

ENERGIEKONZEPTION QUARTIER DÖBELE, KONSTANZ

Februar 2024
Projekt: InPEQt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Hottenroth, Heidi
Hochschule Pforzheim
Insitut für Industrial Ecology
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim

Projektleitung: Prof. Dr. Ingela Tietze, Prof. Dr. Tobias Viere

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	2
2	Rahmendaten des Quartiers	2
3	Szenarien	3
4	Bedarfe	3
4.1	Wärme.....	3
4.2	Strom.....	4
5	Wärmedämmung	6
6	Potenzielle Erzeugungsanlagen und Speicher.....	6
7	Eingangsparameter	7
7.1	Kosten.....	7
7.1.1	Variable Kosten.....	7
7.1.2	Fixkosten und Investitionen	8
7.2	Umweltwirkungen	9
7.3	Lebensdauern.....	9
7.4	Technische Parameter.....	10
7.5	Wetterabhängige Daten.....	11
8	Optimierungsziele	11
8.1	Kosten.....	11
8.2	Umweltwirkungen	11
8.3	Multi-kriterielle Ziele.....	11
9	Ergebnisse.....	14
9.1	Kosten.....	14
9.2	Installierte Leistung	15
9.3	Überschussstrom.....	17
9.4	Indikatoren im Vergleich	17
10	Sensitivitätsanalysen	18
10.1	Ohne Spitzenlastkessel.....	18
10.1.1	Kosten.....	19
10.1.2	Installierte Leistung	19
10.2	Nur Wärmebedarf	20
10.2.1	Kosten.....	20
10.2.2	Installierte Leistung	21
11	Beitrag zur Treibhausgasneutralität.....	21
12	Unsicherheiten	21
13	Schlussfolgerungen.....	22
14	Empfehlungen	23
	Anhang	25
	Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten je Szenario	25
	Umweltwirkungen und Kosten pro investierter Einheit pro Jahr	28
	Umweltwirkungen und Kosten pro variabler Einheit.....	30
	Annahmen für Mehraufwand Gebäudedämmung bei EH40	32

1 EINLEITUNG

Die Stadt Konstanz plant auf dem derzeit als Parkplatz genutzten innerstädtischen Areal „Döbele“ ein Neubauquartier mit Mehrfamilienhäusern, die im Erdgeschoss in Teilen auch Gewerbeflächen bieten. Unter einem Teil der Gebäude wird es eine Tiefgarage geben. Die Energieversorgung des Quartiers soll dem Ziel der Treibhausgasneutralität nicht entgegenlaufen.

Im Rahmen des Projekts InPEQt¹ wurde ein entsprechendes Energiekonzept auf Basis von Ergebnissen des Energiesystemmodells LAEND erstellt. LAEND kombiniert Energiesystemmodellierung und Ökobilanzierung und liefert als Ergebnis die optimale Zusammensetzung und Auslastung eines Energiesystems über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Mit LAEND kann nach Energiesystemkosten oder einzelnen Umweltzielen, aber auch mehrkriteriell nach mehreren Zielen optimiert werden. So können in der frühen Planungsphase nachhaltigere sektorkoppelnde Energiesystemkonfigurationen identifiziert werden, die Wärme und Strom (inkl. E-Mobilität) abdecken.

Für das Energiekonzept des Quartiers Döbele werden sowohl der Wärmebedarf als auch der Strombedarf inkl. E-Mobilität betrachtet. Zwischenergebnisse wurden mit einem Projektbeirat aus Energiefachleuten und Vertreter:innen der Stadt Konstanz² diskutiert und mithilfe der gewonnen Erkenntnisse diese Energiekonzeption abgeleitet. Diese versteht sich als Orientierung vor allem für die kommunalen Entscheidungsträger:innen bei der Planung von Energieinfrastruktur.

2 RAHMENDATEN DES QUARTIERS

Die Grundfläche der Gebäude wird ca. 6.200 m² betragen. Es sind ca. 250 Wohneinheiten geplant.

Bislang gibt es keine Detailplanung für das Quartier. Über den städtebaulichen Entwurf des Architekturbüros und Annahmen für die Nutzungen ergeben sich folgende Flächenangaben:

Gesamte beheizte Fläche: Wohnen: ca. 15.400 m², Gewerbe: ca. 1.050 m²

Beim Gewerbe werden in Absprache mit der Stadt Konstanz eine Kita, eine Bäckerei mit Café, ein Restaurant, ein Waschsalon und Büros angenommen, wobei die Flächenaufteilung auf Annahmen beruht.

In der Tiefgarage und in anderen Parkbereichen ist Ladeinfrastruktur für E-Mobilität geplant, die über die Jahre ausgebaut wird.

Für den Zeitraum der Analyse wurden 20 Jahre gewählt, mit 2023 als Startjahr.



¹ Integrierte kosten- und lebenszyklusbasierte Planung dezentraler Energiesysteme für eine energie- und ressourcenschonende Quartiersentwicklung, <https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec/projekte/inpeqt>

² Mona Kramer (Klimaschutzmanagerin), Jochen Friedrichs (Amt für Stadtplanung und Umwelt)

3 SZENARIEN

Es werden zwei Optionen für den Wärmebedarf betrachtet:

- einmal der Wärmebedarf für den Effizienzhaus(EH)40-Standard³ und
- einmal für den EH55-Standard.

Dazu werden zwei verschiedene Wärmebedarfszeitreihen für die Raumwärme generiert und der Optimierung zu Grunde gelegt. Beim EH40-Standard werden die Kosten und die Umweltwirkungen für den Mehraufwand an Dämmung nachträglich zu den Ergebnissen addiert.

4 BEDARFE

Das Energiesystemmodell berücksichtigt jährliche Bedarfe an Strom und Wärme in stündlicher Auflösung.

4.1 WÄRME

Für den Wärmebedarf für den Bereich Wohnen wird von den Annahmen für das Quartier „Am Horn“ ausgegangen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Neubauquartier, welches aktuell geplant wird und für welches ein Energiekonzept bereits vorliegt. Im Energiekonzept⁴ für das genannte Quartier wurden für die Raumwärme keine spezifischen Werte des Wärmebedarfs pro Fläche angegeben. Diese wurden aus den im Konzept genannten Flächen und Wärmebedarfen zurückgerechnet. Dabei ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 1 Spezifische Wärmebedarfe für verschiedene Wärmedämmstandards

		EH55	EH40
Raumwärme (RW)	kWh/m ² /a	48,0	37,3
Warmwasser (WW)	kWh/m ² /a	25	25
RW+WW	kWh/m ² /a	73,0	62,3

Für die gewerblichen Flächen werden die Wärmebedarfe über das Online-Tool nPro⁵ ermittelt, wobei im Tool nicht nach verschiedenen Dämmstandards unterschieden wird⁶.

³ Das bedeutet, dass das Gebäude einen Energiebedarf von 40 % des gesetzlich vorgeschriebenen maximalen Energiebedarfs nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) hat; analog 55 % bei EH55.

⁴ Ebök – Gesellschaft mbH (2021): Modellquartier „Am Horn“ Konstanz – Energiekonzept –

⁵ www.npro.de

⁶ Aufgrund der geringen Außenwandflächen im Vergleich zum Bereich Wohnen kann der Mehr- bzw. Minderbedarf an Dämmung hierfür vernachlässigt werden.

Tabelle 2 Spezifische und absolute jährliche Wärmebedarfe nach Nutzung

		Wohnen EH55	Wohnen EH40	Büro	Cafe/Bä- ckerei/ Wasch- salon	Restau- rant	Kita	Tiefgar- rage	Summe
Nutzfläche	m ²	15428	15428	552	340	160	225	3000*	
Gebäudetyp nPro		Wohnen	Wohnen	Büro	Super- markt	Restau- rant	Kinder- garten	Park- haus	
Raumwärme	MWh	741	571	38	13	6	8	0	806
	kWh/m ²	48	37	69	38	38	36	0	
Trinkwarmwas- ser	MWh	386	386	4	1	8	1	0	400
	kWh/m ²	25	25	7	3	50	4	0	
* Schätzung									

Für die Energiesystemmodellierung werden Zeitreihen in stündlicher Auflösung für den Wärmebedarf benötigt. Diese wurden mittels der o.g. Kennwerte ebenfalls mit dem Online-Tool nPro erstellt.

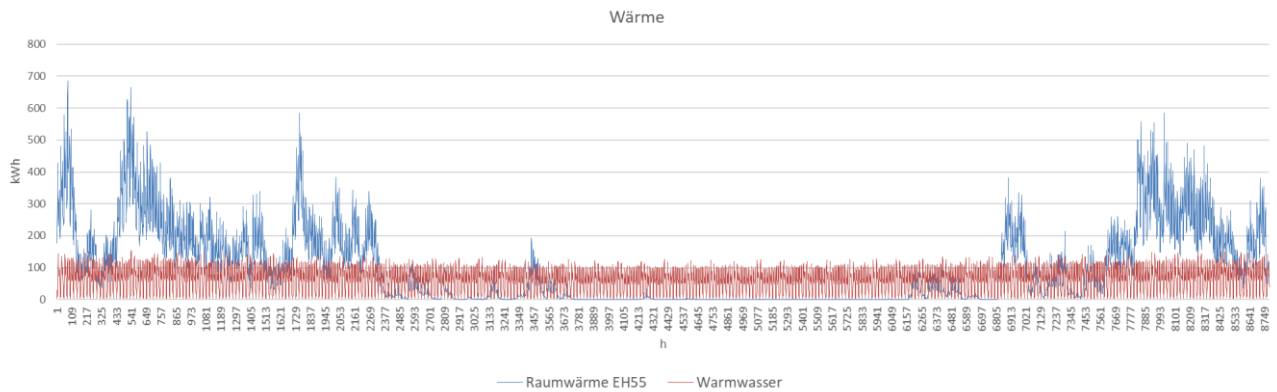


Abbildung 1 Lastprofil Warmwasser und Raumwärme für EH55-Standard

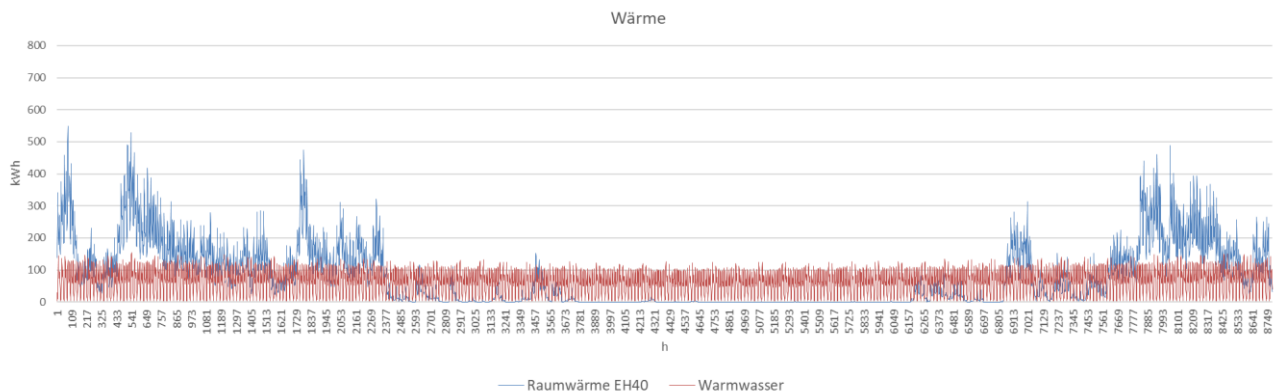


Abbildung 2 Lastprofil Warmwasser und Raumwärme für EH40-Standard

4.2 STROM

Der Strombedarf und die zugehörigen Zeitreihen werden ebenfalls mit dem Online-Tool nPro über die Nutzungen und entsprechenden Flächen mit den im Tool hinterlegten spezifischen Werten ermittelt bzw. erstellt.

Tabelle 3 Spezifische und absolute jährliche Strombedarfe nach Nutzung

		Wohnen	Büro	Cafe/Bä- cke- rei/Wasch- salon	Restaurant	Kita	Tiefgarage	Summe
Nutzfläche	m ²	15428	552	340	160	225	3000*	
Gebäudetyp		Wohnen	Büro	Super- markt	Restaurant	Kindergar- ten	Parkhaus	
Nutzer- strom**	MWh/a	410	22	24	20	3	45	524
	kWh/m ²	27	40	71	125	13	15	
* Schätzung								
** z.B. Beleuchtung, Elektrogeräte; ohne Heizstrom und Ladestrom für E-Mobilität								

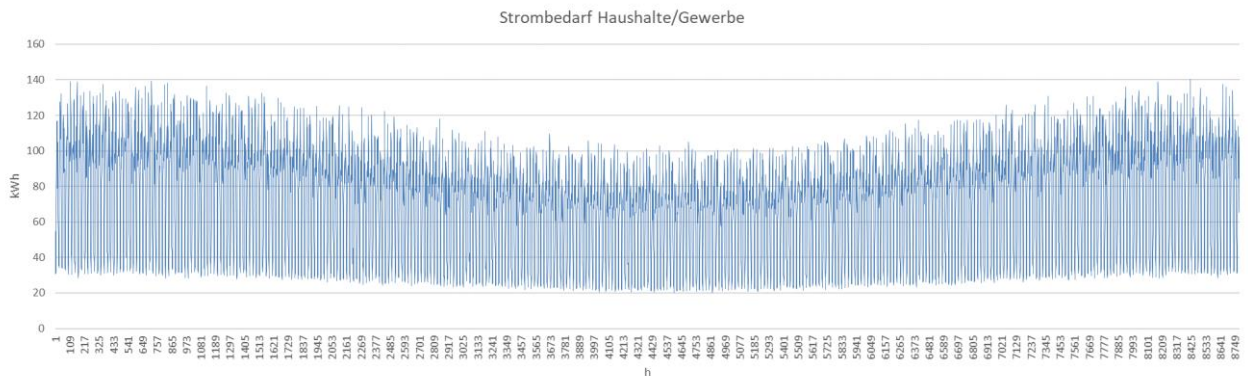


Abbildung 3 Lastprofil Strom

Beim Strombedarf für die E-Mobilität im Bereich Wohnen wurden in Absprache mit der Stadt Konstanz folgende Annahmen für 2028 getroffen:

- pro Ladepunkt 15 km/d, 365 d/a
- Verbrauch: 10 kWh/100 km
- 150 Ladevorgänge

Aus diesen Werten ergeben sich 82 MWh pro Jahr, wofür das Lastprofil mit dem nPro-Tool ermittelt wird. Für E-Mobilität im gewerblichen Bereich werden auch die Bedarfe, die im nPro-Tool hinterlegt sind, verwendet.

Tabelle 4 Absolute jährliche Strombedarfe für Elektromobilität nach Nutzung (für Gewerbe mit nPro-Tool ermittelt)

		Wohnen	Büro	Cafe/Bäcke- rei/Waschsa- lon	Restaurant	Kita	Summe
Nutzfläche	m ²	15428	552	340	160	225	
Gebäudetyp		Wohnen	Büro	Supermarkt	Restaurant	Kindergarten	
Elektromobilität	MWh/a	82	6	1	4	1	94

Aus den o.g. Werten wird unter der Annahme, dass sich der gewerbliche Strombedarf auf 20 Ladevorgänge verteilt, ein Strombedarf von 1,1 MWh/a pro Ladepunkt ermittelt. Dieser wird für den Ausbau der Ladeinfrastruktur von 50 Ladepunkten im ersten Jahr auf 500 Ladepunkte (Anzahl Stellplätze in Tiefgarage) im Jahr 2038 verwendet. Im Jahr 2028 wird von 150 (Planung Stadt Konstanz) und im Jahr 2032 von 300 Ladepunkten ausgegangen.

Tabelle 5 Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042

		Strombedarf E-Mobilität
2023-2027	MWh/a	56
2028-2032	MWh/a	169
2033-2037	MWh/a	339
2038-2042	MWh/a	565

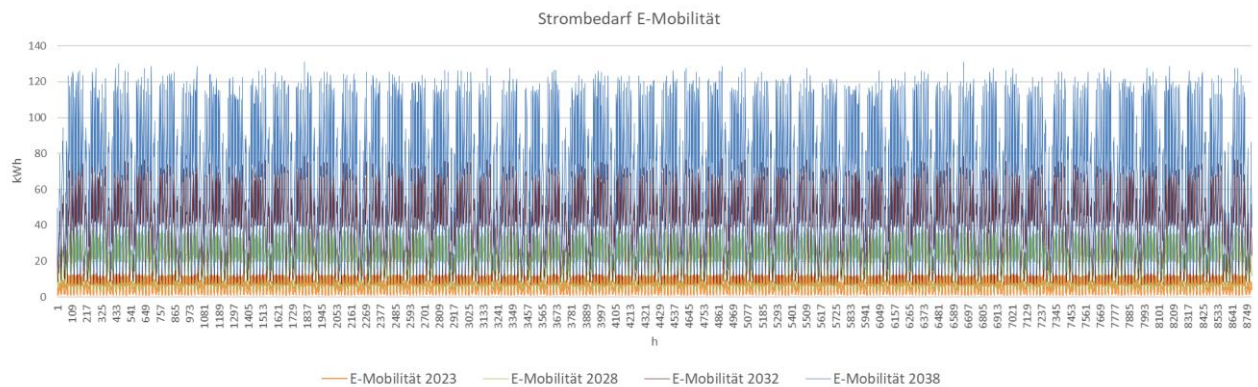


Abbildung 4 Lastprofile E-Mobilität

5 WÄRMEDÄMMUNG

Aus den Annahmen für die Hüllfläche plus Dachfläche der Gebäude ergibt sich ein zusätzlicher Dämmaufwand bei EH40-Standard von ca. 44 t expandiertes Polystyrol (EPS), welcher mit zusätzlichen Kosten von ca. 1 Mio. Euro verbunden sind. Die Herleitung dieser Werte findet sich im Anhang. Für die Dämmung wurde eine Lebensdauer von 50 Jahren angenommen.

6 POTENZIELLE ERZEUGUNGSANLAGEN UND SPEICHER

Folgende Technologien wurden unter Berücksichtigung des technischen Potenzials im Energiesystemmodell abgebildet:

- Flachdach-Photovoltaik: Dachfläche max. 5.500 m² (Annahme: ca. 80 % der Gebäudegrundfläche), Flachdach, optimale Ausrichtung (Neigung: 36 °, Azimut: 4°)
- Fassaden-Photovoltaik: Fassadenfläche 1.500 m² (Annahme: 10 m x 150 m), Ausrichtung Südwest (47°), senkrechte Montage, Warmfassade
- Solarthermischer Flachkollektor: Dachfläche max. 5.500 m², Flachdach, optimale Ausrichtung
- Erdwärme: Erdwärmesonden (Obergrenze: 450 kW) + Sole-Wasser-Wärmepumpe
- Abwasser: Abwasser-Wärmetauscher (Obergrenze 450 kW) + Abwasser-Wasser-Wärmepumpe

Die folgenden Technologien gehen ohne Obergrenze für das Potenzial in das Modell ein:

- Luft: Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Biomethan-Kessel
- Erdgas-Kessel
- Power to Heat: Heizstab oder Elektrodenkessel
- Warmwasser-Pufferspeicher/Heizwasser-Pufferspeicher
- Lithium-Ionen-Batterie

- Vanadium-Redox-Flow-Batterie
- Zusätzlich Netzstrom

Außer für Solarenergie, Umgebungswärme und in geringem Umfang Biomethan gibt es kein relevantes technisches Potenzial für weitere Erneuerbare Energien.

7 EINGANGSPARAMETER

7.1 KOSTEN

7.1.1 Variable Kosten

Bei der Kostenbetrachtung werden Gesteungskosten herangezogen. Förderungen, Einspeisevergütungen, Steuern, Abgaben, Umlagen etc. sind nicht berücksichtigt. Somit werden bei den leitungsgebundenen Energieträgern Strom, Erdgas und Biomethan nur die Kostenbestandteile Beschaffung und Netzentgelt/Messung mit zeitlicher Dynamik berücksichtigt, bei Heizöl nur die Beschaffung. Für Brennstoffe auf Basis von Holz wurden konstante Nettopreise angenommen.

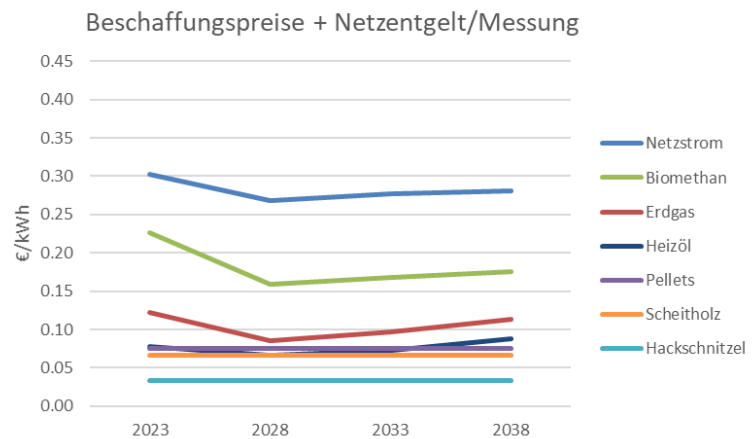


Abbildung 5 Preisentwicklung für Energieträger

Tabelle 6 Kostenannahmen für eingekaufte Energieträger

	Jahr	Kosten [Euro/kWh]	Quelle
Strom	2023	0.302	[1, 2]
	2028	0.269	[1, 2]
	2033	0.277	[1, 2]
	2038	0.281	[1, 2]
Erdgas	2023	0.122	[3, 4]
	2028	0.086	[3, 4]
	2033	0.097	[3, 4]
	2038	0.113	[3, 4]
Biomethan	2023	0.227	[1, 4]
	2028	0.159	[1, 4]
	2033	0.168	[1, 4]
	2038	0.176	[1, 4]

[1] https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizen-mit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=8

[2] www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse, 7/2023

[3] <https://dserver.bundestag.de/btd/20/072/2007290.pdf>

[4] <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-gaspreisanalyse/>, 7/2023

Für die strom- und wärmeerzeugenden Anlagen wurden außer den Brennstoffkosten keine weiteren variablen Kosten angenommen.

7.1.2 Fixkosten und Investitionen

Bei den Investitionen sind (noch) keine Änderungen für zukünftige Jahre berücksichtigt. Analog zu den Umweltwirkungen findet keine Diskontierung statt.

Für die Fassaden-PV-Anlage werden nur die Mehrkosten gegenüber einer Aluminium-Fassade angesetzt, da diese durch die PV-Anlage eingespart werden kann.

Die Fixkosten für Wartung sowie die Investitionen können der folgenden Tabelle entnommen werden. Die Zusatzkosten für Wärmedämmung nach EH40-Standard sind im Anhang aufgeführt.

Tabelle 7 Fixkosten und Investitionen pro Technologie

Technologie	Größenklasse	Einheit	Wartung [€/Einheit]	Investition [€/Einheit]	Umrechnung	Quelle
PV, Flachdach		kWp	26	1309		Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Fassade		kWp	3	340		Differenzkosten zu Aluminiumfassade nach https://bipv-bw.de/c-bipv-im-planungsprozess/c2-2-wirtschaftlichkeit/
Batterie, Li-Ionen		kWh	25	714		Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 28, niedrig
Batterie, Vd-Redox-Flow		kWh	25	893		Annahme (20 % höher als Li-Ionen-Batterie)
Luft-Wasser Wärmepumpe	50	kW Heizwärmeleistung	8	548		KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx, 30-50 kW (50)
Sole-Wasser-Wärmepumpe	50	kW Heizwärmeleistung	7	478		KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.3 Dezentrale_Waermeversorgung_Sole_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx, 41-50 kW (50)
Erdwärmesonde	Bis 100	m	0	100	55 W/m	Bosch
Abwasser-Wasser-Wärmepumpe	50	kW Heizwärmeleistung	7	913		Pers. Mitteilung Daniel Siejak, Schäffler-Sinnogy
Abwasserwärmetauscher		kW	0	1000		Herstellerangabe (Uhrig-Bau)
Flachkollektor		m ²	1,5	579		KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 3.9 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-Solarthermie v1.xlsx, 140 kW
Elektrowärme	7	kW	0	362		KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.10 Dezentrale_Waermeversorgung_Stromdirektheizungen v1.xlsx, 7 kW
Erdgas-/Biomethan-Kessel	80	kW	3	107		KEA-BW (2022): Technikkatalog, 3.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Gasbrennwertkessel v1.xlsx, 61-80 kW
Pufferspeicher	5000	1000 l	0	750	23 kWh/1000 l (Warmwasser); 103 kWh/1000 l (Raumwärme)	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx, 5000l, 15-50a

7.2 UMWELTWIRKUNGEN

Um die Umweltwirkungen zu bestimmen, werden sog. Sachbilanzen auf Basis der Datenbank ecoinvent v3.7 erstellt. Mit diesen wird die Herstellung (und ggf. Entsorgung) von Anlagen und Energieträgern modelliert, so dass alle Stoffströme bis zur Entnahme aus der Erdkruste und alle Emissionen in die Umweltmedien aufsummiert werden können.

Für den Netzstrom werden aufgrund des fortschreitenden Ausbaus erneuerbarer Energien sich über die Zeit ändernde Umweltwirkungen angenommen. Für die Treibhausgasemissionen wird die Reduktion aus Abbildung 6 ersichtlich. Die weiteren Umweltwirkungsindikatoren für Strom wie auch für die anderen Energieträger und Technologien können dem Anhang entnommen werden.

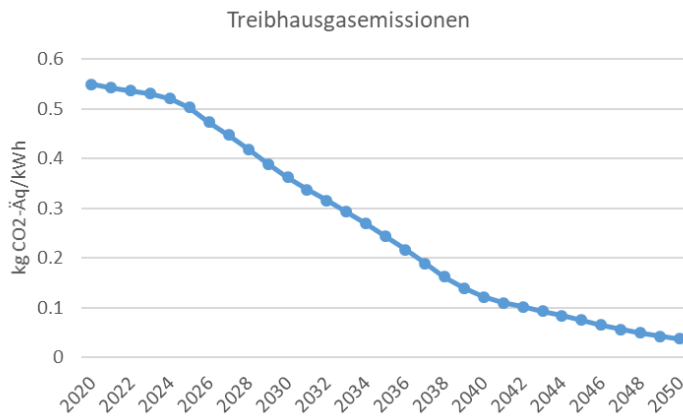


Abbildung 6 Verlauf der Treibhausgasemissionen (Szenario VI (basiert auf Repenning, J. et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Öko-Institut, FhG ISI, Hans-Joachim Ziesing) aus Naegler, T. et al. (2022): Life cycle-based environmental impacts of energy system transformation strategies for Germany: Are climate and environmental protection conflicting goals? Energy Reports 8: 4763–4775. doi:10.1016/j.egy.2022.03.143)

Analog zu den Kosten wurde bei der Sachbilanz für Fassaden-PV der Materialbedarf für eine Aluminiumfassade subtrahiert. Die Sachbilanz für Fassaden-PV enthält anteilig integrierte (Warmfassade) und vorgehängte (Kaltfassade) Module entsprechend Marktanteil 2016. Für Flachdach-PV-Anlagen wird die Sachbilanz anteilig aus mono- und multi-kristallinen Silizium-Solarzellen modelliert.

7.3 LEBENSDAUERN

Da die Optimierung des Energiesystems für Stützjahre erfolgt, müssen die Investitionen und Umweltwirkungen auf ein Jahr bezogen werden. Dazu werden sie durch die Lebensdauer dividiert.

Tabelle 8 Lebensdauerannahmen pro wärmeerzeugender Technologie

Wärme	[Jahre]	Quelle
Luft-Wasser-Wärmepumpe	20	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx, 30 -50 kW (50): 18 a
Sole-Wasser-Wärmepumpe	20	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.3 Dezentrale_Waermeversorgung_Sole_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx, 41-50 kW (50) BB14
Abwasser-W.-Wärmepumpe	20	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Wasser-Wasser_Waermepumpen v1.xlsx, 41-50 kW (50) BB14
Solarthermie (Flachkollektor)	20	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 3.9 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-Solarthermie v1.xlsx, 140 kW, L10
Wärmespeicher	30	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagespeicher v1.xlsx, 5000l, 15-50a
Elektrowärme	20	Annahme
Erdwärmesonde	50	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 2.4.1 Oberflaechennahe_Geothermie_Quellenerschliessung v1.xlsx, 111-200 kW, E7
Abwasserwärmetauscher	50	Annahme
Gaskessel	20	Annahme

Tabelle 9 Lebensdauerannahmen pro stromerzeugender Technologie

Strom	[Jahre]	Quelle
PV, Flachdach, Fassade	25	Mittelwert aus KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 3.11 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-PV v1.xlsx, 10 kW, M8 (20a) und Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 33 (30a)
Batterie, Li-Ionen	15	Danish Energy Agency (2018)
Batterie, Vanadium-Redox-Flow	20	Danish Energy Agency (2018)

7.4 TECHNISCHE PARAMETER

Tabelle 10 enthält eine Übersicht der berücksichtigten Wirkungsgrade und Leistungszahlen der Technologien. Zur Berechnung der Leistungszahlen für die Wärmepumpen muss eine Eingangstemperatur angenommen werden. Für die Sole wurde eine fixe Temperatur von 9°C und für das Abwasser von 11°C (aufgrund von Messungen am Abwassersammler; untere Temperatur) angenommen.

Tabelle 10 Leistungszahlen und Wirkungsgrade pro Technologie

	COP	Quelle
Luft-Wasser-Wärmepumpe	temperaturabhängig	
Sole-Wasser-Wärmepumpe (Raumwärme)	5,3	Eigene Berechnung (308 K/(35-9)K*0,45)
Sole-Wasser-Wärmepumpe (Warmwasser)	2,9	Eigene Berechnung (308 K/(60-9)K*0,45)
Abwasser-W.-Wärmepumpe (Raumwärme)	5,8	Eigene Berechnung (308 K/(35-11)K*0,45)
Abwasser-W.-Wärmepumpe (Warmwasser)	3,1	Eigene Berechnung (308 K/(60-11)K*0,45)
	%	
Elektrowärme	100	Annahme
Gaskessel	93	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1
Photovoltaik	19,3	PVPS (kristallines Silizium)

Für die Speicher zeigt die folgende Tabelle die Parameter für die Modellierung.

Tabelle 11 Parameter für die Modellierung der Speicher

	capacity loss	[Quelle]	efficiency inflow	efficiency outflow	[Quelle]	capacity min	[Quelle]	capacity max	[Quelle]	invest_relation_in-put_capacity	[Quelle]	invest_relation_out-put_capacity	[Quelle]
Li-Ionen-Batt.	4.2E-04	[1, S. 170]	0.97	0.86	[2]	0.1	[3]	0.9	[3]	3.00	[4]	0.50	[4]
Vd-Redox-Flow-Batterie	4.2E-04	Wie Li-Ionen	0.97	0.80	[5]	0.15	[3]	0.85	[3]	0.25	[1]	0.25	[1]
Wärmespeicher	1.0E-02	[6]	1	0.9		0		1		0.45	[7]	0.45	[7]
[1] Danish Energy Agency (2018)													
[2] eff. Inverter =0.965; roundtrip eff.=90%; da Silva Lima 2021													
[3] Roberts (2022)													
[4] Danish Energy Agency (2018), berechnet aus storage capacity und input bzw. output capacity													
[5] eff. Inverter =0.965; roundtrip eff.=83%; da Silva Lima 2022													
[6] KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx, 5000l, AD9													
[7] eigene Berechnung													

7.5 WETTERABHÄNGIGE DATEN

Die Wetterdaten für ein typisches meteorologisches Jahr sowie die PV-Zeitreihe für die Koordinaten latitude = 47.658°, longitude = 9.169° wurden über das Tool PVGIS (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) ermittelt. Für PV wurde kristallines Silizium mit einem Systemverlust von 14 % angenommen. Für eine optimale Ausrichtung ergibt sich ein Winkel von 36° für die Neigung und 4° Azimut (Süden). Der Ertrag ergibt sich damit zu 1052 kWh/(kWp*a), maximal 0,88 kW/kWp. Die Fassaden-PV-Anlage hat 90° Neigung (senkrecht) und 47° Azimut (Süd-West).

Die Zeitreihe für Solarthermie (Ausrichtung: 36° Neigung, 4° Azimut (Süden) (wie optimale PV)) wird über das Tool nPRO ermittelt. Für die maximale Leistung ergeben sich 674 W/m² (Warmwasser) und 770 W/m² (Raumwärme).

Der temperaturabhängige COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe wird mit oemof.thermal⁷ ermittelt. Aus der Zeitreihe ergibt sich eine Jahresarbeitszahl für Warmwasser (55°C, Qualitätsfaktor: 0,4) von 2,65 und für Raumwärme (40°C, Qualitätsfaktor: 0,4) von 4,41.

8 OPTIMIERUNGSZIELE

Nachdem alle Parameter für das Optimierungsmodell festgelegt wurden, muss definiert werden, welche Größe vom Modell optimiert werden soll. Dies sind üblicherweise die Kosten. Das hier verwendete Modell LAEND ist jedoch in der Lage, weitere Größen – hier Umweltwirkungen – zu berücksichtigen. Letztere können sowohl einzeln als auch in Kombination optimiert werden.

8.1 KOSTEN

Bei der Kostenoptimierung werden Gesamtkosten (Gestehungskosten) herangezogen. Förderungen, Einspeisevergütungen etc. sind nicht berücksichtigt.

8.2 UMWELTWIRKUNGEN

Die Umweltwirkungen werden mit der Wirkungsabschätzungsmethode EU Environmental Footprint v2.0 ermittelt. Als Einzelindikator wird Klimawandel als Optimierungsziel verwendet.

8.3 MEHRKRITERIELLE ZIELE

Bei den mehrkriteriellen Zielen wird eine gewichtete Summe aus Umweltwirkungen – der EU Environmental Footprint⁸ – verwendet. Folgende Wirkungsindikatoren sind im EU Environmental Footprint enthalten:

- Klimawandel/Treibhauspotenzial
- Süßwasser- u. Bodenversauerung
- Süßwasserökotoxizität Süßwassereutrophierung
- Meereseutrophierung
- Bodeneutrophierung
- Humantoxizität, karzinogen
- Ionisierende Strahlung

⁷ jnnr, Caroline Möller, FranzPI, MaGering, jakob-wo, Patrik Schönfeldt, felixj9, Uwe Krien, Sabine Haas, Cord Kaldemeyer, Stephan Günther (2021): oemof/oemof-thermal: Mere maintenance. Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.5703419

⁸ European Commission. European Platform on Life Cycle Assessment: EF reference package 2.0 (pilot phase). https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/EF_2.0_Complete.zip. Zugriff: 07.06.2021.

- Humantoxizität, nicht-karzinogen
- Ozonschichtzerstörung
- Photochemisches Oxidantienpotenzial
- Atemwegseffekte
- Wasserverbrauch
- Fossile Ressourcen
- Landnutzung
- Mineralische u. metallische Ressourcen

Darüber hinaus wird ein mehrkriterielles Optimierungsziel aus EU Environmental Footprint und Kosten gebildet, wobei eine Gewichtung von 70:30⁹ verwendet wird. Die Normierung und Gewichtung der Umweltindikatoren innerhalb des Environmental Footprints zeigt die folgende Tabelle bzw. Abbildung.

Tabelle 12 Normierungswerte des EU Environmental Footprint

Summe aller weltweiten Umweltwirkungen je Indikator im Jahr 2010		
Indikator	Welt 2010	
Klimawandel/Treibhauspotenzial	8.94E+13	kg CO ₂ -Äq
Versauerung	4.93E+11	mol H ⁺ -Äq
Ökotoxizität	2.66E+13	CTUe
Eutrophierung, Süßwasser	1.59E+10	kg P-Äq
Eutrophierung, Meer	1.99E+11	kg N-Äq
Eutrophierung, Boden	1.57E+12	mol N-Äq
Humantoxizität, kanzerogen	8.67E+04	CTUh
Ionisierende Strahlung	2.63E+13	kBq U-235-Äq
Humantoxizität, nicht-kanzerogen	1.07E+06	CTUh
Ozonschichtzerstörung	1.86E+08	kg CFC-11-Äq
Photochemisches Oxidantienpotenzial	2.85E+11	kg NMVOC-Äq
Atemwegseffekte (Feinstaub)	7.34E+06	Krankheitsfälle
Wasser	7.14E+13	m ³ Wasser-Äq
Fossile	5.19E+14	MJ
Landnutzung	8.31E+15	Punkte
Mineralien u. Metalle	4.60E+08	kg Sb-Äq
Kosten	4.63E+13	€ ₂₀₁₈

⁹ Erste Optimierungen mit der Grundeinstellung 50:50 zeigten wenig Unterschied zur reinen Kostenoptimierung.

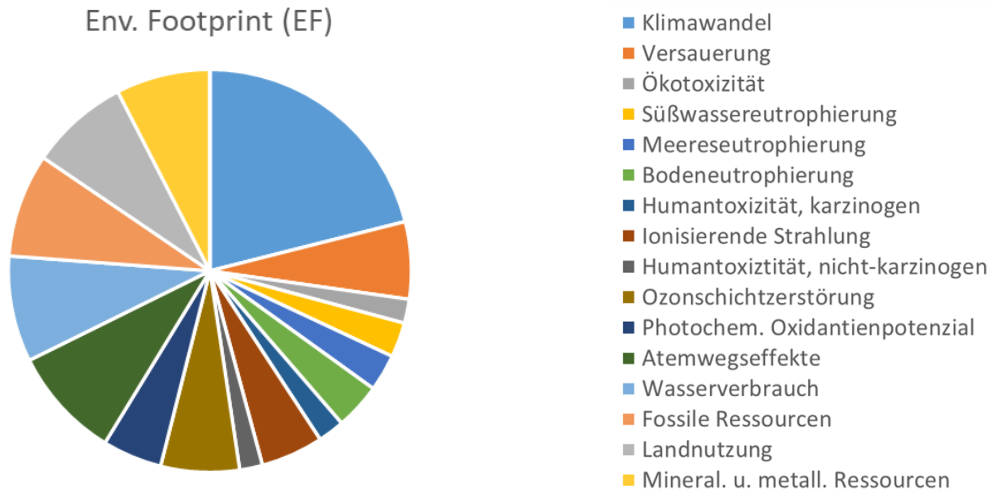


Abbildung 7 Gewichtungen für den Environmental Footprint

9 ERGEBNISSE

9.1 KOSTEN

Die Gesamtkosten über 20 Jahre liegen beim Energiesystem mit EH55-Standard je nach Optimierungsziel zwischen 5,47 (Kostenoptimierung) und 6,95 Mio. Euro (EU Env. Footprint-Optimierung). Werden Klimawirkungen minimiert, ergeben sich Gesamtkosten von 6,57 Mio. Euro. Bei der mehrkriteriellen Optimierung von Umweltwirkungen und Kosten ergeben sich Gesamtkosten von 6,46 Mio. Euro. Der größte Kostenblock fällt bei allen Optimierungszielen durch den Netzstrombezug an.

Für das EH40-Energiesystem liegen die Gesamtkosten über 20 Jahre je nach Optimierungsziel zwischen 5,65 (Kostenoptimierung) und 7,1 Mio. Euro (EU Env. Footprint-Optimierung). Die Minimierung der Klimawirkungen beläuft sich auf 6,74 Mio. Euro. Werden Umweltwirkungen und Kosten mehrkriteriell optimiert, ergeben sich Gesamtkosten von 6,61 Mio. Euro. Die Kosten bei mehrkriterieller oder Klimaoptimierung liegen damit deutlich über denen der Kostenoptimierung.

Beim EH55-Energiesystem, das weniger Wärmedämmung aufweist, sind die Gesamtkosten nur leicht unter denen des EH40-Energiesystems. Die Gesamtkosten liegen bei höherem Dämmstandard zwischen 0,13 und 0,18 Mio. Euro über denen des EH55-Standards (bezogen auf 20 Jahre), was in etwa 2 bis 3 % der Gesamtkosten des EH55-Standards entspricht.

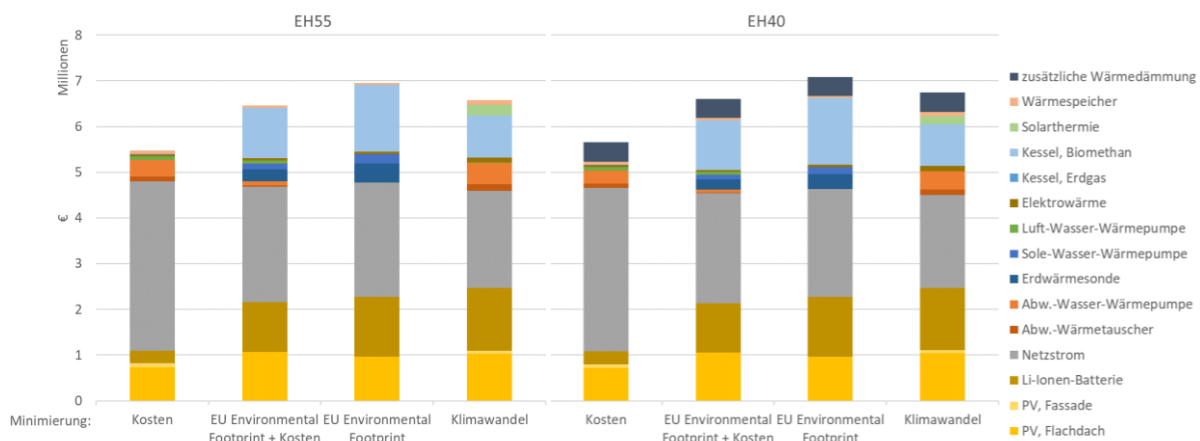


Abbildung 8 Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele und Dämmstandards

Bezüglich der Aufteilung der Kosten in Investitionen und variable Kosten zeigt sich, dass die Investitionen bei der Kostenoptimierung deutlich unter denen bei den anderen drei Optimierungszielen liegen. Je mehr der Kostenaspekt in den Optimierungszielen abnimmt und der Klimaaspekt an Bedeutung gewinnt, desto mehr steigen die Investitionen. Die eingesparten Kosten für die Wärmedämmung werden in etwas geringerem Umfang in Investition bzw. Betrieb von Energieerzeugungsanlagen gesteckt.

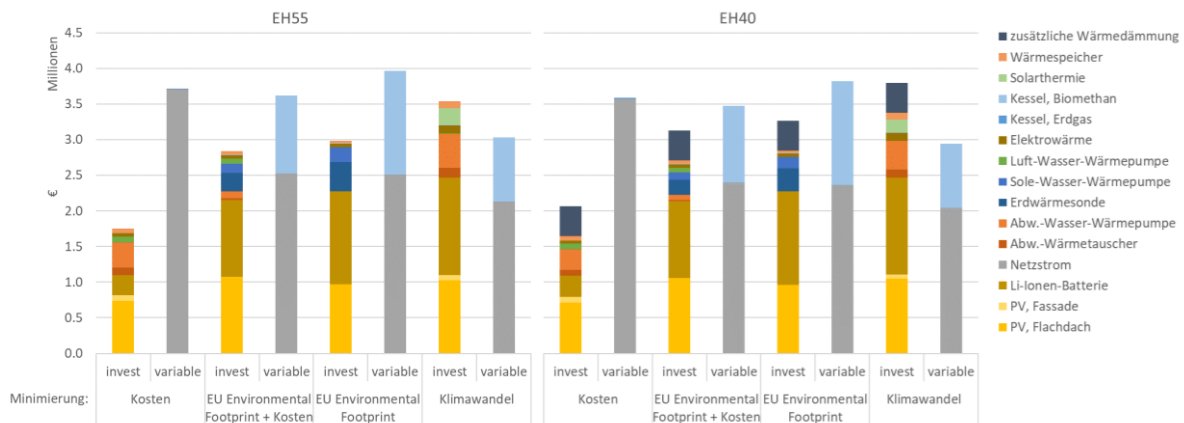


Abbildung 9 Investitionen und variable Kosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele und Dämmstandards

9.2 INSTALLIERTE LEISTUNG

Bei der Stromerzeugung wird bei allen Optimierungszielen in Photovoltaikanlagen auf dem Dach investiert, allerdings variiert die Leistung: Bei der Kostenoptimierung ist sie am geringsten, bei der Minimierung der Klimawirkung wird die ganze Dachfläche ausgeschöpft und mit Photovoltaik- bzw. Solarthermie-Anlagen bestückt. Die Fassaden-Photovoltaik-Anlage wird nur bei der Kosten- und der Klimawandelminimierung verwendet. Außer bei der Kostenoptimierung wird bei den anderen Optimierungszielen zu Beginn in relativ große Lithium-Ionen-Batterien investiert und über die Jahre erweitert. Im Jahr 2038 steht der im ersten Jahr gebaute Speicher aufgrund der Lebensdauer von 15 Jahren nicht mehr zur Verfügung. Hier wird unterschiedlich stark in Ersatz investiert. Beim Dämmstandard EH55 wird etwas mehr Leistung zur Stromerzeugung gebaut, da für die Wärmeerzeugung zusätzlicher Strom benötigt wird.

Die Wärme wird bei allen Optimierungszielen überwiegend mit Wärmepumpen erzeugt, wobei der Typ variiert und außer bei der Optimierung der Umweltwirkungen über den EU Environmental Footprint auch mehrere Typen eingesetzt werden. Bei der Umwelloptimierung wird allein auf die Sole-Wasser-Wärmepumpe gesetzt. Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe kommt bei allen anderen Optimierungszielen zum Einsatz, wobei die Leistung bei der Umwelloptimierung und der Klimawandelminimierung sehr gering ist. Die größere Leistung haben entweder die Abwasser-Wasser- oder die Sole-Wasser-Wärmepumpe. Je nach Optimierungsziel werden 21 bis 42 Erdwärmesonden bei 150 m Tiefe benötigt. Bei allen Optimierungszielen werden ein Heizstab (158 – 439 kW) und Wärmespeicher verwendet. Das Volumen der Speicher beträgt zwischen 11 und 175 m³. Außer im kostenoptimalen Energiesystem wird immer ein Biomethankessel mit einer Leistung zwischen 74 und 97 kW verwendet. Stattdessen wird im kostenoptimalen Energiesystem ein Erdgaskessel von 13 kW gebaut. Solarthermische Anlagen werden nur bei der Minimierung der Klimawirkung zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt (309 bzw. 408 m²). Die Vanadium-Redox-Flow-Batterie kommt in keinem der optimierten Energiesysteme zum Einsatz.

Im Vergleich der Dämmstandards werden beim EH55 tendenziell höhere Wärmeleistungen installiert als beim EH40-Standard (insg. 14-19 %). Die in den folgenden Abbildungen genannten Leistungen für Wärmepumpen entsprechen den maximalen Wärmeleistungen.

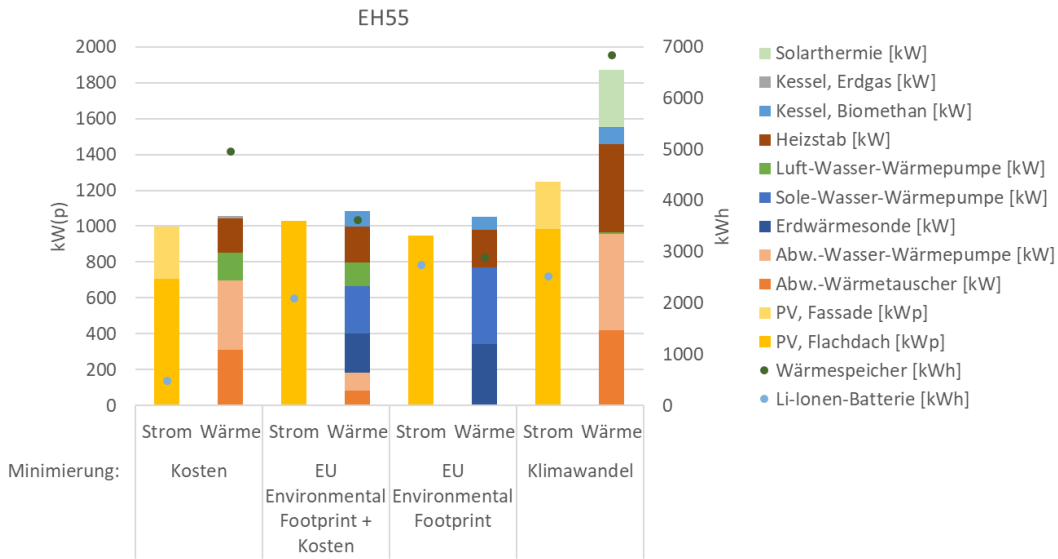


Abbildung 10 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH55 (PV = Photovoltaik, RW = Raumwärme, WW = Warmwasser)

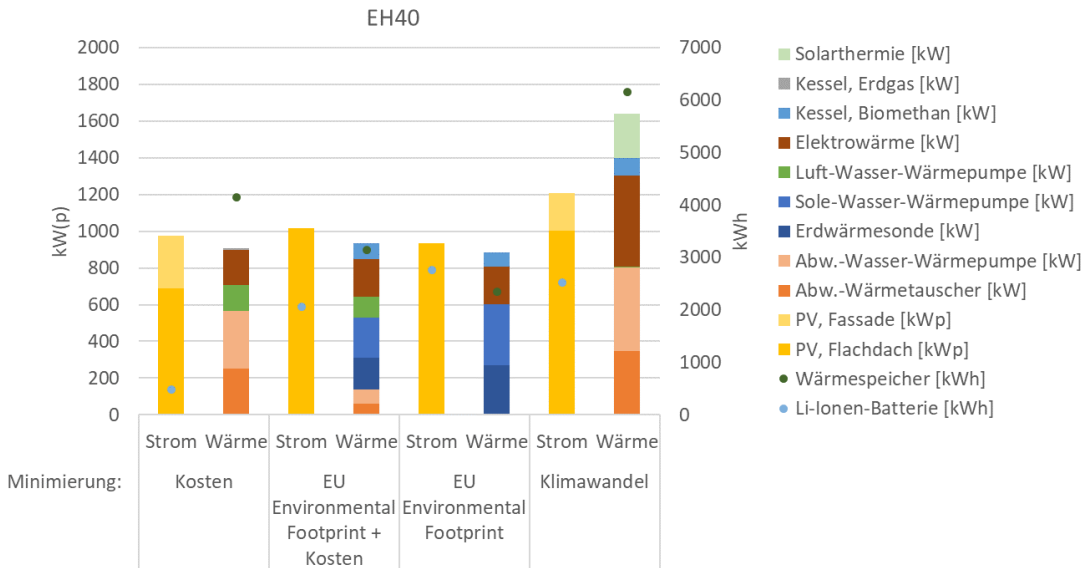


Abbildung 11 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH40 (PV = Photovoltaik, RW = Raumwärme, WW = Warmwasser)

9.3 ÜBERSCHUSSSTROM

Durch die PV-Anlagen wird je nach Optimierungsziel sprich Anlagengröße eine gewisse Menge an Überschussstrom erzeugt. Bei einer Einspeisevergütung von 7,1 ct/kWh ergeben sich über 20 Jahre die folgenden Erlöse:

Table 13 EH55: Überschussstrom und Einspeisevergütung über 20 Jahre

Ziel	Überschuss [kWh]	Einspeisevergütung über 20 Jahre [€]
Kosten	4.631.170	328.813
EU Environmental Footprint + Kosten	3.295.529	233.983
EU Environmental Footprint	2.526.765	179.400
Klimawandel	3.768.172	267.540

Table 14 EH40: Überschussstrom und Einspeisevergütung über 20 Jahre

Ziel	Überschuss [kWh]	Einspeisevergütung über 20 Jahre [€]
Kosten	4.425.319	314.198
EU Environmental Footprint + Kosten	3.136.764	222.710
EU Environmental Footprint	2.431.306	172.623
Klimawandel	3.564.141	253.054

9.4 INDIKATOREN IM VERGLEICH

Für jedes Energiesystem, das sich auch einem Optimierungslauf ergibt, können sowohl die Kosten als auch die Umweltwirkungen – aggregiert als Environmental Footprint oder als Einzelindikator – berechnet werden. Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils für die beiden Dämmstandards die Indikatoren Kosten, Environmental Footprint, Klimawandel und exemplarisch Atemwegseffekte für die verschiedenen Optimierungsziele. Das Ziel mit dem höchsten Wert je Indikator wurde auf 100 % gesetzt. Der niedrigste Wert eines Indikators ist immer beim entsprechenden Optimierungslauf zu finden. So hat bspw. die Optimierung der Kosten den geringsten Wert beim Indikator Kosten.

Vergleicht man die Kostenoptimierung mit den mehrkriteriellen und der Klimawirkungsoptimierung, ergeben sich bei geringsten Kosten die höchsten Umweltwirkungen insgesamt (Env. Footprint) als auch die höchsten Klimawirkungen. Bei der Minimierung des Indikators Klimawandel ergeben sich nur leicht geringere Gesamtumweltwirkungen. Die Atemwegseffekte zeigen hier den höchsten Wert. Grund dafür sind die größeren PV-Anlagen in dieser Optimierung.

Insgesamt liegen die Indikatorwerte je Ziel relativ nah beieinander (max. 20 % Unterschied). Grund hierfür ist, dass die Auswahl an Technologien relativ klein ist, so dass auch die Optimierungsergebnisse relativ ähnlich sind. Als Kompromisslösung zeigt sich die mehrkriterielle Optimierung von EU Environmental Footprint und Kosten. Die Gesamtumweltwirkungen (Env. Footprint) sind gegenüber der Kosten- und Klimaoptimierung deutlich reduziert, die Klimawirkung ist nur leicht höher als würde diese isoliert optimiert. Die Kosten liegen 17 - 18 % über denen bei Kostenminimierung.

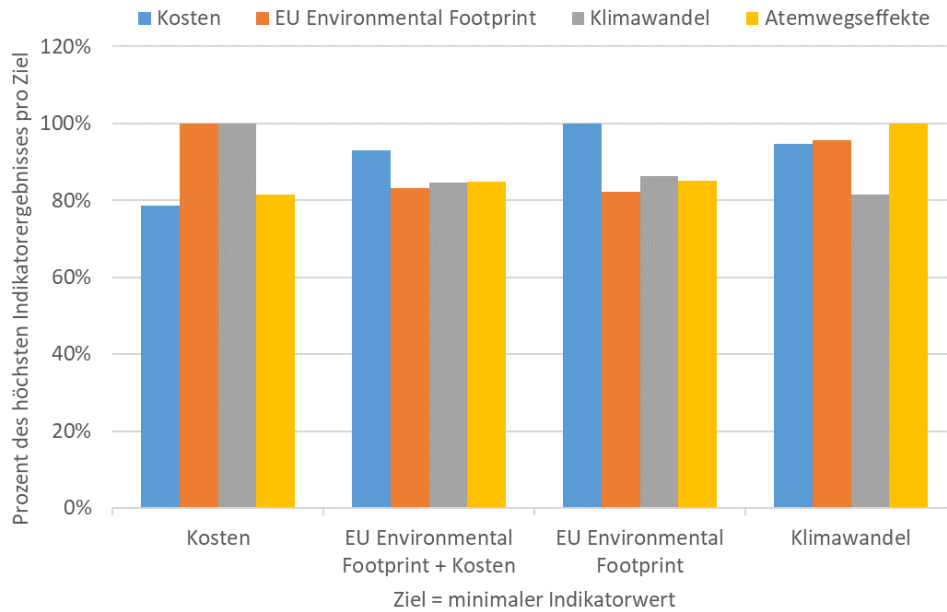


Abbildung 12 Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für EH55-Standard

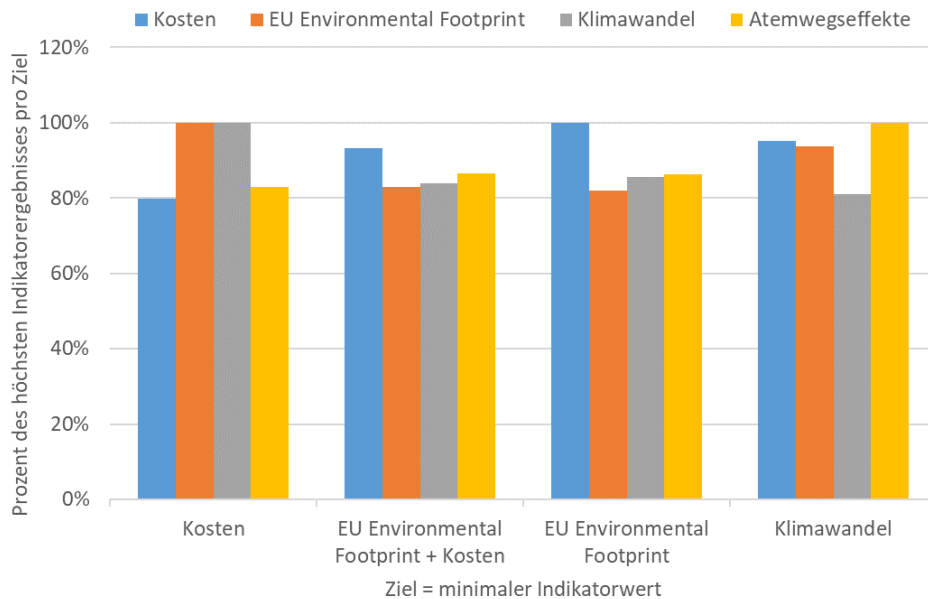


Abbildung 13 Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für EH40-Standard

10 SENSITIVITÄTSANALYSEN

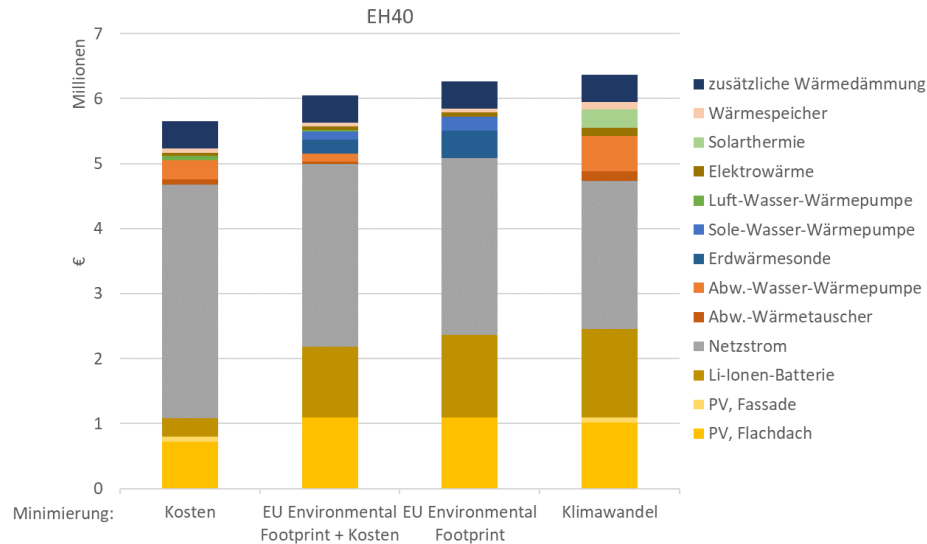
Die Sensitivitätsanalysen werden nur für den EH40-Standard durchgeführt, da dieser für das Quartier maßgebend ist.

10.1 OHNE SPITZENLASTKESSEL

Da noch offen ist, ob mit oder ohne Spitzenlastkessel geplant wird, wird die Optimierung hier ohne die Optionen Erdgas- und Biomethan-Kessel durchgeführt.

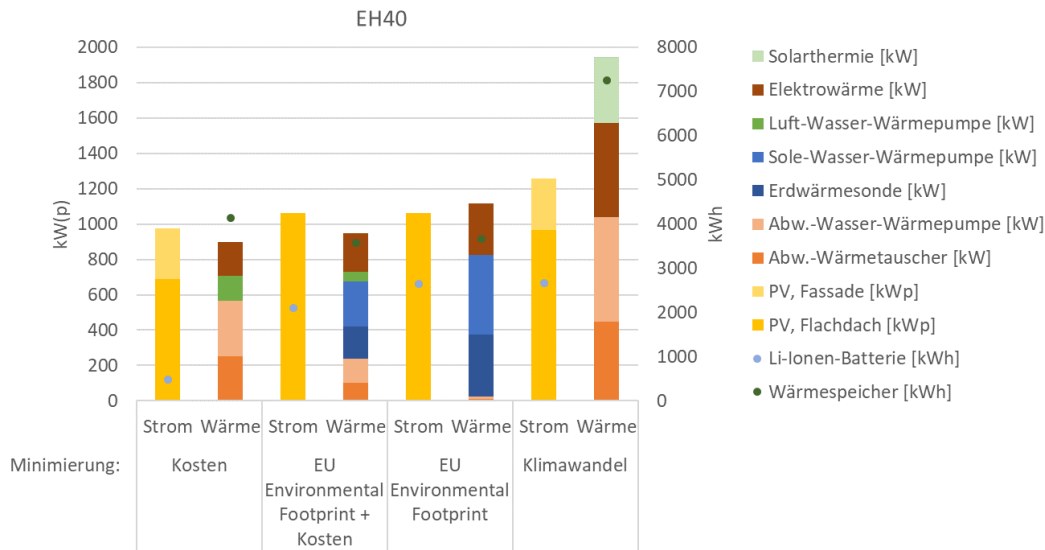
10.1.1 Kosten

Ohne Kessel sinken die Gesamtkosten bei allen Zielen außer der Kostenoptimierung, da hier sowieso nur in eine sehr geringe Kesselleistung investiert wurde. Grund für die Kostenreduktion ist, dass die Wärme, die zuvor mit relativ teurem Biomethan erzeugt wurde, nun mit Wärmepumpen erzeugt wird, die in der Summe günstiger sind (aber zu höheren Umweltwirkungen führen).



10.1.2 Installierte Leistung

Wenn die Wärme ohne Spitzenlastkessel erzeugt werden soll, sind die Änderungen bei den installierten Leistungen je nach Optimierungsziel recht unterschiedlich. Bei der Kostenoptimierung wird vornehmlich in mehr Speicherkapazität investiert, da hier sowieso nur eine sehr geringe Kessel-Leistung vorgesehen war. Beim Strom ändert sich fast nichts. Bei den anderen Zielen wird auch die PV-Leistung erhöht; der Stromspeicher mal erhöht, aber auch reduziert. In Bezug auf die Wärmeerzeuger wird bei den anderen Zielen mehr in die Abwasserwärmenutzung und Elektrowärme investiert. Bei der multi-kriteriellen Optimierung wird die Leistung der Sole-Wasser-Wärmepumpe erhöht, aber die der Luft-Wasser-Wärmepumpe reduziert. Die Summe der installierten Leistungen bei der Wärme bleibt bei diesem Ziel fast gleich. Anders bei der Optimierung des Environmental Footprints und der Klimawirkung. Hier steigt die insgesamt installierte Leistung im Wärmebereich deutlich an. Im ersten Fall wird sowohl die Leistung von Sole-Wasser-Wärmepumpe als auch von Elektrowärme deutlich erhöht. Im zweiten Fall wird noch die Solarthermie-Leistung und auch die Wärmespeicherung erweitert.



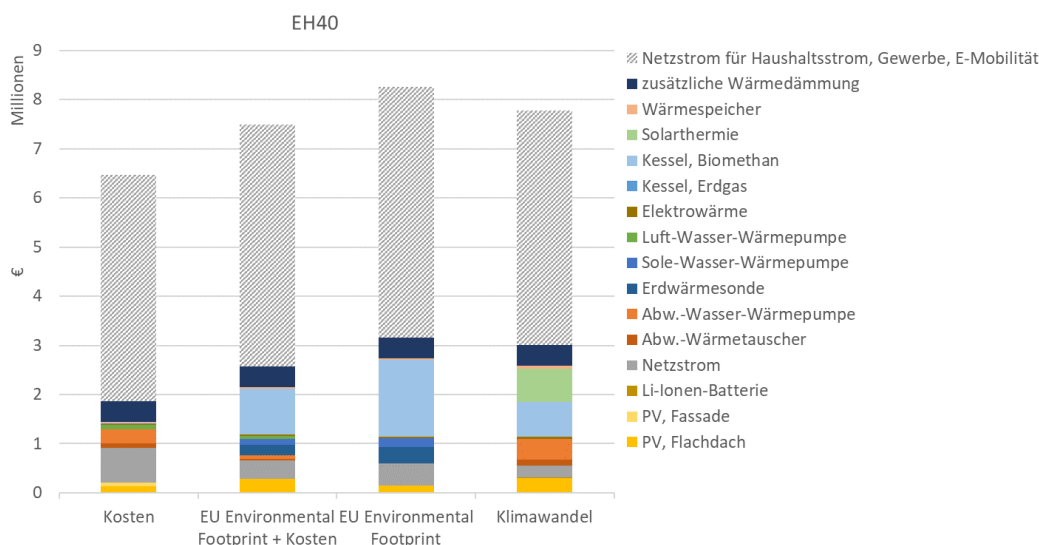
10.2 NUR WÄRMEBEDARF

Um Aussagen über den Nutzen der Sektorkopplung treffen zu können, wurde die Optimierung zusätzlich ausschließlich für die Wärmeversorgung durchgeführt, indem der Strombedarf für Haushalte, Gewerbe und E-Mobilität auf null gesetzt wurde.

10.2.1 Kosten

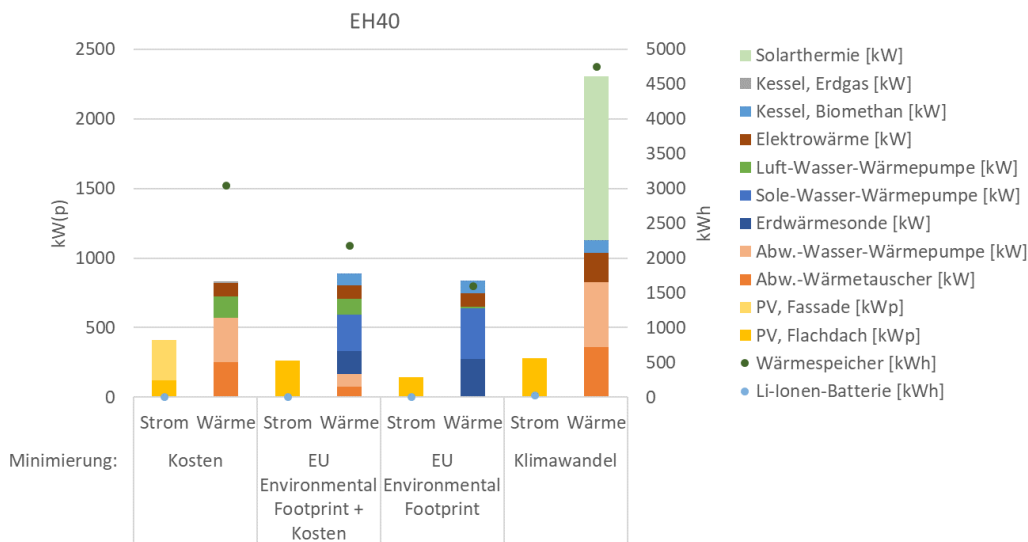
Um die Kosten mit dem Ausgangsszenario vergleichen zu können, wurde angenommen, dass der Strombedarf für Haushalte, Gewerbe und E-Mobilität komplett über das Stromnetz gedeckt wird. Der von den Photovoltaik-Anlagen erzeugte Überschussstrom, der nicht für die Wärmeversorgung benötigt wird, wird abgezogen, unter der Annahme, dass dieser komplett in die Eigenversorgung geht. Diese verbleibenden Kosten für den Netzstrombezug wurden zu den Kosten für die Wärmeversorgung addiert.

Im Vergleich zur sektorgekoppelten Optimierung steigen die Gesamtkosten über 20 Jahre um 0,8 bis 1,2 Millionen Euro bzw. 13 bis 17 % an.



10.2.2 Installierte Leistung

Das Ergebnis zeigt, dass für den Strombedarf der Wärmepumpen bei allen Optimierungszielen Photovoltaik-Anlagen eingesetzt werden, jedoch in geringerem Umfang als wenn der Haushaltsstrombedarf mit modelliert wird. Bei der Kostenoptimierung ist ihr Einsatz am höchsten und geht vor allem auf Fassaden-PV-Anlagen zurück, welche bei den anderen Optimierungszielen nicht zum Einsatz kommt. Stromspeicher werden hier gar nicht installiert. Die Kapazität von Wärmespeichern ist geringer als bei der sektoren-gekoppelten Optimierung. Auch die Nutzung von Elektrowärme ist deutlich geringer. Bei der Optimierung der Klimawirkungen zeigt auch die Solarthermie Vorteile.



11 BEITRAG ZUR TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT

Keines der in den verschiedenen Optimierungen ermittelten Energiesysteme verursacht direkte fossile Treibhausgasemissionen. Für eine komplette Treibhausgasneutralität reichen die erneuerbaren Potenziale im Quartier nicht aus, weshalb Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Eine Treibhausgasneutralität ist deshalb erst dann möglich, wenn auch der Netzstrom treibhausgasneutral erzeugt wird. Darüber hinaus resultieren Treibhausgase aus der Herstellung der Anlagen, welche zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht treibhausgasneutral hergestellt werden.

12 UNSICHERHEITEN

Die Belastbarkeit der Ergebnisse einer Energiesystemoptimierung ist u.a. abhängig von den Eingangsparametern, welche im vorliegenden Fall Kosten, Umweltwirkungen und Technologieparameter sind. Sowohl bei den Kosten als auch bei den Umweltwirkungen ist es wichtig, dass sie für die einzelnen Technologien vergleichbar erhoben wurden. Dies setzt z.B. gleiche Systemgrenzen voraus. Die Kosten wurden überwiegend dem Technikkatalog der KEA-BW entnommen, so dass eine einheitliche Quelle vorliegt, die eine Vergleichbarkeit zum Ziel hat. Die im letzten Jahr erfolgten Kostensteigerungen wurden hier jedoch nicht berücksichtigt.

Die Lebenszyklusinventare, aus denen die Umweltwirkungen berechnet werden, basieren alle auf der Datenbank ecoinvent. Somit sind mindestens die zur Herstellung der Technologien notwendigen Vorprozesse einheitlich. Die Inventare der Technologien stammen aus unterschiedlichen Quellen, so

dass hier die Vergleichbarkeit nicht immer gewährleistet werden kann. So werden z.B. Wärmepumpen im Vergleich zu PV-Anlagen sehr viel vereinfachter modelliert. Dazu kommt, dass alle Wärmepumpen aus Mangel an Daten mit derselben Sachbilanz modelliert wurden.

Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus der Modellierung des Energiesystems an sich. So können nicht alle Spezifika der einzelnen Technologien im Detail abgebildet werden. Gerade im Bereich der Modellierung der Wärmeerzeugung müssen viele Vereinfachungen getroffen werden.

Auch die Modellierung des Mehraufwands für den höheren Wärmestandard sind mit großen Unsicherheiten verbunden. Da noch keine detaillierten Planungen zur Bauweise vorliegen, mussten Annahmen zur Art der Materialien, ihren Stärken und Kosten getroffen werden. Hier wurden Worst-case-Annahmen getroffen, so dass die Kosten und Umweltwirkungen eher eine Obergrenze darstellen.

13 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Vor dem Hintergrund der geschilderten Unsicherheiten werden keine Detailempfehlungen gegeben, sondern aus der Gesamtschau der Ergebnisse Hinweise für die weitere Planung abgeleitet.

Die Ergebnisse über alle Szenarien und Sensitivitäten zeigen, dass je nach Optimierungsziel die Systemkonfigurationen in Bezug auf die Höhe der installierten Leistungen sehr unterschiedlich ausfallen können; die Art der verwendeten Anlagen unterscheidet sich allerdings nicht extrem. Trotzdem zeigt sich, dass einzelne Technologien Vorteile in einem, aber Nachteile in einem anderen Aspekt haben. Dies trifft auf Erdgas- und Biomethan-Kessel zu. Wenn diese zur Verfügung stehen, wird außer im kostenoptimalen Fall der Biomethan-Kessel bevorzugt. Beim Kostenoptimum wird stattdessen Erdgas eingesetzt, da aus Kostensicht die hohen Kosten für den Bezug von Biomethan nachteilig sind, aus Umwelt- und Klimasicht dieses jedoch Vorteile hat. Erdgas kommt deshalb bei der Berücksichtigung von Umwelt- und Klimazielen gar nicht zum Einsatz. Auch Lithium-Ionen-Batterien zeigen Nachteile bei den Kosten, aber Vorteile bei Umwelt- und Klimazielen. Vanadium-Redox-Flow-Batterien sind im Vergleich zu Lithium-Ionen Batterien für keines der Ziele vorteilhaft.

Demgegenüber kommen Photovoltaik-Anlagen in allen Ergebnissen zum Einsatz, wobei das vorhandene Potenzial nicht immer voll genutzt wird. Hier zeigt sich, dass die Umweltwirkungen und Kosten noch relativ hoch sind. Ersteres trifft vor allem auf Fassaden-PV zu, deren Ausbeute geringer ist als bei Aufdach-PV, was die Umweltwirkungen pro erzeugter Kilowattstunde Strom erhöht. Der Kostenvorteil resultiert aus den vermiedenen Kosten für die Fassadenverkleidung, was für die Umweltwirkungen aber offensichtlich keinen Vorteil bringt. Bei einer Berücksichtigung der Einspeisevergütung sähe das Kostenoptimum eventuell anders aus. Auch Wärmespeicher sind in jedem Fall sinnvoll. Solarthermie hat demgegenüber in den meisten Fällen in der hier betrachteten Konstellation keine Vorteile. Bei der in relativ großem Umfang genutzten Elektrowärme ist zu berücksichtigen, dass diese nur vorteilhaft ist, solange sie aus Überschussstrom aus der Photovoltaik-Anlage gespeist wird. Dies ist bei einer Detailplanung zur berücksichtigen. Luft-Wasser-Wärmepumpen werden nur in sehr geringem Umfang eingesetzt, da sie im Vergleich zu Sole- und Abwasser-Wasser-Wärmepumpen eine geringere Effizienz aufweisen, was sich sowohl für Kosten als auch Umweltwirkungen nachteilig auswirkt, so dass die anderen Technologien bevorzugt werden. Das heißt jedoch nicht, dass sie nicht prinzipiell geeignet wären.

Bei der zeitlichen Betrachtung fallen vor allem die Batterien auf, die über 20 Jahre immer weiter ausgebaut werden, da der Strombedarf durch die E-Mobilität steigt. Da der Wärmebedarf im Betrachtungszeitraum gleichbleibt, spielt ein Ausbau der Wärmeerzeugungsanlagen über die Zeit fast keine Rolle. Falls hier nachinvestiert wird, erfolgt dies als Folge der höheren Stromnachfrage.

Bei den Sensitivitätsanalysen zeigt sich, dass ein Spitzenlastkessel mit Biomethan nur bei Einbezug von Umwelt- und Klimazielen vorteilhaft ist, aus Kostensicht aber nachteilig. Auch die alleinige Fokussierung auf die Wärmeversorgung zeigt insgesamt Kostennachteile.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Energiesystem, welches nur auf geringste Kosten oder nur auf geringste Klimawirkungen optimiert wurde, Umweltwirkungen in andere Bereiche verlagert werden. Dies kann mit einer mehrkriteriellen Optimierung, in der alle Aspekte Eingang finden, vermieden werden.

14 EMPFEHLUNGEN

Für das hier untersuchte Quartier wird empfohlen, die Technologien, die sich bei der mehrkriteriellen Minimierung von Umweltwirkungen und Kosten ergeben, umzusetzen. In Bezug auf die stromseitigen Anlagen bedeutet dies, dass Flachdach-Photovoltaik-Anlagen mit einer Leistung von gut 1.000 kWp errichtet werden sollten. Diese sollten mit einem Lithium-Ionen-Speicher kombiniert werden, der zu Beginn eine Kapazität von ca. 960 kWh haben und über die Zeit weiter ausgebaut werden sollte. In Bezug auf den Wärmestandard ist es aus Kostensicht kaum relevant, ob nach EH40 oder EH55 gedämmt wird, da die Mehrkosten über 20 Jahre bei EH40 auf Basis der hier gemachten Annahmen nur etwa 2 % betragen, was im Bereich der Unsicherheiten insgesamt liegt.¹⁰ Beim EH40-Standard muss insgesamt weniger Leistung zur Wärmeerzeugung installiert werden, die Art der Erzeuger sind jedoch bei beiden Standards die gleichen.

Da die derzeitigen Planungen für das Döbele auf dem EH40-Standard beruhen, beziehen sich die folgenden Zahlen nur auf diesen. Den größten Anteil zur Raumwärmeerzeugung übernehmen Sole-Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit 21 Erdwärmesonden von 150 m Länge. Eine Abwasser-Wasser-Wärmepumpe wird zusätzlich mit ca. 60 kW maximaler Leistung installiert. Zu einem geringen Teil von knapp 40 kW wird Raumwärme auch mit Luft-Wasser-Wärmepumpen erzeugt. Zur Warmwassererzeugung tragen diese mit 78 kW am geringsten bei. Hier wird zu einem größeren Teil mit Biomethan-Kessel (86 kW) und Elektrowärme mit einer Leistung von ca. 200 kW gearbeitet. Falls Biomethan perspektivisch nicht zur Verfügung steht, sollte die Sole-Wasserwärmepumpe entsprechend größer dimensioniert werden. Das gleiche gilt, falls das Abwasser nicht für die Wärmeerzeugung herangezogen werden kann. Für Heizwasser werden Speicher mit einem Volumen von 75 m³ und für Trinkwarmwasser von 27 m³ installiert.

¹⁰ Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die anfallenden Kosten in den Szenarien anders verteilen und deshalb von unterschiedlichen Akteuren zu tragen sind. Beim EH40-Standard sind die Investitionen (inkl. Wärmedämmung) höher als beim EH55-Standard, bei den variablen Kosten ist es anders herum. Die variablen Kosten sind bei einer klassischen Kostenaufteilung von den Nutzenden zu zahlen, wobei hier noch ein zeitlicher Aspekt zum Tragen kommt, indem diese Kosten über die Zeit verteilt anfallen und deswegen aber auch mit größeren Unsicherheiten belegt sind. Die Investitionen sind vom Investierenden zu tragen und mit vergleichsweise weniger Unsicherheiten verbunden.

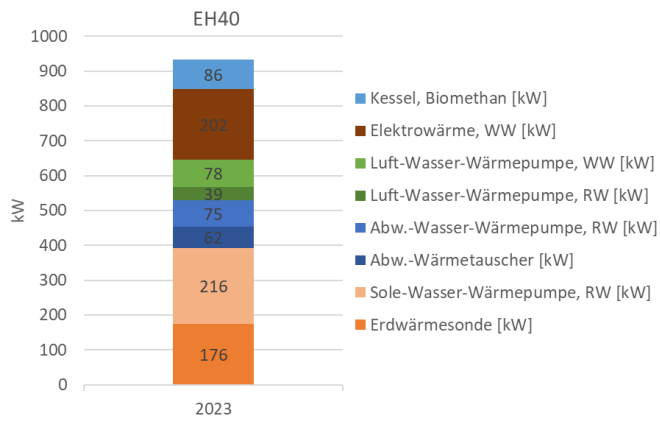


Abbildung 14 Optimum der installierten Leistungen für Wärmeerzeuger bei multi-kriterieller Minimierung von Umweltwirkungen und Kosten bei EH40-Standard

ANHANG

INSTALLIERTE LEISTUNGEN BZW. SPEICHERKAPAZITÄTEN JE SZENARIO

Tabelle 15 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH55 (PV = Photovoltaik, RW = Raumwärme, WW = Warmwasser, THG = Treibhausgase)

	Strom								Wärme								
	Li-Ionen-Batterie [kWh]				PV, Fassade [kWp]		PV, Flachdach [kWp]		Abw.-Wärmetauscher [kW]		Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]		Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]		Erdwärmesonde [kW]		Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]
Optimierungsziel	2023	2028	2033	2038	2023	2028	2033	2038	2023	2028	2023	2028	2033	2038	2023	2028	
Kosten	362			111	290	703	4	309		317	70						362
EU Environmental Footprint + Kosten	958	108	323	695		1003	28	82		100				217	268		958
EU Environmental Footprint	1069	114	372	1189		867	82								343		423
Klimawandel/THG	1584	16		927	266	983			409	9	469	37	9	23			
Wärme																	
	Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]		Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]		Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]		Elektrowärme, WW [kW]		Kessel, Biomethan [kW]		Solarthermie, RW [m ²]		Wärmespeicher, RW [kWh]		Wärmespeicher, WW [kWh]		
	Optimierungsziel	2023	2023	2023	2033	2038	2023	2028	2033	2038	2023	2033	2038	2023	2023	2023	2028
Kosten		92	56	4	3	161		3	30					2987	1899		
EU Environmental Footprint + Kosten		55	77			198			2	86				2273	1349		
EU Environmental Footprint	3					200	9			74	2	1		2258	576	51	
Klimawandel/THG		10				439	18	34		96	1		408	4069	2442	83	
	Wärmespeicher, WW [kWh]		Kessel, Erdgas [kW]														
	Optimierungsziel	2033	2038	2023													
Kosten		68	13														
EU Environmental Footprint + Kosten																	
EU Environmental Footprint																	
Klimawandel/THG	225	20															

Kleine installierte Leistungen im Jahr 2028 resultieren daraus, dass das Jahr ein Schaltjahr ist und sich dadurch Strom- bzw. Wärmebedarf wegen des zusätzlichen Tages leicht erhöhen.

Tabelle 16 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH40 (PV = Photovoltaik, RW = Raumwärme, WW = Warmwasser, THG = Treibhausgase)

	Strom							Wärme									
	Li-Ionen-Batterie [kWh]				PV, Fassade [kWp]	PV, Flachdach [kWp]		Abw.-Wärmetauscher [kW]		Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]			Erdwärmesonde [kW]	Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	
Optimierungsziel	2023	2028	2033	2038	2023	2023	2028	2023	2028	2023	2023	2028	2038	2023	2023	2023	
Kosten	371			117	290	676	11	251		246	70						
EU Environmental Footprint + Kosten	961	109	332	664		989	27	62		75				176	216		
EU Environmental Footprint	1066	131	371	1188		859	78							269	331	2	
Klimawandel/THG	1592	10		914	206	1002		341	8	385	34	12	23				
Wärme																	
	Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]		Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]		Elektrowärme, WW [kW]			Kessel, Biomethan [kW]			Solarthermie, RW [m ²]	Wärmespeicher, RW [kWh]		Wärmespeicher, WW [kWh]		Kessel, Erdgas [kW]	
	Optimierungsziel	2023	2023	2023	2028	2033	2038	2023	2033	2038	2023	2023	2023	2028	2033	2038	2023
Kosten	76	65	158			30						2174	1968				13
EU Environmental Footprint + Kosten	39	78	202				86					1752	1387				
EU Environmental Footprint			200	5			74	2	1		1724	587	31				
Klimawandel/THG	6		429	12	45	8	97	1		309	3373	2499	126	72	82		
Kleine installierte Leistungen im Jahr 2028 resultieren daraus, dass das Jahr ein Schaltjahr ist und sich dadurch Strom- bzw. Wärmebedarf wegen des zusätzlichen Tages leicht erhöhen.																	

Tabelle 17 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH40 ohne Spitzenlastkessel (PV = Photovoltaik, RW = Raumwärme, WW = Warmwasser, THG = Treibhausgase)

	Strom							Wärme									
	Li-Ionen-Batterie [kWh]				PV, Fassade [kWp]	PV, Flachdach [kWp]		Abw.-Wärmetauscher [kW]		Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]		Erdwärmesonde [kW]		Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	
Optimierungsziel	2023	2028	2033	2038	2023	2023	2028	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	2023	
Kosten	371			117	290	676	12	251		246	70						
EU Environmental Footprint + Kosten	955	103	322	716		1015	46	104		83	52		181		209	44	
EU Environmental Footprint	1037	97	395	1116		1018	43		10			15	341	8	330	110	
Klimawandel/THG	1479	21	61	1103	290	968		450		344	246						
	Wärme																
	Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]		Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]		Elektrowärme, WW [kW]		Solarthermie, RW [m ²]	Solarthermie, WW [m ²]	Wärmespeicher, RW [kWh]		Wärmespeicher, WW [kWh]						
Optimierungsziel	2023	2023	2033	2023	2028	2023	2023	2023	2023	2028	2033						
Kosten	76	65		158	2			2174	1968								
EU Environmental Footprint + Kosten	39	6	11	219				1735	1577		259						
EU Environmental Footprint				287	4			1752	1452	103	352						
Klimawandel/THG				531		290	194	3095	4162								
Kleine installierte Leistungen im Jahr 2028 resultieren daraus, dass das Jahr ein Schaltjahr ist und sich dadurch Strom- bzw. Wärmebedarf wegen des zusätzlichen Tages leicht erhöhen.																	

UMWELTWIRKUNGEN UND KOSTEN PRO INVESTIERTER EINHEIT PRO JAHR

	Klimawan- del	Süßwasser- u. Boden- versaue- rung	Süßwas- serökotoxi- zität	Süßwas- sereutro- phierung	Mee- reseutro- phierung	Bodeneu- trophie- rung	Humantoxi- zität, karzi- nogen	Ionisie- rende Strahlung	Humanto- xizität, nicht-karzi- nogen	Ozon- schichtzer- störung
	kg CO2-Eq	mol H+-Eq	CTU	kg P-Eq	kg N-Eq	mol N-Eq	CTUh	kg U235-Eq	CTUh	kg CFC-11- Eq
PV, Flachdach [kWp]	4.51E+01	2.88E-01	7.72E+01	2.34E-02	6.99E-02	6.46E-01	2.85E-06	3.03E+00	1.32E-05	3.42E-06
PV, Fassade [kWp]	5.93E+01	3.65E-01	1.29E+02	3.89E-02	8.79E-02	8.28E-01	3.00E-06	4.58E+00	1.48E-05	4.52E-06
Erdwärmesonde [kW]	6.61E+00	4.97E-02	3.61E+00	6.55E-04	2.01E-02	2.18E-01	2.09E-07	3.59E-01	2.15E-07	9.15E-07
Solarthermie, RW [m²]	8.11E+00	7.97E-02	3.38E+01	1.24E-02	1.35E-02	1.63E-01	1.67E-06	5.41E-01	9.02E-06	6.95E-07
Solarthermie, WW [m²]	8.11E+00	7.97E-02	3.38E+01	1.24E-02	1.35E-02	1.63E-01	1.67E-06	5.41E-01	9.02E-06	6.95E-07
Abw.-Wärmetauscher [kW]	4.97E+00	4.09E-01	3.88E+01	5.19E-03	1.14E-02	1.21E-01	3.38E-06	1.03E+00	3.19E-06	4.35E-07
Li-Ionen-Batterie [kWh]	2.04E+01	1.28E-01	4.08E+01	1.29E-02	2.07E-02	2.01E-01	2.26E-06	4.09E+00	4.55E-06	2.82E-05
Vd-Redox-Flow-Batterie [kWh]	1.60E+01	2.76E-01	2.84E+02	9.92E-03	2.32E-02	2.39E-01	2.65E-05	2.41E+00	4.95E-05	1.26E-05
Wärmespeicher, WW [kWh]	5.80E-01	3.06E-03	6.65E+00	2.72E-04	7.12E-04	6.82E-03	6.20E-07	5.75E-02	1.56E-07	3.43E-08
Wärmespeicher, RW [kWh]	2.58E-01	1.36E-03	2.95E+00	1.21E-04	3.16E-04	3.03E-03	2.75E-07	2.55E-02	6.93E-08	1.52E-08
Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	8.32E+00	2.80E-02	1.65E+01	5.74E-03	5.06E-03	6.12E-02	8.33E-07	2.42E-01	3.97E-06	1.23E-05
Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	8.32E+00	2.80E-02	1.65E+01	5.74E-03	5.06E-03	6.12E-02	8.33E-07	2.42E-01	3.97E-06	1.23E-05
Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	8.32E+00	2.80E-02	1.65E+01	5.74E-03	5.06E-03	6.12E-02	8.33E-07	2.42E-01	3.97E-06	1.23E-05
Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	8.32E+00	2.80E-02	1.65E+01	5.74E-03	5.06E-03	6.12E-02	8.33E-07	2.42E-01	3.97E-06	1.23E-05
Heizstab, WW [kW]	4.83E-02	2.78E-04	7.01E-01	2.29E-05	5.29E-05	5.83E-04	3.74E-08	5.13E-03	2.85E-08	2.28E-09
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	8.32E+00	2.80E-02	1.65E+01	5.74E-03	5.06E-03	6.12E-02	8.33E-07	2.42E-01	3.97E-06	1.23E-05
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	8.32E+00	2.80E-02	1.65E+01	5.74E-03	5.06E-03	6.12E-02	8.33E-07	2.42E-01	3.97E-06	1.23E-05
Kessel, Biomethan [kW]	2.16E+00	1.48E-02	1.83E+01	2.08E-03	2.99E-03	3.10E-02	1.51E-06	1.62E-01	1.49E-06	1.19E-07
Kessel, Erdgas [kW]	2.16E+00	1.48E-02	1.83E+01	2.08E-03	2.99E-03	3.10E-02	1.51E-06	1.62E-01	1.49E-06	1.19E-07

Umweltwirkungen und Kosten pro investierter Einheit und Jahr (Fortsetzung)

	Photochemisches Oxidantienpotenzial	Atemwegseffekte	Wasserverbrauch	Fossile Ressourcen	Landnutzung	Mineralische u. metallische Ressourcen	EU Environmental Footprint	EU Environmental Footprint + Kosten	Equilibrium	Kosten
	kg NMVOC-Eq	disease incidence	m3 water-Eq	MJ	points	kg Sb-Eq	-	-	-	€
PV, Flachdach [kWp]	1.83E-01	3.41E-06	1.52E+01	6.32E+02	4.05E+02	3.82E-03	1.58E-12	1.58E-12	1.54E-12	52.4
PV, Fassade [kWp]	2.32E-01	3.98E-06	1.97E+01	8.25E+02	5.16E+02	8.01E-03	2.57E-12	2.57E-12	2.51E-12	13.6
Erdwärmesonde [kW]	6.28E-02	1.17E-06	1.19E+00	1.07E+02	1.17E+01	1.59E-05	1.23E-13	1.23E-13	1.29E-13	60.0
Solarthermie, RW [m²]	4.05E-02	6.63E-07	4.03E+00	1.09E+02	1.19E+02	3.40E-03	9.54E-13	9.54E-13	9.41E-13	29.0
Solarthermie, WW [m²]	4.05E-02	6.63E-07	4.03E+00	1.09E+02	1.19E+02	3.40E-03	9.54E-13	9.54E-13	9.41E-13	29.0
Abw.-Wärmetauscher [kW]	5.81E-02	7.41E-07	1.60E+01	8.16E+01	5.68E+01	1.48E-03	7.38E-13	7.38E-13	7.39E-13	17.0
Li-Ionen-Batterie [kWh]	6.02E-02	8.54E-07	9.38E+00	3.46E+02	1.73E+02	1.07E-03	6.72E-13	6.72E-13	6.52E-13	47.6
Vd-Redox-Flow-Batterie [kWh]	7.65E-02	2.61E-06	7.63E+00	3.17E+02	9.05E+01	4.19E-04	2.83E-12	2.83E-12	2.78E-12	44.6
Wärmespeicher, WW [kWh]	2.26E-03	4.43E-08	3.10E-01	8.40E+00	1.60E+01	7.51E-06	6.05E-14	6.05E-14	5.83E-14	1.1
Wärmespeicher, RW [kWh]	1.01E-03	1.97E-08	1.38E-01	3.73E+00	7.11E+00	3.34E-06	2.69E-14	2.69E-14	2.59E-14	0.5
Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	1.65E-02	2.33E-07	1.49E+00	4.34E+01	3.93E+01	1.57E-03	4.62E-13	4.62E-13	4.46E-13	27.4
Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	1.65E-02	2.33E-07	1.49E+00	4.34E+01	3.93E+01	1.57E-03	4.62E-13	4.62E-13	4.46E-13	27.4
Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	1.65E-02	2.33E-07	1.49E+00	4.34E+01	3.93E+01	1.57E-03	4.62E-13	4.62E-13	4.46E-13	23.9
Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	1.65E-02	2.33E-07	1.49E+00	4.34E+01	3.93E+01	1.57E-03	4.62E-13	4.62E-13	4.46E-13	23.9
Heizstab, WW [kW]	1.65E-04	3.46E-09	1.67E-02	6.22E-01	5.44E-01	3.02E-06	4.44E-15	4.44E-15	4.30E-15	12.1
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kW]	1.65E-02	2.33E-07	1.49E+00	4.34E+01	3.93E+01	1.57E-03	4.62E-13	4.62E-13	4.46E-13	45.6
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kW]	1.65E-02	2.33E-07	1.49E+00	4.34E+01	3.93E+01	1.57E-03	4.62E-13	4.62E-13	4.46E-13	45.6
Kessel, Biomethan [kW]	9.24E-03	1.66E-07	1.02E+00	3.00E+01	2.36E+01	4.18E-04	2.40E-13	2.40E-13	2.34E-13	5.4
Kessel, Erdgas [kW]	9.24E-03	1.66E-07	1.02E+00	3.00E+01	2.36E+01	4.18E-04	2.40E-13	2.40E-13	2.34E-13	5.4

UMWELTWIRKUNGEN UND KOSTEN PRO VARIABLER EINHEIT

	Klimawandel	Süßwasser- u. Boden-versauerung	Süßwasserökotoxizität	Süßwasseretrophierung	Mee-reseutrophierung	Bodeneutrophierung	Humantoxizität, karzinogen	Ionisierende Strahlung	Humantoxizität, nicht-karzinogen	Ozonschichtzerstörung
	kg CO2-Eq	mol H+-Eq	CTU	kg P-Eq	kg N-Eq	mol N-Eq	CTUh	kg U235-Eq	CTUh	kg CFC-11-Eq
Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kWh]	2.26E-02	7.57E-07	8.98E-05	2.92E-08	1.11E-07	1.17E-06	2.89E-12	7.11E-06	2.14E-11	1.13E-08
Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kWh]	2.26E-02	7.57E-07	8.98E-05	2.92E-08	1.11E-07	1.17E-06	2.89E-12	7.11E-06	2.14E-11	1.13E-08
Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kWh]	1.41E-02	4.73E-07	5.61E-05	1.82E-08	6.94E-08	7.29E-07	1.81E-12	4.44E-06	1.34E-11	7.06E-09
Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kWh]	1.41E-02	4.73E-07	5.61E-05	1.82E-08	6.94E-08	7.29E-07	1.81E-12	4.44E-06	1.34E-11	7.06E-09
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kWh]	1.41E-02	4.73E-07	5.61E-05	1.82E-08	6.94E-08	7.29E-07	1.81E-12	4.44E-06	1.34E-11	7.06E-09
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kWh]	1.41E-02	4.73E-07	5.61E-05	1.82E-08	6.94E-08	7.29E-07	1.81E-12	4.44E-06	1.34E-11	7.06E-09
Kessel, Biomethan [kWh]	6.14E-03	4.05E-05	1.87E-03	7.77E-06	1.76E-05	1.77E-04	9.98E-11	9.00E-04	5.51E-10	1.46E-10
Kessel, Erdgas [kWh]	2.04E-01	4.05E-05	1.87E-03	7.77E-06	1.76E-05	1.77E-04	9.98E-11	9.00E-04	5.51E-10	1.46E-10
Netzstrom 2023	5,30E-01	9,70E-04	8,90E-02	5,67E-04	2,78E-04	1,78E-03	3,57E-09	3,33E-02	2,95E-08	1,85E-08
Netzstrom, 2028	4,18E-01	8,07E-04	7,84E-02	4,03E-04	2,15E-04	1,48E-03	3,17E-09	2,61E-03	2,51E-08	1,55E-08
Netzstrom 2033	2,93E-01	7,60E-04	9,52E-02	2,53E-04	1,71E-04	1,33E-03	3,84E-09	2,33E-03	2,66E-08	1,37E-08
Netzstrom, 2038	1,63E-01	5,64E-04	9,06E-02	1,01E-04	1,06E-04	9,58E-04	3,98E-09	1,25E-03	2,36E-08	1,07E-08
Erdgas, 2023	5,59E-02	1,52E-04	1,34E-02	1,59E-06	3,02E-05	3,27E-04	8,87E-10	4,68E-04	1,19E-09	3,86E-08
Erdgas, 2028	5,59E-02	1,52E-04	1,34E-02	1,59E-06	3,02E-05	3,27E-04	8,87E-10	4,68E-04	1,19E-09	3,86E-08
Erdgas, 2033	5,59E-02	1,52E-04	1,34E-02	1,59E-06	3,02E-05	3,27E-04	8,87E-10	4,68E-04	1,19E-09	3,86E-08
Erdgas, 2038	5,59E-02	1,52E-04	1,34E-02	1,59E-06	3,02E-05	3,27E-04	8,87E-10	4,68E-04	1,19E-09	3,86E-08
Biomethan, 2023	5,19E-02	1,10E-04	1,61E-02	5,01E-06	1,46E-05	2,01E-04	8,44E-10	7,09E-03	5,27E-09	2,85E-09
Biomethan, 2028	5,19E-02	1,10E-04	1,61E-02	5,01E-06	1,46E-05	2,01E-04	8,44E-10	7,09E-03	5,27E-09	2,85E-09
Biomethan, 2033	5,19E-02	1,10E-04	1,61E-02	5,01E-06	1,46E-05	2,01E-04	8,44E-10	7,09E-03	5,27E-09	2,85E-09
Biomethan, 2038	5,19E-02	1,10E-04	1,61E-02	5,01E-06	1,46E-05	2,01E-04	8,44E-10	7,09E-03	5,27E-09	2,85E-09

Umweltwirkungen und Kosten pro variabler Einheit (Fortsetzung)

	Photochemisches Oxidantienpotenzial	Atemwegseffekte	Wasserverbrauch	Fossile Ressourcen	Landnutzung	Mineralische u. metallische Ressourcen	EU Environmental Footprint	EU Environmental Footprint + Kosten	Equilibrium	Kosten
	kg NMVOC-Eq	disease incidence	m3 water-Eq	MJ	points	kg Sb-Eq	-	-	-	€
Luft-Wasser-Wärmepumpe, WW [kWh]	5.29E-07	7.84E-12	7.78E-05	1.59E-03	4.05E-04	1.61E-09	9.48E-17	9.48E-17	5.08E-17	0
Luft-Wasser-Wärmepumpe, RW [kWh]	5.29E-07	7.84E-12	7.78E-05	1.59E-03	4.05E-04	1.61E-09	9.48E-17	9.48E-17	5.08E-17	0
Sole-Wasser-Wärmepumpe, WW [kWh]	3.30E-07	4.90E-12	4.86E-05	9.92E-04	2.53E-04	1.01E-09	5.92E-17	5.92E-17	3.17E-17	0
Sole-Wasser-Wärmepumpe, RW [kWh]	3.30E-07	4.90E-12	4.86E-05	9.92E-04	2.53E-04	1.01E-09	5.92E-17	5.92E-17	3.17E-17	0
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, RW [kWh]	3.30E-07	4.90E-12	4.86E-05	9.92E-04	2.53E-04	1.01E-09	5.92E-17	5.92E-17	3.17E-17	0
Abw.-Wasser-Wärmepumpe, WW [kWh]	3.30E-07	4.90E-12	4.86E-05	9.92E-04	2.53E-04	1.01E-09	5.92E-17	5.92E-17	3.17E-17	0
Kessel, Biomethan [kWh]	4.85E-05	2.05E-10	9.84E-04	8.79E-02	2.45E-02	4.49E-08	1.03E-16	1.03E-16	1.15E-16	0
Kessel, Erdgas [kWh]	4.94E-05	2.05E-10	9.84E-04	8.79E-02	2.45E-02	4.49E-08	8.81E-16	8.81E-16	5.01E-16	0
Netzstrom 2023	5,23E-04	3,26E-09	9,28E-02	7,94E+00	1,18E+00	1,21E-05	7,81E-15	7,81E-15	7,55E-15	3,02E-01
Netzstrom, 2028	4,41E-04	3,03E-09	7,98E-02	5,83E+00	1,34E+00	1,48E-05	7,03E-15	7,03E-15	6,72E-15	2,69E-01
Netzstrom 2033	4,07E-04	4,05E-09	7,58E-02	4,04E+00	2,12E+00	2,87E-05	8,66E-15	8,66E-15	8,26E-15	2,77E-01
Netzstrom, 2038	3,06E-04	3,77E-09	6,37E-02	2,24E+00	1,75E+00	2,68E-05	7,11E-15	7,11E-15	6,75E-15	2,81E-01
Erdgas, 2023	1,59E-04	4,45E-10	2,00E-03	3,92E+00	5,11E-02	8,19E-08	1,14E-15	1,14E-15	9,65E-16	1,22E-01
Erdgas, 2028	1,59E-04	4,45E-10	2,00E-03	3,92E+00	5,11E-02	8,19E-08	1,14E-15	1,14E-15	9,65E-16	0,86E-01
Erdgas, 2033	1,59E-04	4,45E-10	2,00E-03	3,92E+00	5,11E-02	8,19E-08	1,14E-15	1,14E-15	9,65E-16	0,97E-01
Erdgas, 2038	1,59E-04	4,45E-10	2,00E-03	3,92E+00	5,11E-02	8,19E-08	1,14E-15	1,14E-15	9,65E-16	1,13E-01
Biomethan, 2023	5,45E-05	9,13E-10	1,38E-02	4,26E-01	1,12E+00	3,87E-07	5,57E-16	5,57E-16	4,64E-16	2,27E-01
Biomethan, 2028	5,45E-05	9,13E-10	1,38E-02	4,26E-01	1,12E+00	3,87E-07	5,57E-16	5,57E-16	4,64E-16	1,59E-01
Biomethan, 2033	5,45E-05	9,13E-10	1,38E-02	4,26E-01	1,12E+00	3,87E-07	5,57E-16	5,57E-16	4,64E-16	1,68E-01
Biomethan, 2038	5,45E-05	9,13E-10	1,38E-02	4,26E-01	1,12E+00	3,87E-07	5,57E-16	5,57E-16	4,64E-16	1,76E-01

ANNAHMEN FÜR MEHRAUFWAND GEBÄUDEDÄMMUNG BEI EH40

Zusätzliche Dämmungen nach Medium Szenario (Stärke in cm)						
Gebäudeart/-teil	Außenwand		Fenster	Dachgeschoss	Oberstes Geschoss	Boden
EFH	Expanded polystyrene (EPS 035) 12 cm		Low-E double-glazed window	Glass wool 12 cm - bei Baualter 1958-1968: Glass Wool 8 cm - bei Baualter 1969-1978: Glass Wool 7 cm - bei Baualter 1979-1983: Glass Wool 2 cm - bei Baualter 1984-1994: keine extra Dämmung	Expanded polystyrene (EPS 035) 12 cm	Expanded polystyrene (EPS 035) 8 cm
	Bei Baujahr vor 1859:	Glasswool 10 cm				
	bei Baujahr 1949-1957:	Cellulose (loose fill) 6 cm				
RH	Expanded polystyrene (EPS 035) 12 cm					
MFH						
GMH						
HH						
Zusätzliche Dämmungen nach Advanced Szenario (Stärke in cm)						
Gebäudeart/-teil	Außenwand		Fenster	Dachgeschoss	Oberstes Geschoss	Boden
EFH	Expanded polystyrene (EPS 035) 24 cm		Low-E double-glazed window	Glass wool 30 cm - bei Baualter 1958-1968: Glass Wool 26 cm - bei Baualter 1969-1978: Glass Wool 25 cm - bei Baualter 1979-1983: Glass Wool 20 cm - bei Baualter 1984-1994: kein zusätzliche Dämmung	Expanded polystyrene (EPS 035) 30 cm	Expanded polystyrene (EPS 035) 12 cm
RH						
MFH						
GMH						
HH						
Quelle: Persönliche Mitteilung von Maryam Zirak, HfT Stuttgart und https://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/scientific/BE_TABULA_ScientificReport_VITO.pdf						

	Mehrkosten 2015 [1]	Verbraucherpreisindex zw. 2015 und 2021 [2]	Mehrkosten 2021
	€/cm*m²Bauteilfläche		€/cm*m²Bauteilfläche
Außenwand	2.5	0.091	2.73
Dach	4.11	0.091	4.48
Boden	3.63	0.091	3.96
[1] https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Verbraucherpreisindex/Methoden/Internetprogramm.html , Preise 2015 in Preisen 2021			
[2] fkz 3715 41 111 energieaufwand gebaeudekonzepte bf.pdf			

Gebäudeart/-teil	Hüllfläche (nur Wände inkl. Fenster)	Außenwand (Anteil Fenster 0.25)	Fenster	Dachgeschoss	Oberstes Geschoss =Dach	Boden	Gesamtgebäude
Material		Expanded polystyrene (EPS 035)	kein Unterschied	Glass wool	Expanded polystyrene (EPS 035)	Expanded polystyrene (EPS 035)	
Differenz [m]		0.12		0.18	0.18	0.04	
Fläche [m ²]	15.975	11.981	0	0	6.870	6.870	25.721
Expanded polystyrene (EPS 035) 18 cm [m ³]					1.237		
Expanded polystyrene (EPS 035) 12 cm [m ³]		1438					
Expanded polystyrene (EPS 035) 4 cm [m ³]						275	
Volumen [m ³]							2.949
Masse [kg] (Dichte = 15 kg/m ³ [1])							44.237
spez. Kosten [€/cm*m ² Bauteilfläche]		2.73			4.48	3.96	
Kosten [€]		392.139	0	0	554.493	108.830	1.055.461
[1] Ökologische Wärmedämmstoffe im Vergleich 2.0_Bauzentrum München_2013 nach ökobau.dat							
[2] fkz_3715_41_111_energieaufwand_gebaeudekonzepte_bf.pdf nach sir Ados 2015, Preise 2015 in Preisen 2021							

