
38	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
39	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
40	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
41	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
42	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
43	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
44	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
45	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
46	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
47	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
48	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
49	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
50	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
51	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
52	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
53	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
54	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
55	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
56	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
57	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
58	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
59	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
60	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
61	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
62	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
63	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000
64	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
65	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
66	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
67	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
68	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205
69	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
70	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
71	DHH	290	386	257	OW	835	297	208	109	38	31.730
72	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000
73	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000

Geb.Nr	Typ	Grundlagen			Photovoltaik							
		Wohnfläche	BGF	Grundfläche	Ausrichtung	spez. Ertrag	Dachfläche	Pot. Dachfläch	Module	Leistung	Ertrag	
[-]	[-]	[m²]	[m²]	[m²]	[-]	[kWh/kWp]	[m²]	[m²]	[-]	[kWp]	[kWh/a]	
74	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
75	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
76	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
77	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
78	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
79	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
80	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
81	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
82	MFH	547	728	364	OW	835	370	259	136	47	39.245	
83	MFH	547	728	364	S	1.000	185	130	68	23	23.000	
84	MFH	547	728	364	S	1.000	185	130	68	23	23.000	
85	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
86	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
87	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
88	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
89	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
90	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
91	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
92	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
93	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
94	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
95	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
96	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
97	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
98	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
99	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
100	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
101	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
102	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
103	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
104	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
105	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
106	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
107	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
108	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
109	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
110	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
111	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
112	EFH	180	239	160	OW	835	184	129	67	23	19.205	
113	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
114	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
115	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
116	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
117	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
118	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
119	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
120	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
121	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
122	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
123	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
124	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
125	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
126	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
127	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
128	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
129	DHH	290	386	257	S	1.000	148	104	54	18	18.000	
130	EFH	180	239	160	S	1.000	92	64	33	11	11.000	
Summen						945	19.049	13.334	6.920	2.354	2.144.780	

alle Preisangaben netto	Dimension	REF L/W-WP	Var 1 Holzfeuerung	Var 2 Holz + Biogas in Grundlast	Var 3 Holz + Wärmelieferung
Versorgungsaufgabe		162	162	162	162
Wärmebedarf gesamt	kW	1.038	850	850	870
Heizung	kW	683	683	683	683
TWW	kW	355	142	142	142
Netzverluste	kW	-	28	28	45
Vollbenutzungsdauer Hzg	h/a	1.100	1.100	1.100	1.100
Wärmeverbrauch	kWh/a	1.139.661	1.381.699	1.381.699	1.530.386
Erfüllungsgrad	-	100%	100%	100%	100%
Heizung	kWh/a	750.810	750.810	750.810	750.810
Warmwasser	kWh/a	388.851	388.851	388.851	388.851
Netzverluste	kWh/a	-	242.039	242.039	390.725
Anteil Verluste		0%	17,5%	17,5%	25,5%
Anteil Verluste Passivhaus		0%	24%	24%	34%
Stromverbrauch Baugebiet	kWh/a				

Auslegung

BHKW

therm. Leistung	kW	-	-	70	70
elektr. Leistung	kW	-	-	35	35
Vollbenutzungsdauer	h/a	-	-	7.326	7.326
Wärmeerzeugung	kWh/a	-	-	512.838	534.605
Stromerzeugung	kWh/a	-	-	256.419	267.303
Nutzungsgrad	-	-	-	0,945	0,945
Brennstoffeinsatz	kWh(Hi)/a	-	-	814.029	848.579

Elt-Wärmepumpe	kW	1.038	-	-	-
Entzugsleistung	kW	741	-	-	-
Leistung Strom	kW	296	-	-	-
Vollbenutzungsdauer	h/a	1.098	-	-	-
Wärmeerzeugung	kWh/a	1.139.661	-	-	-
Arbeitszahl	-	3,5	-	-	-
Stromeinsatz	kWh/a	325.617	-	-	-

Holzfeuerung	kW	-	850	800	800
Vollbenutzungsdauer	h/a	-	1.626	1.086	1.245
Wärmeerzeugung	kWh/a	-	1.381.699	868.862	995.782
Nutzungsgrad	-	0,85	0,85	0,85	0,85
Brennstoffeinsatz	kWh/a	-	1.625.529	1.022.191	1.171.508
Heizwert	kWh/kg	4,6	4,6	4,6	4,6
Schüttdichte	kg/m³	650	650	650	650
Pelletmenge	kg/a	-	353.376	222.215	254.676
Lagervolumen Schnitt	m³/mon	-	45	28,5	32,7
Max.Lagervolumen ü. Heizlast	m³/monWinter	-	212	199	199
Jahresvolumen	m³/a	-	544	342	392

Hilfsstrom Netz	kWh/a	-	20.725	20.725	38.260
Strom-Nacherhitzung WW	kWh/a	-	-	-	-

Ökobilanzen GEG 2020

PE-Bilanz	kWh/a	586.111	362.412	-232.021	-190.704
Primärenergiefaktor		0,51	0,26	0,20	0,20
CO2-Bilanz	kg/a	182.346	44.117	-127.418	-121.381
CO2 spezifisch	gCO2e/kWh NECP	160	32	-92	-79
CO2 spezifisch	kgCO2e/m²	6,51	1,57	-4,55	-4,33

Ökobilanzen Strommix 2030

PE-Bilanz	kWh/a	253.981	341.272	-13.257	20.357
Primärenergiefaktor		0,22	0,25	0,20	0,20
CO2-Bilanz	tCO2e NECP	85	38	-18	-12
CO2 spezifisch	gCO2e/kWh NECP	74	27	-13	-8
CO2 spezifisch	kgCO2e/m²	3,02	1,35	-0,64	-0,44

Kostenschätzung*

Wärmepumpe (inkl. Montage)	€	2.168.946	-	-	-
BHKW	€	-	-	83.119	-
Pelletkessel	€		298.441	272.272	272.272
Pufferspeicher	€		16.278	18.603	18.603
Herrichtung Pelletlager	€		5.000	5.000	5.000
Fördereinheit ohne Schnecke	€		5.662	5.662	5.662
Übergabestation	€		329.500	329.500	329.500
Schornstein / Abgasleitung	€		24.000	36.000	24.000
Netzkosten (mit HA/ohneÜberg:	€	-	1.429.550	1.429.550	1.429.550
externe Netzkosten (Gas-/Wärm	€	-	-	202.950	405.900

alle Preisangaben netto	Dimension	REF L/W-WP	Var 1 Holzfeuerung	Var 2 Holz + Biogas in Grundlast	Var 3 Holz + Wärmelieferung
Hydr. Anbindung_HzZentrale	€	in WP-Preis	30.000	35.000	32.000
Elt. Anbindung	€	in WP-Preis	15.000	20.000	15.000
MSR	€	in WP-Preis	10.000	15.000	12.000
Bauteil (Heizzentrale inkl. Pellet)	€	-	165.000	195.000	165.000
Sonstiges	€	-	232.843	264.766	271.449
Invest	€	2.168.946	2.561.274	2.912.421	2.985.936
Planung	€	54.224	512.255	582.484	597.187
Gesamtkosten	€	2.223.169	3.073.529	3.494.906	3.583.123
spez. Kosten je Gebäude	€/Geb	13.723	18.972	21.573	22.118
Förderung NW-Netz	40%	-	1.089.659	1.229.700	1.303.034
Gesamtkosten ./ .Förderung	€	2.223.169	1.983.869	2.265.206	2.280.088
Kapitalkosten					
Kalkulationszins	%/a	2,0	2,0	2,0	2,0
Annuität	€/a	135.962	139.239	158.683	157.989
Annuität mit Förderung	€/a	135.962	93.779	107.442	104.262
W,I+B-Kosten					
W+I-Kosten	€/a	86.758	18.411	18.329	17.334
BHKW Vollwartungsvertrag	ct/kWh(el)	-	-	3,5	-
BHKW Vollwartungsvertrag	€/a	-	-	8.975	-
Bedienkosten	€/a	-	6.760	9.260	6.760
W,I+B-Kosten	€/a	86.758	25.171	36.564	24.094
Energiekosten					
Strompreis	ct/kWh(el)	25,00	25,00	25,00	25,00
Stromkosten	€/a	-	5.181	5.181	9.565
Strompreis WP	ct/kWh(el)	21,50	21,50	21,50	21,50
Stromkosten WP	€/a	70.008	-	-	-
Pelletpreis	ct./kWh	7,83	7,83	7,83	7,83
Pelletkosten	€/a	-	127.215	79.998	91.683
Biogaspreis	€/kWh	-	-	9,00	-
Biogaskosten	€/a	-	-	73.263	-
Preis Wärmelieferung Bauer	€/kWh	-	-	-	12,45
Wärmelieferung Kosten	€/a	-	-	-	66.570
Gesamtkosten	€/a	292.727	296.807	353.688	349.901
Gesamtkosten ./ .Förderung	€/a	292.727	251.347	302.447	296.174
Erlöse					
EEG-Vergütung Biomethan	ct/kWhel	-	-	-12,28	-
EEG-Vergütung Biomethan	€/a	-	-	-31.488	-
Gesamterlöse	€/a	-	-	-31.488	-
Jahresrestkosten	€/a	292.727	296.807	322.200	349.901
spez. Kosten	ct/kWh(th)	25,69	26,04	28,27	30,70
Jahresrestkosten ./ .Förderung	€/a	292.727	251.347	270.959	296.174
spez. Kosten ./ .Förderung	ct/kWh(th)	25,69	22,05	23,78	25,99
Kosten bei Passivhausstandard					
	ct/kWh	35	34	37	41
	ct/kWh ./ .Förd	35	28	31	34
	€/MWh	351	340	373	407
	€/MWh ./ .Förd	351	281	306	338
	€/m²/Monat (Brutto)	0,96	0,92	1,01	1,11
	€/m²/Monat ./ .Förd (Brutto)	0,96	0,76	0,83	0,92