

ENERGIEKONZEPT WIERNSSHEIM

November 2023
Projekt: InPEQt

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	2
2	RAHMENDATEN	2
3	BEDARFE	2
3.1	STROM	3
3.2	WÄRME.....	4
4	BESTANDSANLAGEN	6
4.1	STROM	6
4.2	WÄRME.....	7
5	POTENZIELLE ERZEUGUNGSANLAGEN UND SPEICHER.....	7
6	EINGANGSPARAMETER	10
6.1	KOSTEN	10
6.2	UMWELTWIRKUNGEN.....	12
6.3	LEBENSDAUERN.....	12
6.4	TECHNISCHE PARAMETER	13
6.5	WETTERABHÄNGIGE DATEN.....	15
7	OPTIMIERUNGSZIELE	155
8	ERGEBNISSE	17
8.1	INSTALLIERTE LEISTUNG	17
8.2	ENERGIEERZEUGUNG	18
8.3	KOSTEN	19
8.4	INDIKATOREN IM VERGLEICH.....	20
9	VERGLEICH MIT EINEM BUSINESS AS USUAL-SZENARIO	21
10	BEITRAG ZUR TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT	22
11	UNSICHERHEITEN	223
12	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	234
13	EMPFEHLUNGEN	23
14	ANHANG	255
14.1	UMWELTWIRKUNGEN UND KOSTEN PRO INVESTIERTER EINHEIT PRO JAHR	255
14.2	UMWELTWIRKUNGEN UND KOSTEN PRO VARIABLER EINHEIT	277
14.3	ERGEBNISTABELLE FÜR INSTALLIERTE LEISTUNGEN/KAPAZITÄTEN	29

1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Projekts InPEQt¹ wurde diese Energiekonzeption für Wiernsheim 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. Damit können in der frühen Planungsphase nachhaltigere sektorkoppelnde Energiesystemkonfigurationen identifiziert werden, die Wärme und Strom (inkl. E-Mobilität) abdecken. Für den Teilort Wiernsheim wurden die Nachfrage von Haushalten und Gewerbe, Handel und Dienstleistung betrachtet. Die Industrie blieb außen vor, da spezielle Anforderungen beim Strom- und Wärmebedarf bestehen, für die keine spezifischen Daten vorlagen.

Zwischenergebnisse wurden regelmäßig mit einem Vertreter der Gemeinde diskutiert und mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse das hier vorliegende Energiekonzept abgeleitet. Dies wurde in einem Stakeholderdialog etwa 40 interessierten Bürgerinnen und Bürgern vorgestellt und intensiv diskutiert.

Dieses Energiekonzept versteht sich als Orientierung vor allem für die kommunalen Entscheidungsträger:innen bei der Planung von Energieinfrastruktur. Sie ist weniger dafür geeignet, auf einzelne Gebäude übertragen zu werden. So können z.B. keine Empfehlungen in Bezug auf einen Heizungstausch für Einzelgebäude gegeben werden.

2 RAHMENDATEN

Die vorliegende Konzeption bezieht sich auf den Teilort Wiernsheim der Gemeinde Wiernsheim. Die gesamte Gemeinde Wiernsheim hat eine Einwohnerzahl von 6901; der Teilort Wiernsheim von 3673². Die Bebauung umfasst zum überwiegenden Teil Einfamilienhäuser.

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

3 BEDARFE

Das Energiesystemmodell berücksichtigt jährliche Bedarfe an Strom und Wärme in stündlicher Auflösung. Aus den Jahressummen werden mit Hilfe der Tools oemof³ und nPro⁴ entsprechende Zeitreihen erstellt.

¹ Integrierte kosten- und lebenszyklusbasierte Planung dezentraler Energiesysteme für eine energie- und ressourcenschonende Quartiersentwicklung

² https://www.wiernsheim.de/wiernsheim/portrait/zahlen-fakten/?style_contrast=782, Stand: März 2023

³ Hilpert S. et al. (2018) The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling, Energy Strategy Rev, 22, pp. 16-25, 10.1016/j.esr.2018.07.001

⁴ www.npro.de

3.1 STROM

Der Strombedarf setzt sich zusammen aus dem Bedarf der Haushalte, des Bereichs Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) und der Elektro-Mobilität. Für Haushalte und GHD lagen Jahressummen von NetzeBW für das Jahr 2020 entsprechend Tabelle 1 vor, die entsprechenden Standardlastprofilen zugeordnet wurden.

Tabelle 1 Absolute jährliche Strombedarfe für Teilort Wiernsheim nach Verbrauchsart 2020 [Quelle: Netze BW] und Zuordnung zu Profilen zur Generierung von Lastprofilen

Verbrauchsart	kWh/a	Profil	Kommentar
Gewerbe	91.135	G0	
Industrie	6.976.186	-	Industrie bleibt unberücksichtigt
Industrie	16.770	G0	
Elektrowärme	754.911	-	bleibt unberücksichtigt, da über Wärmebedarf modelliert wird
Elektrowärme	1.330.889	-	bleibt unberücksichtigt, da über Wärmebedarf modelliert wird
Elektrowärme	1.340.709	-	bleibt unberücksichtigt, da über Wärmebedarf modelliert wird
E-Mobilität Ladesäulen	2.037	Profil aus nPro	
Gewerbe	61.281	G0	
Gewerbe	250	-	vernachlässigt
Gewerbe	1.434.999	G0	
Haushalt	4.421.090	H0	enthält auch elektrische Warmwasserbereitung; lt. Bachelorarbeit 2012 1.426 MWh für Gesamtort; 778 MWh für Teilort
Industrie	29.092	G0	
Landwirtschaft	195.611	L0	
Straßenbeleuchtung	186.454		vernachlässigt

Mit dem Tool oemof wurde ein Gesamtprofil, welches in Abbildung 1 dargestellt ist, erstellt.

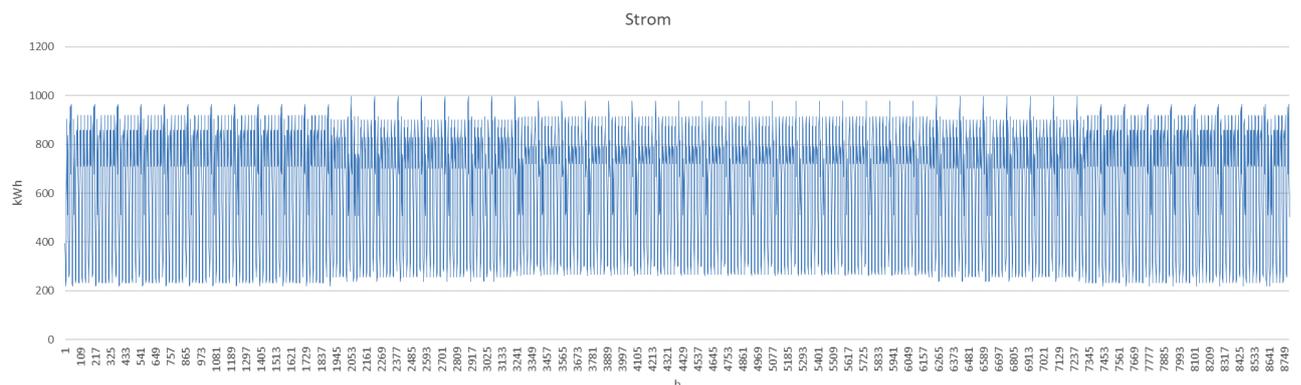


Abbildung 1 Lastprofil Strom für Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Beim Strombedarf für die E-Mobilität im Bereich Wohnen wurden folgende Annahmen getroffen:

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

Aus den o.g. Werten wird zusammen mit Annahmen für gewerbliches Laden⁵ ein Strombedarf von 1,1 MWh/a pro Ladepunkt angenommen. Dieser wird für den Ausbau der Ladeinfrastruktur von 50 Ladepunkten im ersten Jahr auf 1000 Ladepunkte im Jahr 2038 verwendet.

Im Jahr 2028 wird von 200 und im Jahr 2032 von 500 Ladepunkten ausgegangen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten jährlichen Strombedarfe und die in Abbildung 2 gezeigten jährlichen Lastgänge.

Tabelle 2 Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042

		Strombedarf E-Mobilität
2023-2027	MWh/a	57
2028-2032	MWh/a	226
2033-2037	MWh/a	566
2038-2042	MWh/a	1132

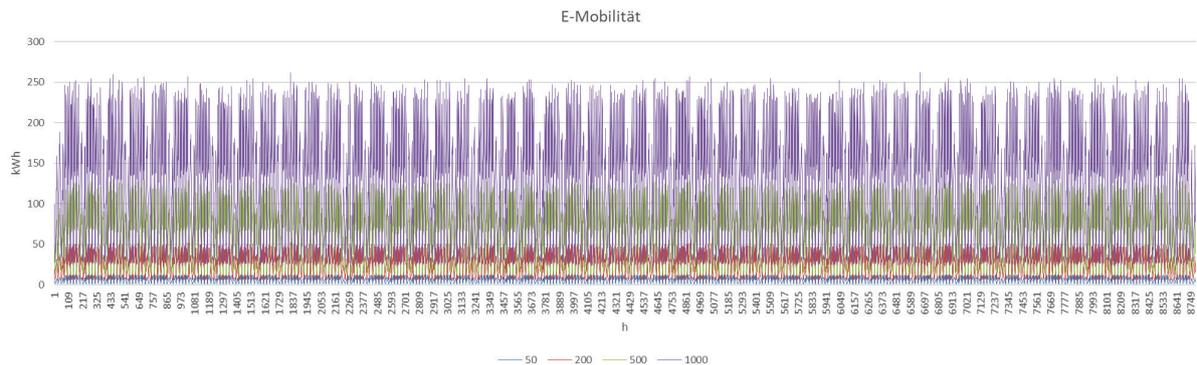


Abbildung 2 Lastprofile E-Mobilität

3.2 WÄRME

Der Wärmebedarf der Haushalte in Wiernsheim stammt aus der Energie- und CO₂-Bilanz Wiernsheim 2007, welche mit aktuellen Daten angepasst wurde. Aus den in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgeführten Wärmebedarfe ergeben sich für Einfamilienhäuser (EFH) ein derzeitiger Wert von 20,4 GWh und für Mehrfamilienhäuser (MFH) von 3,2 GWh pro Jahr.

Tabelle 3 Wärmebedarfe für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) im Teilort Wiernsheim bis 2006

Energie- und CO ₂ -Bilanz Wiernsheim 2007	EFH	MFH
EFH1	2.200.770	
EFH2	636.240	
EFH3	1.280.331	
EFH4	5.773.950	
EFH5	3.546.296	
EFH6	4.006.080	
KMH1		389.760
KMH4		669.600
KMH6		1.750.008
RH5	101.400	
RH6	175.446	
GMH5		385.840

⁵ Ermittelt mit dem Tool nPro

Tabelle 4 Wärmebedarfe für Einfamilienhäuser (EFH) im Teilort Wiernsheim

Aktuelle Daten (Neubauten im Teilort Wiernsheim seit 2007)		
2007		
EFH7	1.877.983	
EFH8	584.700	
2012		
EFH9	226.082	
EFH = Einfamilienhaus, KMH = kleines Mehrfamilienhaus, RH = Reihenhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus		

Für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistung wird der Wärmebedarf überschlägig ermittelt. Dazu erfolgt eine Auswertung mit dem Tool hotmaps⁶. Es verfügt über ein Auswahlwerkzeug, um auf einer Karte einen Bereich auszuwählen. Für Wiernsheim wurde der Bereich ohne das Gewerbegebiet markiert (Abbildung 3). Das Tool liefert dann Wärmebedarfe getrennt nach Wohn- und Nicht-Wohngebieten. Diese Werte wurden ins Verhältnis gesetzt und damit der Wert für GHD errechnet (Tabelle 5).



Abbildung 3 Wärmebedarfsermittlung mit Tool hotmaps

Tabelle 5 Wärmebedarfsermittlung für Gewerbe, Handel, Dienstleistung im Teilort Wiernsheim

hotmaps			Diese Studie	
Heat density residential sector			EFH+MFH	
Heat demand total	19,6	GWh/yr	23	Energie- und CO ₂ -Bilanz Wiernsheim
Heat density non-residential sector			GHD	
Heat demand total	5,14	GWh/yr	6,0	hochgerechnet

⁶ <https://www.hotmaps.eu>

Für die Energiesystemmodellierung werden Zeitreihen in stündlicher Auflösung für den Wärmebedarf benötigt. Diese wurden mittels der o.g. Kennwerte für Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und GHD mit dem Tool oemof erstellt.

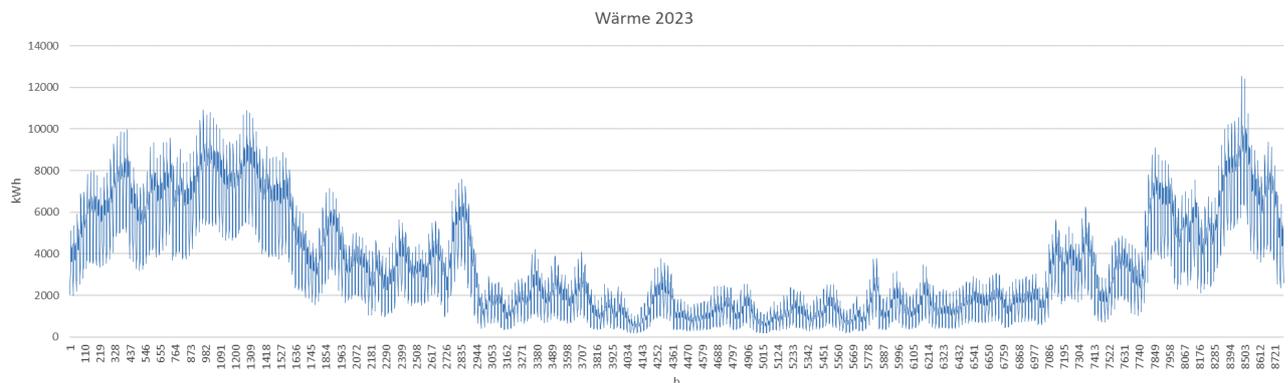


Abbildung 4 Lastprofil Wärme

Für den Wärmebedarf wird aufgrund erwarteter Maßnahmen zur energetischen Sanierung ein Absinken über die Zeit angenommen. Ausgangspunkt ist die Annahme der KEA-BW⁷, dass der Wärmebedarf bis 2050 um 50 % sinkt. Für die Eingangsdaten im Modell wird ein linearer Abfall bis 2038 um 1/3 angenommen.

4 BESTANDSANLAGEN

4.1 STROM

Bei stromerzeugenden Bestandsanlagen wurden PV-Anlagen berücksichtigt und eine Auswertung der Daten im Marktstammdatenregister durchgeführt. Dazu wurde die Nettonennleistung pro Jahr und Ausrichtung für den Gesamtort Wiernsheim abgefragt. Anlagen mit Nordausrichtung wurden aufgrund ihres geringen Beitrags vernachlässigt. Der Anteil für den Teilort Wiernsheim wurde über den Einwohneranteil (55 %) heruntergerechnet. Die sich daraus ergebenden Leistungen können Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6 Bestands-PV-Anlagen im Teilort Wiernsheim nach Marktstammdatenregister (Stand 01/2023)

Alter [a]	Ost [kWp]	West [kWp]	Süd [kWp]
5	628	249	593
10	182	57	154
15	104	230	714
20	60 ¹	56 ¹	344
¹ Aufgrund geringer Relevanz vernachlässigt			

⁷ KEA-BW (2022) Technikkatalog, Tabellen v1

4.2 WÄRME

Die Leistungen wärmeerzeugender Bestandsanlagen stammen aus der Energie- und CO₂-Bilanz Wiernsheim 2007 und wurden mit aktuellen Daten angepasst. Sie umfassen nur Wohngebäude.

Tabelle 7 Wärmelerzeugende Bestandsanlagen in Wohnhäusern im Teilort Wiernsheim nach Energie- und CO₂-Bilanz Wiernsheim

	Öl (neu) ¹	Öl (alt) ¹	Wärmepumpe ²	Strom	Einzelöfen ³	Gas (Brennwert) ⁴	Gas (neu) ⁴	Gas (alt) ⁴	
	kWth								
2007	2513	2848	359	2227	1726	1188	10	30	Lebensdauerende 2032
2007-2012	580	0	80	23	4	271	0	0	Lebensdauerende 2037
2012	0	0	123	2	0	0	0	0	Lebensdauerende 2042
¹ im Modell zusammengefasst ² Annahme: Luft-Wasser-Wärmepumpe ³ Annahme: Scheitholz ⁴ im Modell zusammengefasst									

5 POTENZIELLE ERZEUGUNGSANLAGEN UND SPEICHER

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

- Windenergieanlagen
 - o Annahme: 3,2 MW pro Anlage; Typ Siemens SWT-3.2-113
 - o Potenzial (ganze Gemeinde Wiernsheim): lt. Energieatlas Baden-Württemberg⁸ 16 Anlagen in geeigneten Flächen, 8 Anlagen in bedingt geeigneten Flächen → 77 MW
- Verfügbar ab 2028 wegen langen Planungszeiten
- Photovoltaik: Potenzial lt. Energieatlas Baden-Württemberg⁹
 - o Freifläche: 177 MWp
 - o Flachdach: 7,1 MWp
 - o Aufdach: Süd: 12 MWp, West: 5 MWp, Ost: 7 MWp
- Solarthermie: Potenzial analog zu Photovoltaik
 - o Freifläche Flachkollektor/Röhrenkollektor: 920.000 m²
 - o Aufdach-Flachkollektor: 64.000 m²
- Scheitholz-Ofen: 2.000 kW (wie Bestand)
- Pellet-Kessel: 2.000 kW (Annahme wie Scheitholz-Ofen)
- Holzhackschnitzel-BHKW: 780 kWel (Potenzial für Reststoffe Forstwirtschaft nach hotmaps¹⁰ für Gesamtgemeinde)
- Biomethan-BHKW: 870 kWel (Annahme)

⁸ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/index.xhtmll>

⁹ Ebd.

¹⁰

- Abwasser: Abwasser-Wärmetauscher (5000 kW nach ASUE¹¹: 2-3 kWh/d/EW) + Abwasser-Wasser-Wärmepumpe

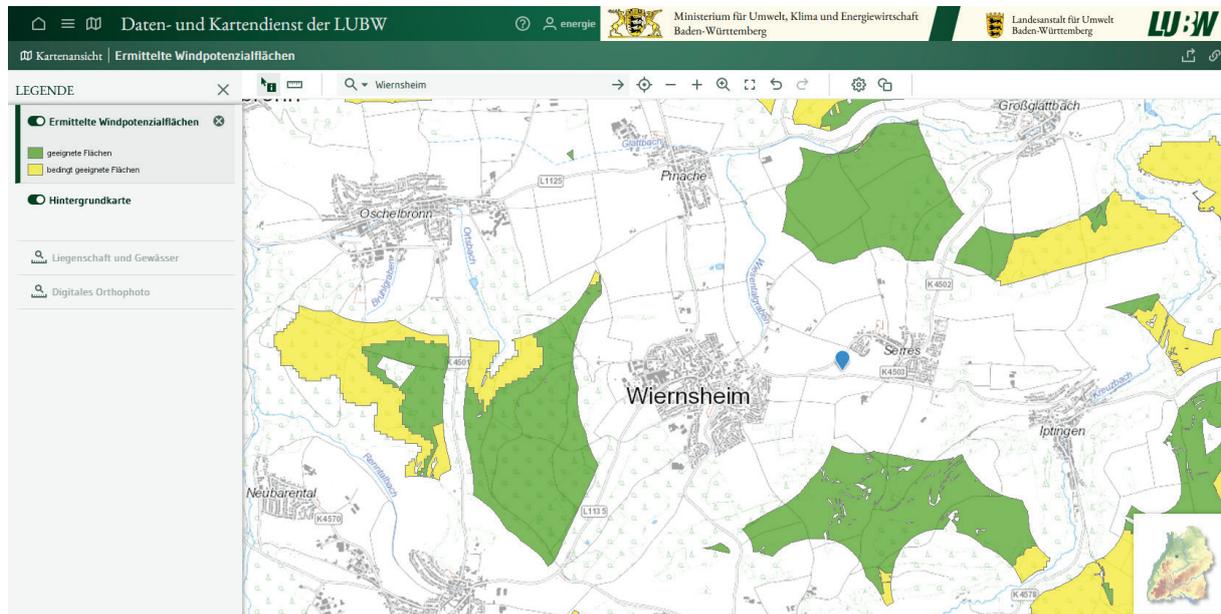


Abbildung 5 Windpotenzialflächen rund um Wiernsheim lt. Energieatlas Baden-Württemberg

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

- Erdwärme: Erdwärmesonden + Sole-Wasser-Wärmepumpe
- Luft: Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Elektrowärme/Power to Heat: Heizstab oder Elektrodenkessel
- Pufferspeicher
- Lithium-Ionen-Batterie
- Vanadium-Redox-Flow-Batterie
- Zusätzlich Netzstrom

Den Aufbau des Modells zeigt die folgende Abbildung.

¹¹ ASUE (2021): Innovative Quartiersversorgung

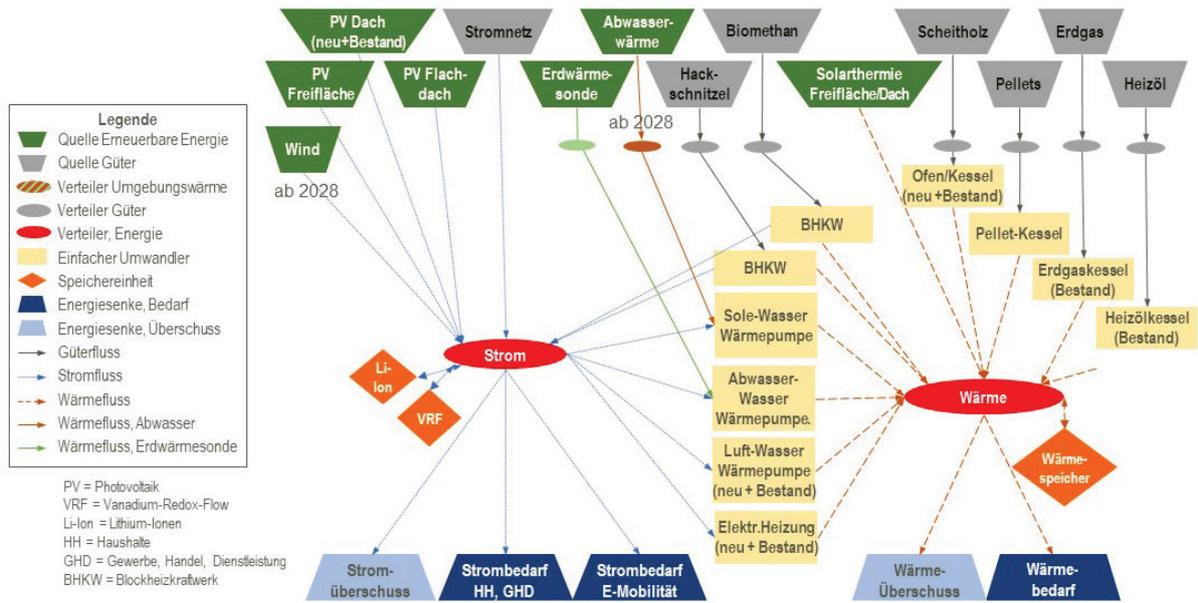


Abbildung 6 Aufbau des Modells

6 EINGANGSPARAMETER

6.1 KOSTEN

Bei der Kostenbetrachtung werden Gestehungskosten 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. Die bislang beschlossene Steigerung des CO₂-Preises wurde berücksichtigt. Für Brennstoffe auf Basis von Holz wurden konstante Nettopreise angenommen.

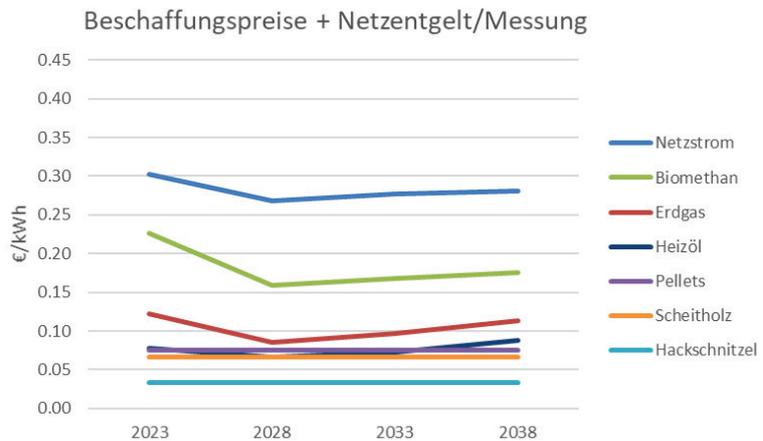


Abbildung 7 Preisentwicklung für eingekaufte Energieträger

Tabelle 8 Kostenannahmen für eingekaufte Energieträger

	Jahr	Kosten [Euro/kWh]	Quelle
Strom	2023	0,302	https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizenmit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publication-File&v=8 www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse,7/2023
	2028	0,269	
	2033	0,277	
	2038	0,281	
Erdgas	2023	0,122	https://dserver.bundestag.de/btd/20/072/2007290.pdf https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-gaspreisanalyse/,7/2023
	2028	0,086	
	2033	0,097	
	2038	0,113	
Biomethan	2023	0,227	https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizenmit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publication-File&v=8 https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-gaspreisanalyse/,7/2023
	2028	0,159	
	2033	0,168	
	2038	0,176	
Heizöl	2023	0,077	https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizenmit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publication-File&v=8 https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1692/umfrage/preis-fuer-einen-liter-leichtes-heizoel-monatsdurchschnittswerte/,9/2023
	2028	0,066	
	2033	0,073	
	2038	0,088	
Pellets		0,076	https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizenmit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publication-File&v=8
Hackschnitzel		0,034	https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Hackschnitzelpreise-Jahresmittelwerte-MWh.pdf , 2022, D Süden, Wassergehalt 20%, brutto, inkl. Lieferung
Scheitholz		0,066	https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biogenefestbrennstoffe/dateien/mb_scheitholzpreise.pdf , , brutto, inkl. Lieferung

Weitere variable Betriebskosten können Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9 Variable Betriebskosten (außer Brennstoffkosten)

Technologie	€/kWh	Quelle
Windenergieanlagen	0,009	Windguard, 2022, Kurzfristanalyse, S. 6, zweite Dekade
BHKW, Biomethan	0,01	https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten
BHKW, Hackschnitzel	0,02	https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten

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

Die Fixkosten für Wartung sowie die Investitionen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 10 Fixkosten und Investitionen pro Technologie

Technologie	Größenklasse	Einheit	Wartung [€/Einheit]	Invest [€/Einheit]	Quelle
Windenergieanlagen	k.A.	kW	43	800	https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2022/Kurzfristanalyse%20zur%20Kostensituation%20der%20Windenergie%20an%20Land.pdf , Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11, MW niedrig/hoch
PV, Freifläche	k.A.	kWp	17	833	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Flachdach	10	kWp	26	1309	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Aufdach	10	kWp	27	1358	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 3.11 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-PV v1.xlsx, 10 kW
Batterie, Li-Ionen	k.A.	kWh	25	714	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 28, niedrig
Batterie, VRF	k.A.	kWh	25	857	Annahme (20 % höher als Li-Ionen-Batterie)
BHKW, Biomethan + Wärmenetz	500	kWel	22	920 + 78	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 2.2 zentrale_Waermeversorgung_BHKW_Erdgas_Biogas v1.xlsx, 501 kW; https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen , GBA 750 kWel; Kosten Wärmenetz: Daten Gussenstadt für 15 a
BHKW, Hackschnitzel + Wärmenetz	500	kWel	21	880 + 70	https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten ; Kosten Wärmenetz: Daten Gussenstadt für 15 a
Luft-Wasser Wärmepumpe	8	kW HWL	18	1177	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx.
Sole-Wasser Wärmepumpe	9	kW HWL	18	1201	Technikkatalog, Tabellen: 3.7.3 Dezentrale_Waermeversorgung_Sole_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx.
Erdwärmesonde	Bis 100	m ¹	0	100	Bosch
Abwasser-Wasser-Wärmepumpe	9	kW HWL	18	1201	Wie Sole-Wasser-Wärmepumpe
Abwasserwärmetauscher	k.A.	kW	0	1000	Herstellerangabe (Uhrig-Bau)
Flachkollektor, Aufdach	140	m ²	1,5	579	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1, 3.9 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-Solarthermie v1.xlsx, 140 kW
Flach-/Röhrenkollektor, Freifläche	k.A.	m ²	3,3	298	https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/07/Foerderleitfaden_Freiflaechen-Solarthermie.pdf

Technologie	Größenklasse	Einheit	Wartung [€/Einheit]	Invest [€/Einheit]	Quelle
Elektrowärme: Heizstab/Kessel	7	kW	0	362	KEA-BW (2022): Technikkatalog. Tabellen: 3.10 Dezentrale_Waermeversorgung_Stromdirektheizungen v1.xlsx. 7 kW
Pellet-Kessel	23	kW	27	453	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Biomassekessel_automatisch_beschickt v1.xlsx
Scheitholz-Ofen	30	kW	9	200	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.6 Dezentrale_Waermeversorgung_Holzheizungen v1.xlsx, ohne Wasserspeicher, 30 kW
Pufferspeicher	500	l	0	2,37	KEA-BW (2022): Technikkatalog. Tabellen v1. 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx

6.2 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 8 ersichtlich. Die weiteren Umweltwirkungsindikatoren für Strom wie auch für die anderen Energieträger und Technologien können dem Anhang entnommen werden.

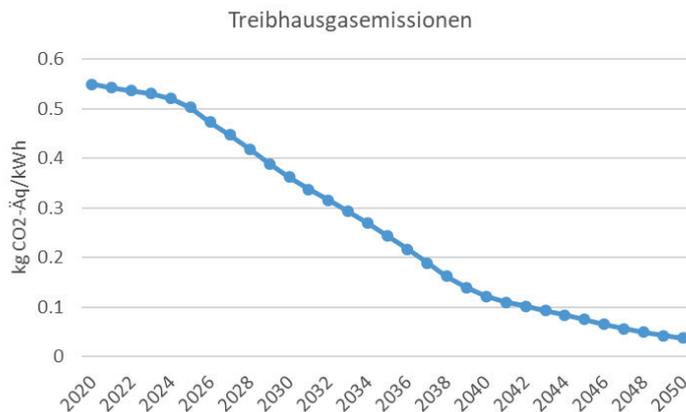


Abbildung 8 Verlauf der Treibhausgasemissionen (Szenario VI (basiert auf Repenning, J. et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Öko-Institut. FhG ISI. Hans-Joachim Ziesing) aus Naegler, T. et al. (2022): Life cycle-based environmental impacts of energy system transformation strategies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

Für PV-Anlagen wird die Sachbilanz anteilig aus mono- und multi-kristallinen Silizium-Solarzellen modelliert. Aufgrund fehlender Daten bleiben die Umweltwirkungen des Baus von Nahwärmeleitungen unberücksichtigt.

6.3 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 11 Lebensdauerannahmen pro Technologie (Wärme)

Wärme		
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, Aufdach (Flachkollektor)	20	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1. 3.9 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-Solarthermie v1.xlsx. 140 kW. L10
Solarthermie, Freifläche (Flachkollektor)	25	https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/07/Foerderleitfaden_Freiflaechen-Solarthermie.pdf
Solarthermie, Freifläche (Röhrenkollektor)	25	
Wärmespeicher	30	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1. 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagespeicher v1.xlsx. 5000l. 15-50a
Heizstab	30	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.10 Dezentrale_Waermeversorgung_Stromdirektheizungen v1.xlsx, 7 kW
Erdwärmesonde	50	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1. 2.4.1 Oberflaechennahe_Geothermie_Quellenerschliessung v1.xlsx. 111-200 kW. E7
Abwasserwärmetauscher	50	Annahme
Pelletkessel	15	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Biomassekessel_automatisch_beschickt v1.xlsx, 23 kW
Scheitholzofen	20	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.6 Dezentrale_Waermeversorgung_Holzheizungen v1.xlsx, ohne Wasserspeicher, 30 kW
Gasheizung (Bestand)	20-25	Annahme
Ölheizung (Bestand)	20-25	Annahme

Tabelle 12 Lebensdauerannahmen pro Technologie (Strom, Kraft-Wärme-Kopplung)

Strom	[Jahre]	Quelle
Windenergieanlagen	25	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 33
PV, Freifläche, Flachdach, Aufdach	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	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11
Batterie, Vanadium-Redox-Flow	20	Annahme (höher als Li-Ionen-Batterie)
Kraft-Wärme-Kopplung		
BHKW (Mikro-Gasturbine), Biomethan	15	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 2.2 zentrale_Waermeversorgung_BHKW_Erdgas_Biogas v1.xlsx, 501 kW
BHKW (ORC), Holzhackschnittel	15	Wie Biomethan

6.4 TECHNISCHE PARAMETER

Tabelle 13 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 angenommen.

Tabelle 13 Leistungszahlen Wärmepumpen

Technologie	COP	Quelle
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Temperaturabhängig (60 °C t_{high})	Berechnet mit oemof.thermal
Sole-Wasser-Wärmepumpe	2.9	Eigene Berechnung (308 K/(60-9)K*0.45)
Abwasser-W.-Wärmepumpe	3.1	Eigene Berechnung (308 K/(60-11)K*0.45)

Tabelle 14 Wirkungsgrade pro Technologie

Technologie	%	Quelle
BHKW, Biomethan, elektrisch	29	Ecoinvent (2021): electricity, CHP, biomethane, low pressure burned in micro gas turbine
BHKW, Biomethan, thermisch	46	Ecoinvent (2021): heat, district or industrial, CHP, biomethane, low pressure burned in micro gas turbine
BHKW, Holzhackschnitzel, elektrisch	15	https://www.3-n.info/media/4_Downloads/pdf_WssnSrcv_Srvc_Fst-brnnstff_KwkHolzStatusbericht_1409.pdf
BHKW, Holzhackschnitzel, thermisch	75	
Elektrowärme	100	Annahme
Gaskessel	93	KEA-BW (2022): Technikatalog. Tabellen v1, 3.1 DEzentrale_Waermeversorgung_Gasbrennwertkessel v1.xlsx
Ölkessel	82	Ecoinvent (2021): heat, central or small scale, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating
Pelletkessel	94	KEA-BW (2022): Technikatalog. Tabellen v1: 3.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Biomassekessel_automatisch_beschickt v1.xlsx, 23 kW
Scheitholzofen	70	KEA-BW (2022): Technikatalog. Tabellen v1, 3.6 DEzentrale_Waermeversorgung_Holzheizungen v1.xlsx
Photovoltaik	19.3	Frischknecht, R., et al (2020): Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, PVPS (kristallines Silizium)

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

Tabelle 15 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	0,87	[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. Energinet (2018): Technology Data - Energy storage 0007.													
[2] eff. Inverter =0,965; roundtrip eff.=90%; da Silva Lima et al. (2021): Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. Sustainable Energy Technologies and Assessments 46: 101286. doi:10.1016/j.seta.2021.101286.													
[3] Roberts, D., Brown, S. (2022): The economics of firm solar power from Li-ion and vanadium flow batteries in California. MRS Energy & Sustainability 9: 129–141. doi:10.1557/s43581-022-00028-w.													
[4] Danish Energy Agency. Energinet (2018): Technology Data - Energy storage 0007, 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): Technikatalog. Tabellen v1. 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx, 500l													
[7] eigene Berechnung													

6.5 WETTERABHÄNGIGE DATEN

Die Wetterdaten für ein typisches meteorologisches Jahr sowie die PV-Zeitreihe für die Koordinaten latitude = 48,891°, longitude = 8,852° wurden über das Tool PVGIS¹² ermittelt. Für PV wurde kristallines Silizium mit einem Systemverlust von 14 % angenommen.

Tabelle 16 Annahmen für Photovoltaik-Anlagen

	Neigung [°]	Azimut [°]	Ertrag [kWh/kWp]	Maximum [kW/kWp]
Optimal (Süden, Flachdach, Freifläche)	37	-4	1002	0,82
Osten	38	-90	803	0,73
Westen	38	90	789	0,73

Die Zeitreihe für Solarthermie (Ausrichtung: 37° Neigung, 4° Azimut (Süden) (wie optimale PV)) wird über das Tool nPRO ermittelt. Für den Ertrag eines Röhrenkollektors ergeben sich 571 kWh/m², für einen Flachkollektor 389 kWh/m² bei mittlerer Kollektortemperatur von 75°C.

Der temperaturabhängige COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe wird mit oemof.thermal¹³ ermittelt. Aus der Zeitreihe ergibt sich eine Jahresarbeitszahl für Wärme (60°C, Qualitätsfaktor: 0,4) von 2,62.

7 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. Als Einzelindikatoren werden hier Kosten und Klimawandel als Optimierungsziele verwendet.

Darüber hinaus wird ein mehrkriterielles Optimierungsziel aus Umweltwirkungen und Kosten gebildet, wobei eine Gewichtung von 50:50 verwendet wird. Die Umweltwirkungen werden aus Einzelindikatoren zu einem Einzelwert als gewichtete Summe zusammengefasst. Die dafür notwendige Normierung und Gewichtung erfolgt nach der Methode des EU Environmental Footprints¹⁴. Die entsprechenden Faktoren zeigt die folgende Tabelle bzw. Abbildung.

¹² PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ mit Anpassung an typ. meteorologisches Jahr

¹³ 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

¹⁴ 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.

Tabelle 17 Normierungswerte des EU Environmental Footprint

Indikator	Welt 2010	
Summe aller weltweiten Umweltwirkungen je Indikator im Jahr 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

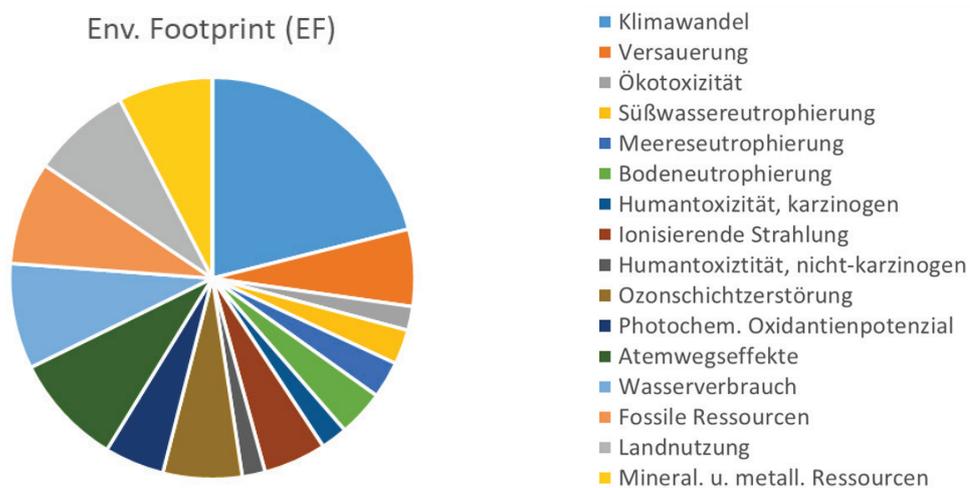


Abbildung 9 Gewichtungen für den Environmental Footprint

8 ERGEBNISSE

8.1 INSTALLIERTE LEISTUNG

Bei der Stromerzeugung wird bei allen Optimierungszielen in Windenergie- und Photovoltaikanlagen investiert. Bei Photovoltaikanlagen unterscheidet sich die Montageart je nach Optimierungsziel: bei Kosten- und mehrkriterieller Optimierung wird eine Freiflächenanlage, bei Treibhauspotenzialoptimierung werden Flachdachanlagen präferiert. In diese wird zum überwiegenden Teil erst im Jahr 2038 investiert (Lebensende Hackschnitzel-BHKW). In Windenergie wird bei steigendem Strombedarf im Jahr 2038 bei allen Optimierungszielen nochmal nachinvestiert. Bezüglich Stromspeichern werden bei allen Optimierungszielen Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt, wobei bei der Treibhauspotenzialoptimierung zusätzlich Vanadium-Redox-Flow-Batterien in geringerem Umfang verwendet werden.

Blockheizkraftwerke kommen in jedem Optimierungsergebnis zum Einsatz, wobei bei der mehrkriteriellen und der Treibhauspotenzialoptimierung diese sowohl mit Hackschnitzeln als auch mit Biomethan betrieben werden. Die installierte Leistung von letzterem ist zu Beginn der Betrachtung geringer als bei Hackschnitzel-BHKW, welches bei allen Zielen bis zur Obergrenze der Verfügbarkeit eingesetzt wird. Wenn dieses jedoch nach 15 Jahren sein Lebensende erreicht hat, wird nur noch in ein Biomethan-BHKW investiert – am meisten bei der mehrkriteriellen Optimierung. Die Kostenoptimierung setzt nur auf Biomethan als Brennstoff.

Die Wärme wird bei allen Optimierungszielen mit einem Mix aus Erzeugungstechnologien bereitgestellt. Es werden Wärmepumpen und elektrische Heizungen in unterschiedlichen Leistungen, Pellet-Kessel immer bis zur Obergrenze der Verfügbarkeit eingesetzt. In Scheitholz-Kessel wird bei der mehrkriteriellen Optimierung nicht investiert. Wärme aus solarthermischen Freiflächen-Anlagen wird nur bei der Treibhausgasoptimierung und erst dann, wenn das erste Hackschnitzel-BHKW sein Lebensende erreicht hat (2038). Luft-Wasser-Wärmepumpen werden nur in ganz geringem Maß bei der Kostenoptimierung eingesetzt. Aufdachanlagen für Photovoltaik und Solarthermie kommen in keinem der optimierten Energiesysteme zum Einsatz. Wärmespeicher sind in allen Optimierungen in derselben Größenordnung vorgesehen.

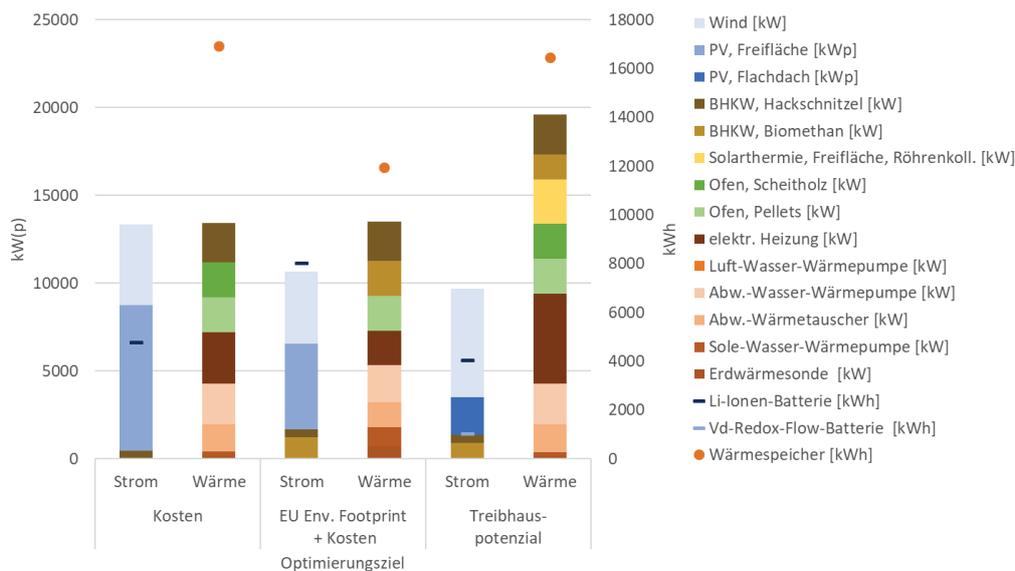


Abbildung 10 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele (Leistungen für Wärmepumpen entsprechen den maximalen Wärmeleistungen)

8.2 ENERGIEERZEUGUNG

Strom

Der Strombedarf nimmt über die Jahre durch den Hochlauf der Elektromobilität zu, wobei durch die fluktuierende Erzeugung von Wind- und PV-Strom auch Überschüsse entstehen. Vom erzeugten Strom wird ein Drittel bis die Hälfte in Wärme umgewandelt – entweder direkt oder über Wärmepumpen. Auch Speicherverluste müssen durch zusätzliche Erzeugung kompensiert werden. Aus diesen Gründen sind die Balken in Abbildung 11 von Optimierungsziel zu Optimierungsziel und von Jahr zu Jahr unterschiedlich hoch, auch wenn der Bedarf bei jedem Optimierungsziel gleich hoch ist.

Bei allen Optimierungszielen wird gleich viel Strom aus den PV-Bestandsanlagen erzeugt, wobei dieser durch Anlagen, die ihr Lebensende erreicht haben, über die Zeit abnimmt. Der Strombezug aus dem Netz ist insgesamt gering. Bei der Treibhauspotenzialoptimierung ist das System bis 2037 sogar autark. Erst im Jahr 2038 wird auch ein kleiner Teil des Stroms aus dem Netz bezogen.

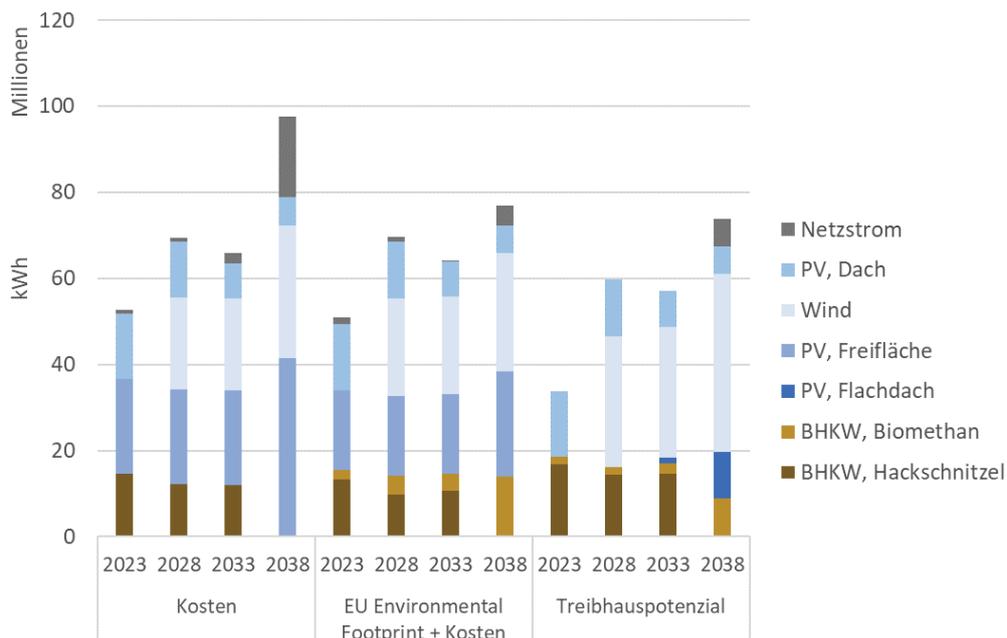


Abbildung 11 Stromerzeugung nach Technologien und nach Fünfjahreszeiträumen je Optimierungsziel

Wärme

Der Wärmebedarf sinkt über die Jahre (aufgrund energetischer Sanierung). Durch die gekoppelte Produktion von Strom und Wärme in den BHKWs kommt es bei der Wärmeerzeugung in geringem Maße zu Überschüssen. Speicherverluste müssen durch zusätzliche Erzeugung kompensiert werden.

Bei allen Optimierungszielen wird bis 2037 der größte Einzelanteil an Wärme durch das Hackschnitzel-BHKW erzeugt, im ersten Jahr gefolgt von den Holzkesseleln. Wenn im Jahr 2028 die Abwasser-Wärmepumpe zur Verfügung steht, werden sowohl das Hackschnitzel-BHKW als auch die Holzkesseleln zurückgefahren. Bei der Kostenoptimierung werden auch in nennenswertem Umfang allerdings über die Zeit sinkend noch Heizölkessel aus dem Bestand genutzt. Bei der mehrkriteriellen Optimierung ist das bei den Erdgaskesselnen der Fall. Bei der Treibhauspotenzialoptimierung kommen keine fossilen Energieträger zur Wärmeerzeugung mehr zum Einsatz.

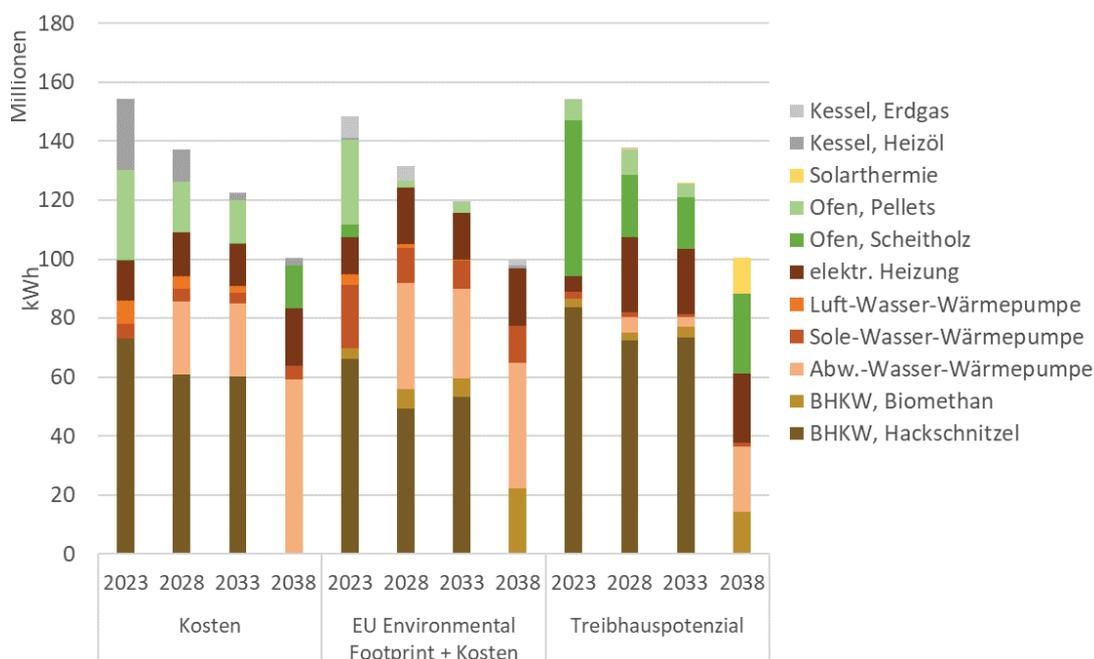


Abbildung 12 Wärmeezeugung nach Technologien und nach Fünfjahreszeiträumen je Optimierungsziel

8.3 KOSTEN

Die Gesamtkosten über 20 Jahre liegen je nach Optimierungsziel zwischen 40 (Kostenoptimierung) und 49 Mio. Euro (Treibhauspotenzialoptimierung). Wird mehrkriteriell optimiert, ergeben sich Gesamtkosten von 48 Mio. Euro. Damit liegen die Gesamtkosten der nicht allein kostenoptimierenden Energiesysteme ca. 20 bis 22,5 % über dem Kostenoptimum.

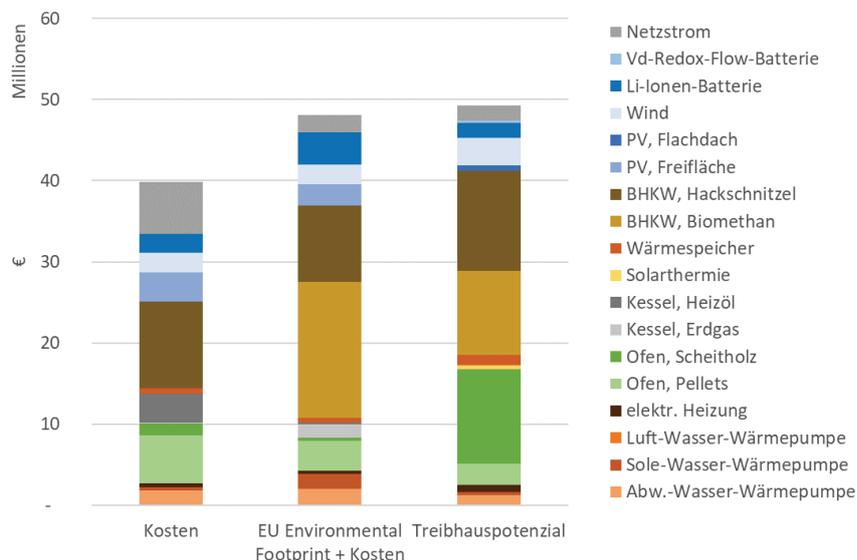


Abbildung 13 Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele

Bezüglich der Aufteilung der Kosten zeigt sich, dass die Gesamtkosten bei allen Optimierungszielen von den variablen Kosten dominiert werden, wobei hier Hackschnitzel, Biomethan und Scheitholz große

Anteile haben. Die größten Einzelposten bei den Investitionen sind je nach Optimierungsziel Freiflächen-PV (Kostenoptimierung), Li-Ionen-Batterie (mehrkriterielle Optimierung) und Wind (Treibhauspotenzialoptimierung).

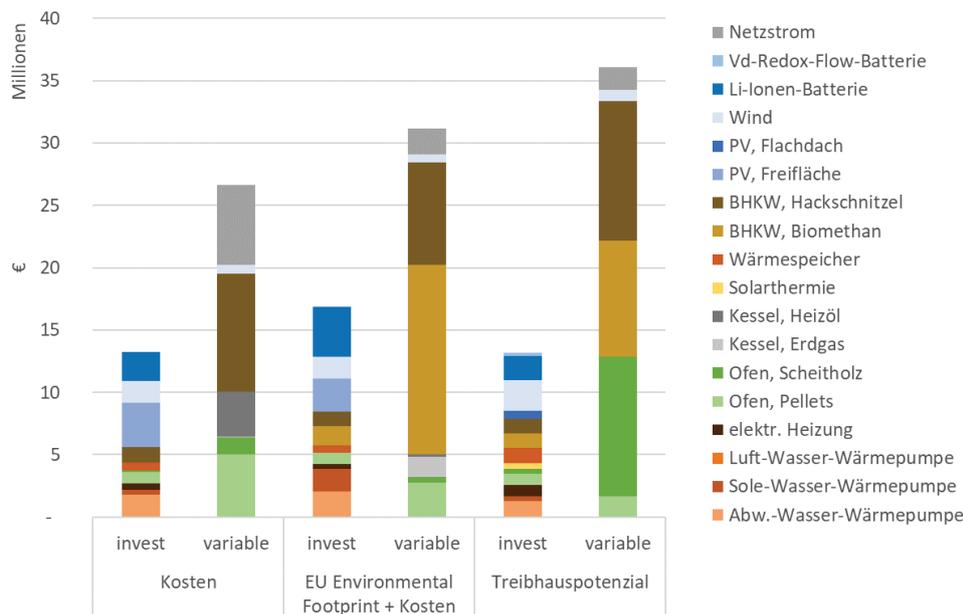


Abbildung 14 Investitionen und variable Kosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele

Bezogen auf die Kilowattstunde Strom oder Wärme können die mittleren Gestehungskosten über 20 Jahre ermittelt werden. Allerdings ergibt sich bei den Wärmegestehungskosten die Unsicherheit, dass beim Wärmestrom (für Wärmepumpen oder direkte Elektrowärme) nicht ermittelbar ist, ob der Strom aus Eigenerzeugung oder aus dem Stromnetz stammt. Hier wurde der Preis mit einem gewichteten Mittel aus eigenerzeugtem und netzbezogenem Strom ermittelt. Es ergeben sich die in Tabelle 18 dargestellten Kosten. Für Strom liegen die Gestehungskosten deutlich unter den Kosten für Netzstrom.

Tabelle 18 Gestehungskosten pro Optimierungsziel für Strom und Wärme

Optimierung	Kosten		Mehrkriteriell		Treibhauspotenzial	
	Strom	Wärme	Strom	Wärme	Strom	Wärme
Erzeugung vor Ort [€/kWh]	0.101		0.067		0.108	
Netzstrom [€/kWh] (Mittel über alle Jahre)	0.28		0.28		0.28	
gewichtete Gestehungskosten inkl. Netzstrom [€/kWh]	0.114		0.073		0.112	
Gestehungskosten [€/kWh]		0.251		0.273		0.217

8.4 INDIKATOREN IM VERGLEICH

Für jede Energiesystemvariante, die sich für die verschiedenen Optimierungsziele ergibt, können sowohl die Kosten als auch die Umweltwirkungen – aggregiert als Environmental Footprint oder als Einzelindikator – berechnet werden. Abbildung 15 zeigt die Indikatoren Kosten, Gesamtumweltwirkungen als Environmental Footprint, Treibhauspotenzial 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 der mehrkriteriellen und der Treibhauspotenzialoptimierung, ergeben sich bei geringsten Kosten die höchsten Umweltwirkungen insgesamt (Env. Footprint) als auch das höchste Treibhauspotenzial. Bei der Minimierung des Indikators Treibhauspotenzial ergeben sich nur leicht geringere Gesamtumweltwirkungen. Die Atemwegseffekte zeigen hier den höchsten Wert. Grund dafür ist die verstärkte Nutzung von Holz (mehr Feinstaubemissionen) bei dieser Systemkonfiguration.

Als Kompromisslösung zeigt sich die Systemkonfiguration, die sich aus der mehrkriteriellen Optimierung von EU Environmental Footprint und Kosten ergibt. Diese hat zwar nur leicht geringere Kosten als die Treibhauspotenzialoptimierung, die Gesamtumweltwirkungen (Env. Footprint) sind jedoch gegenüber der Kosten- und Treibhauspotenzialoptimierung deutlich reduziert. Das Treibhauspotenzial liegt im Mittelfeld.

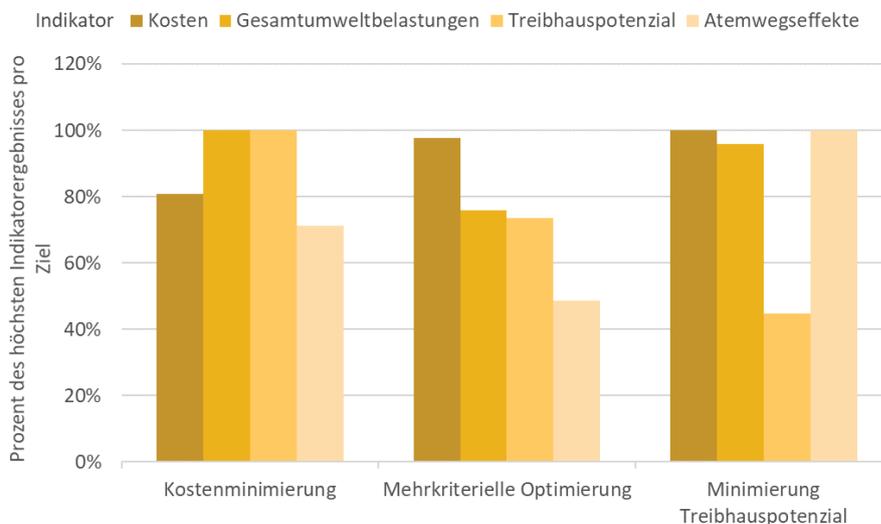


Abbildung 15 Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel

9 VERGLEICH MIT EINEM BUSINESS AS USUAL-SZENARIO

Würde sich an der Strom- und Wärmeerzeugung im Teilort Wiernsheim (Haushalte und GHD) in den nächsten 20 Jahren nichts ändern (Business as usual), wären Kosten, Gesamtumweltbelastungen und Treibhauspotenzial deutlich höher als bei Umsetzung einer der durch die verschiedenen Optimierungen erhaltenen Systemkonfigurationen. So ließen sich über 20 Jahre unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Anlagen bei der Kostenoptimierung 74 %, bei der mehrkriteriellen Optimierung 81 % und bei der Treibhauspotenzialoptimierung 89 % Treibhausgasemissionen einsparen. Die höheren Einsparungen bei den Treibhausgasen gehen jedoch zulasten der Kosten. Diese sind nur bei der Kostenoptimierung mit 18 % deutlich niedriger (wobei die Investitionen in neue Anlagen enthalten sind). Auch die Gesamtumweltbelastungen können mit 39 bis 53 % Reduktion deutlich verbessert werden.

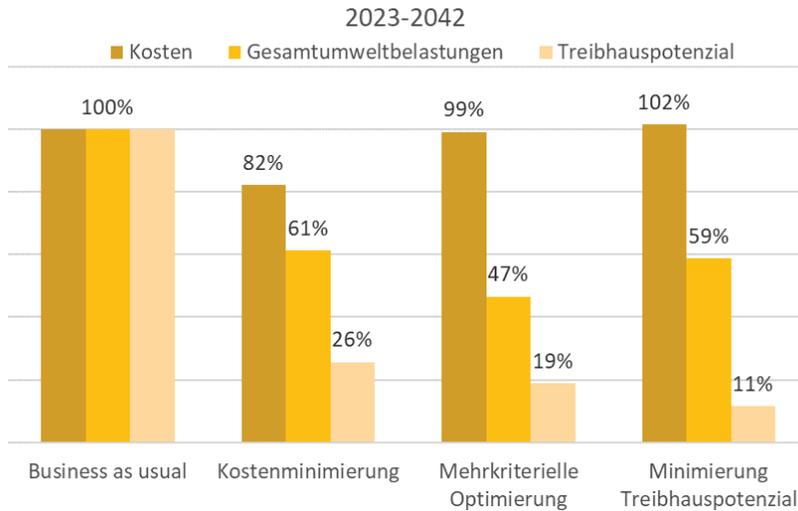


Abbildung 16 Vergleich ausgewählter Indikatoren bis 2042 für die Optimierungsergebnisse im Vergleich zu einem Business as usual-Szenario

10 BEITRAG ZUR TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT

Eine Optimierung des Treibhauspotenzials bedeutet nicht, dass der Wert für das Treibhauspotenzial auf null reduziert werden kann. Dies liegt einerseits an den Vorprozessen in den verwendeten Sachbilanzen für die Herstellung der Anlagen. Wird beispielsweise im Jahr 2038 eine Anlage gebaut, werden dafür Daten aus vergangenen Jahren verwendet, die auch einen entsprechenden Energiemix verwenden, der nicht dem Energiemix des Jahres 2038 entspricht. Damit sind diese Treibhausgasemissionen für zukünftige Investitionen überschätzt.

Betrachtet man nur die variablen Treibhausgasemissionen lassen sich diese bei der mehrkriteriellen Optimierung bis zum Jahr 2042 auf 10 % des Ausgangsniveaus von 2022 reduzieren. Diese werden vor allem vom bezogenen Netzstrom verursacht. Da die Optimierung nur für jedes fünfte Jahr vorgenommen wird, enthält das Jahr 2042 Daten für den Netzstrom für 2038. Zu diesem Zeitpunkt ist dieser noch nicht treibhausgasneutral. Eine Treibhausgasneutralität ist erst dann möglich, wenn auch der bezogene Netzstrom treibhausgasneutral erzeugt wird.

11 UNSICHERHEITEN

Die Belastbarkeit der Ergebnisse einer Energiesystemoptimierung ist u.a. abhängig von den Eingangsparametern Kosten, Umweltwirkungen, Technologieparametern und Wetterdaten. 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 Investitionskosten 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. Obwohl der Technikkatalog auch Kosten für die Zukunft beinhaltet, wurden diese im Modell noch nicht berücksichtigt, da für die Umweltwirkungen noch keine prospektiven Daten für alle Energietechnologien vorliegen. In Bezug auf die Kosten wird die Komplexität des Strommarktes nicht vollständig erfasst, da keine Förderungen, Vergütungen, Abgaben etc. berücksichtigt werden. Auch Preisänderungen über die Zeit bei Investitionen bleiben unberücksichtigt. Ebenso bleiben Maßnahmen für energetische Sanierung sowohl kosten- als auch umweltseitig außen vor.

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. Beispielsweise werden Wärmepumpen im Vergleich zu PV-Anlagen sehr viel vereinfachter modelliert. Dazu kommt, dass alle Wärmepumpen aus Mangel an Daten mit derselben Sachbilanz modelliert wurden. Für ein Wärmenetz liegen bislang keine Sachbilanzdaten vor. Des Weiteren gibt es relativ große Unsicherheiten bei Normierung und Gewichtung der Umweltindikatoren.

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 und -netze müssen viele Vereinfachungen getroffen werden. Auch die technischen Restriktionen bei BHKW-Betrieb bleiben unberücksichtigt.

12 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Optimierungsergebnisse zeigen, dass einzelne Technologien Vorteile in einem, aber Nachteile in einem anderen Aspekt haben. Dies zeigt sich vor allem bei Biomethan, Solarthermie und Vanadium-Redox-Flow-Batterie, da diese nur für einzelne Optimierungsziele zur Anwendung kommen. Andere Technologien wie Aufdach-PV-Anlagen kommen gar nicht zum Einsatz, da Freiflächen- oder Flachdachanlagen unter den getroffenen Annahmen immer vorteilhafter sind. Ähnlich sieht es bei Luft-Wasser-Wärmepumpen aus, die nur in geringem Maße Verwendung finden, da sie im Vergleich zu den anderen zur Verfügung stehenden Wärmepumpen weniger effizient sind.

Insgesamt zeigen alle Optimierungsergebnisse relativ wenig Netzstrombezug, d.h. Umweltwirkungen und Kosten durch Eigenerzeugung sind auf lange Sicht gesehen günstiger. Nach Ende der 15jährigen Betriebszeit des Hackschnitzel-BHKWs wird in ein solches nicht neu investiert, sondern stattdessen u.a. mehr Strom aus dem Netz bezogen, da sich die Umweltwirkungen des Netzstrommixes zwischenzeitlich verbessert haben. Auch die Kostenoptimierung zeigt, dass allein aus Kostensicht die Investition in neue Anlagen sinnvoll ist und die alten Gas- und Ölheizungen so schnell wie möglich ersetzt werden sollten.

Die Ergebnisse sind plausibel und zeigen eine Bandbreite möglicher Systemkonfigurationen auf. Die Systemkonfiguration bei Minimierung von Kosten ist deutlich anders als bei Minimierung von Treibhauspotenzial. Der Vergleich der Umweltwirkungen zeigt aber, dass bei einem Energiesystem, welches nur auf geringste Kosten oder nur auf geringste Treibhausgasemissionen optimiert wurde, Wirkungen in andere Umweltbereiche verlagert werden. Dies kann mit einer mehrkriteriellen Optimierung, in der alle Aspekte Eingang finden, vermieden werden.

In Bezug auf den Indikator Treibhauspotenzial zeigt sich, dass auch die Optimierung nach Kosten schon eine deutliche Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand ermöglicht. Eine weitere Reduktion um 5 bzw. 10 % geht mit Kostensteigerungen von 20 bzw. 22,5 % einher.

13 EMPFEHLUNGEN

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

Für Wiernsheim wird empfohlen, die Technologien, die sich bei der mehrkriteriellen Minimierung von Umweltwirkungen und Kosten ergeben, umzusetzen bzw. zu fördern. Das bedeutet, dass im Bereich

Stromerzeugung Windkraftanlagen, Freiflächen-Photovoltaik, Lithium-Ionen-Batterien bevorzugt betrachtet werden sollten. Kraft-Wärmekopplung in Blockheizkraftwerken ist ebenfalls sinnvoll. Da deren Vorteile nur in Verbindung mit einem Wärmenetz genutzt werden können, muss geprüft werden, ob sich ein solches realisieren lässt. Zur alleinigen Wärmeerzeugung werden Abwasserwärme sowie Erdwärme (erschlossen über Sonden) in Kombination mit Wärmepumpen empfohlen. Auch Pellet-Öfen sind in einem gewissen Umfang vorteilhaft. Bei dem relativ großen Umfang von Elektrowärme ist zu berücksichtigen, dass diese nur vorteilhaft ist, solange sie aus Überschussstrom aus der Photovoltaik- und Windenergie-Anlage gespeist wird. Dies ist bei einer Detailplanung zu berücksichtigen.

14 ANHANG

14.1 UMWELTWIRKUNGEN UND KOSTEN PRO INVESTIERTER EINHEIT PRO JAHR

	Klimawandel	Süßwasser- u. Boden- versauerung	Süßwas- serökotoxi- zität	Süßwas- sereutro- phierung	Mee- reseutro- phierung	Bodeneu- trophierung	Humantoxi- zität, karzi- nogen	Ionisierende Strahlung	Humanto- xizität, nicht-karzi- nogen	Ozonschicht- zerstörung
	kg CO ₂ -Eq	mol H ⁺ -Eq	CTU	kg P-Eq	kg N-Eq	mol N-Eq	CTUh	kg U235-Eq	CTUh	kg CFC-11-Eq
BHKW, Biomethan	3,10E+00	2,23E-02	2,28E+01	2,29E-03	3,88E-03	4,02E-02	1,88E-06	3,89E-01	1,40E-06	2,16E-07
BHKW, Hackschnitzel	4,16E+00	2,61E-02	4,08E+01	1,82E-03	5,00E-03	4,68E-02	3,77E-06	3,28E-01	1,07E-06	1,59E-05
Wind	1,83E+01	1,11E-01	1,06E+02	1,58E-02	5,61E-02	2,57E-01	5,56E-06	1,38E+00	1,00E-05	1,19E-06
PV, Freifläche	6,24E+01	3,89E-01	9,51E+01	2,42E-02	9,18E-02	8,76E-01	5,31E-06	3,63E+00	1,23E-05	4,43E-06
PV, Flachdach	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, Aufdach, S	5,98E+01	3,68E-01	1,28E+02	3,91E-02	8,84E-02	8,33E-01	2,91E-06	4,60E+00	1,49E-05	4,54E-06
PV, Aufdach, W	5,98E+01	3,68E-01	1,28E+02	3,91E-02	8,84E-02	8,33E-01	2,91E-06	4,60E+00	1,49E-05	4,54E-06
PV, Aufdach, O	5,98E+01	3,68E-01	1,28E+02	3,91E-02	8,84E-02	8,33E-01	2,91E-06	4,60E+00	1,49E-05	4,54E-06
Erdwärmesonde	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, Dach, Flachkoll.	8,26E+00	7,85E-02	3,35E+01	1,19E-02	1,34E-02	1,60E-01	1,72E-06	5,54E-01	8,62E-06	7,28E-07
Abw.-Wärmetauscher	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
Solarthermie, Freifläche, Flachkoll.	1,29E+01	8,31E-02	3,38E+01	1,07E-02	1,42E-02	1,70E-01	1,89E-06	7,45E-01	7,53E-06	7,17E-07
Solarthermie, Freifläche, Röhrenkoll.	9,97E+00	7,69E-02	3,31E+01	1,09E-02	1,44E-02	1,77E-01	1,77E-06	7,35E-01	7,66E-06	6,98E-07
Li-Ionen-Batterie	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	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	8,70E-01	4,59E-03	9,97E+00	4,08E-04	1,07E-03	1,02E-02	9,30E-07	8,62E-02	2,34E-07	5,14E-08
Luft-Wasser-Wärmepumpe	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	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	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
Ofen, Pellets	4,56E+00	2,33E-02	3,69E+01	2,57E-03	4,83E-03	4,55E-02	3,24E-06	5,89E-01	1,03E-06	2,50E-07
Ofen, Scheitholz	3,44E+00	1,70E-02	2,74E+01	1,99E-03	3,78E-03	3,57E-02	2,40E-06	4,24E-01	7,83E-07	2,08E-07

Umweltwirkungen und Kosten pro investierter Einheit und Jahr (Fortsetzung)

	Photochemisches Oxidantienpotenzial	Atemwegseffekte	Wasserverbrauch	Fossile Ressourcen	Landnutzung	Mineralische u. metallische Ressourcen	EU Environmental Footprint	Equilibrium	Kosten
	kg NMVOC-Eq	disease incidence	m3 water-Eq	MJ	points	kg Sb-Eq	-	-	€
BHKW, Biomethan	1,36E-02	2,33E-07	1,89E+00	4,57E+01	3,19E+01	3,65E-04	2,73E-13	2,65E-13	3,58E+01
BHKW, Hackschnitzel	1,72E-02	3,13E-07	2,19E+00	5,57E+01	4,80E+01	1,08E-04	3,94E-13	3,80E-13	2,68E+01
Wind	7,97E-02	1,54E-06	6,97E+00	2,50E+02	2,49E+02	3,15E-03	1,36E-12	1,33E-12	3,20E+01
PV, Freifläche	2,40E-01	4,58E-06	2,11E+01	8,41E+02	3,51E+03	2,35E-03	1,70E-12	1,65E-12	3,33E+01
PV, Flachdach	1,83E-01	3,41E-06	1,52E+01	6,32E+02	4,05E+02	3,82E-03	1,58E-12	1,54E-12	5,24E+01
PV, Aufdach, S	2,34E-01	4,02E-06	1,98E+01	8,32E+02	5,20E+02	8,01E-03	2,57E-12	2,51E-12	5,43E+01
PV, Aufdach, W	2,34E-01	4,02E-06	1,98E+01	8,32E+02	5,20E+02	8,01E-03	2,57E-12	2,51E-12	5,43E+01
PV, Aufdach, O	2,34E-01	4,02E-06	1,98E+01	8,32E+02	5,20E+02	8,01E-03	2,57E-12	2,51E-12	5,43E+01
Erdwärmesonde	6,28E-02	1,17E-06	1,19E+00	1,07E+02	1,17E+01	1,59E-05	1,23E-13	1,29E-13	3,64E+01
Solarthermie, Dach, Flachkoll.	4,01E-02	6,65E-07	4,07E+00	1,12E+02	1,17E+02	3,21E-03	9,20E-13	9,07E-13	2,90E+01
Abw.-Wärmetauscher	5,81E-02	7,41E-07	1,60E+01	8,16E+01	5,68E+01	1,48E-03	7,38E-13	7,39E-13	2,00E+01
Solarthermie, Freifläche, Flachkoll.	4,35E-02	7,69E-07	4,66E+00	1,31E+02	1,51E+03	2,60E-03	8,49E-13	8,26E-13	1,19E+01
Solarthermie, Freifläche, Röhrenkoll.	4,30E-02	6,97E-07	4,26E+00	1,23E+02	1,53E+03	2,69E-03	8,42E-13	8,25E-13	1,19E+01
Li-Ionen-Batterie	6,02E-02	8,54E-07	9,38E+00	3,46E+02	1,73E+02	1,07E-03	6,72E-13	6,52E-13	4,76E+01
Vd-Redox-Flow-Batterie	7,65E-02	2,61E-06	7,63E+00	3,17E+02	9,05E+01	4,19E-04	2,83E-12	2,78E-12	4,17E+01
Wärmespeicher	3,39E-03	6,64E-08	4,65E-01	1,26E+01	2,40E+01	1,13E-05	9,08E-14	8,75E-14	5,10E+00
Luft-Wasser-Wärmepumpe	1,65E-02	2,33E-07	1,49E+00	4,34E+01	3,93E+01	1,57E-03	4,62E-13	4,46E-13	5,89E+01
Sole-Wasser-Wärmepumpe	1,65E-02	2,33E-07	1,49E+00	4,34E+01	3,93E+01	1,57E-03	4,62E-13	4,46E-13	6,01E+01
Abw.-Wasser-Wärmepumpe	1,65E-02	2,33E-07	1,49E+00	4,34E+01	3,93E+01	1,57E-03	4,62E-13	4,46E-13	6,01E+01
Ofen, Pellets	1,75E-02	2,77E-07	2,10E+00	6,80E+01	1,51E+02	2,04E-04	3,67E-13	3,53E-13	3,02E+01
Ofen, Scheitholz	1,37E-02	2,11E-07	1,77E+00	5,14E+01	7,43E+01	1,65E-04	2,75E-13	2,65E-13	1,00E+01

14.2 UMWELTWIRKUNGEN UND KOSTEN PRO VARIABLEN EINHEIT

	Klimawandel	Süßwasser- u. Bodenver- sauerung	Süßwas- serökotoxi- zität	Süßwas- sereutro- phierung	Mee- reseutro- phierung	Bodeneutro- phierung	Humantoxi- zität, karzi- nogen	Ionisierende Strahlung	Humantoxizität, nicht-karzi- nogen	Ozonschicht- zerstörung
	kg CO ₂ -Eq	mol H ⁺ -Eq	CTU	kg P-Eq	kg N-Eq	mol N-Eq	CTUh	kg U235-Eq	CTUh	kg CFC-11-Eq
BHKW, Biomethan, elektrisch	4,82E-03	2,35E-04	1,22E-03	1,17E-07	1,19E-04	1,31E-03	8,91E-11	2,40E-05	7,33E-11	2,50E-11
BHKW, Biomethan, thermisch	8,18E-04	3,98E-05	2,06E-04	1,98E-08	2,02E-05	2,22E-04	1,51E-11	4,07E-06	1,24E-11	4,25E-12
BHKW, Hackschnitzel, elektrisch	1,04E-02	1,55E-03	2,38E-01	2,23E-06	7,60E-04	8,61E-03	2,13E-09	3,52E-05	3,27E-07	7,70E-11
BHKW, Hackschnitzel, thermisch	1,77E-03	2,64E-04	4,04E-02	3,79E-07	1,29E-04	1,46E-03	3,61E-10	5,97E-06	5,54E-08	1,31E-11
Wind	1,06E-04	4,79E-07	3,21E-04	1,64E-08	1,32E-07	1,42E-06	6,17E-12	8,05E-06	1,08E-11	2,03E-11
PV, Freifläche	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PV, Dach	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Kessel, Erdgas	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
Luft-Wasser-Wärmepumpe	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	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	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
Ofen, Pellets	1,42E-02	2,62E-04	5,47E-02	1,52E-05	1,13E-04	1,31E-03	5,46E-10	1,72E-03	6,44E-08	2,82E-10
Ofen, Scheitholz	1,69E-02	3,52E-04	9,62E-02	1,23E-05	1,58E-04	1,81E-03	2,36E-09	1,52E-03	1,02E-07	3,45E-10
Kessel, Heizöl	2,92E-01	3,30E-04	2,73E-03	1,09E-05	4,65E-05	4,89E-04	1,40E-10	1,27E-03	2,32E-09	2,05E-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
Pellets	3,00E-02	2,41E-04	5,29E-02	1,74E-05	7,68E-05	8,31E-04	1,14E-09	9,77E-03	1,74E-08	2,95E-09
Holz hackschnitzel	8,14E-03	4,20E-05	1,40E-02	2,49E-06	1,44E-05	1,49E-04	3,12E-10	1,26E-03	8,11E-10	1,54E-09
Scheitholz	7,76E-03	4,15E-05	6,96E-03	2,59E-06	1,65E-05	1,65E-04	2,26E-10	5,95E-04	2,69E-10	1,54E-09
Heizöl, 2023	4,06E-02	5,00E-04	5,04E-02	3,31E-06	6,39E-05	6,94E-04	8,53E-10	1,91E-02	2,98E-09	6,82E-08
Heizöl, 2028	4,06E-02	5,00E-04	5,04E-02	3,31E-06	6,39E-05	6,94E-04	8,53E-10	1,91E-02	2,98E-09	6,82E-08
Heizöl, 2033	4,06E-02	5,00E-04	5,04E-02	3,31E-06	6,39E-05	6,94E-04	8,53E-10	1,91E-02	2,98E-09	6,82E-08
Heizöl, 2038	4,06E-02	5,00E-04	5,04E-02	3,31E-06	6,39E-05	6,94E-04	8,53E-10	1,91E-02	2,98E-09	6,82E-08

Umweltwirkungen und Kosten pro variabler Einheit (Fortsetzung)

	Photochemisches Oxidantienpotenzial	Atemwegseffekte	Wasserverbrauch	Fossile Ressourcen	Landnutzung	Mineral. u. metallische Ressourcen	EU Environmental Footprint	Equilibrium	Kosten
	kg NMVOC-Eq	disease incidence	m3 water-Eq	MJ	points	kg Sb-Eq	-	-	€
BHKW, Biomethan, elektrisch	3,14E-04	1,69E-09	9,37E-05	3,20E-03	2,01E-03	1,88E-08	2,15E-16	3,07E-16	1,30E-01
BHKW, Biomethan, thermisch	5,32E-05	2,86E-10	1,59E-05	5,43E-04	3,41E-04	3,20E-09	3,65E-17	5,21E-17	0,00E+00
BHKW, Hackschnitzel, elektrisch	2,04E-03	3,16E-08	3,26E-02	1,03E-02	4,11E-03	3,54E-09	3,77E-15	4,67E-15	1,40E-01
BHKW, Hackschnitzel, thermisch	3,46E-04	5,36E-09	5,54E-03	1,74E-03	6,98E-04	6,01E-10	6,39E-16	7,92E-16	0,00E+00
Wind	4,39E-07	4,55E-12	1,39E-05	1,57E-03	9,37E-04	1,60E-09	2,02E-18	1,91E-18	1,29E-01
PV, Freifläche	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,20E-01
PV, Dach	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,40E-02
Kessel, Erdgas	4,94E-05	2,05E-10	9,84E-04	8,79E-02	2,45E-02	4,49E-08	8,81E-16	5,01E-16	0,00E+00
Luft-Wasser-Wärmepumpe	5,29E-07	7,84E-12	7,78E-05	1,59E-03	4,05E-04	1,61E-09	9,48E-17	5,08E-17	0,00E+00
Sole-Wasser-Wärmepumpe	3,30E-07	4,90E-12	4,86E-05	9,92E-04	2,53E-04	1,01E-09	5,92E-17	3,17E-17	0,00E+00
Abw.-Wasser-Wärmepumpe	3,30E-07	4,90E-12	4,86E-05	9,92E-04	2,53E-04	1,01E-09	5,92E-17	3,17E-17	0,00E+00
Ofen, Pellets	3,31E-04	2,97E-08	1,22E-02	1,68E-01	4,74E-02	8,60E-08	1,33E-15	1,55E-15	0,00E+00
Ofen, Scheitholz	5,37E-04	4,23E-08	5,03E-03	1,51E-01	8,86E-02	1,71E-07	2,03E-15	2,35E-15	0,00E+00
Kessel, Heizöl	1,33E-04	2,13E-09	1,38E-03	1,24E-01	3,45E-02	6,32E-08	1,37E-15	8,63E-16	0,00E+00
Netzstrom 2023	5,23E-04	3,26E-09	9,28E-02	7,94E+00	1,18E+00	1,21E-05	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	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	8,26E-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	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	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	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	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	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	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	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	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	4,64E-16	1,76E-01
Pellets	2,16E-04	9,39E-09	1,54E-02	5,84E-01	1,99E+01	2,13E-07	1,01E-15	1,01E-15	9,00E-02
Holz hackschnitzel	6,94E-05	4,90E-10	1,78E-03	1,29E-01	2,28E+01	2,42E-08	3,34E-16	2,76E-16	3,99E-02
Scheitholz	1,16E-04	3,14E-10	1,68E-03	1,06E-01	4,37E+01	1,94E-08	5,00E-16	3,95E-16	7,86E-02
Heizöl, 2023	2,84E-04	2,50E-09	5,49E-03	4,14E+00	1,59E-01	4,82E-08	1,32E-15	1,23E-15	0,77E-01
Heizöl, 2028	2,84E-04	2,50E-09	5,49E-03	4,14E+00	1,59E-01	4,82E-08	1,32E-15	1,23E-15	0,66E-01
Heizöl, 2033	2,84E-04	2,50E-09	5,49E-03	4,14E+00	1,59E-01	4,82E-08	1,32E-15	1,23E-15	0,73E-01
Heizöl, 2038	2,84E-04	2,50E-09	5,49E-03	4,14E+00	1,59E-01	4,82E-08	1,32E-15	1,23E-15	0,88E-01

14.3 ERGEBNISTABELLE FÜR INSTALLIERTE LEISTUNGEN/KAPAZITÄTEN

Tabelle 19 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele (Leistungen für Wärmepumpen entsprechen den maximalen Wärmeleistungen, die der BHKW beziehen sich auf den Input; THG = Treibhausgase)

	Strom												Strom/Wärme			
	PV, Freifläche [kWp]		PV, Flachdach [kWp]		Wind [kW]		Li-Ionen-Batterie [kWh]			Vd-Redox-Flow-Batterie [kWh]			BHKW, Hackschnitzel [kW]	BHKW, Biomethan [kW]		
Optimierungsziel	2023	2038	2033	2038	2028	2038	2023	2033	2038	2023	2028	2038	2023	2023	2028	2038
Kosten	4381	3920			3193	1423	2405		2342				3000			
EU Environmental Footprint + Kosten	3699	1160			3409	702	4182	516	3305				3000	862	1286	2138
Klimawandel/THG			286	1867	4556	1613	1990		2028	62	103	846	3000	1423	146	1577
Wärme																
	Abw.-Wärmetauscher [kW]		Abw.-Wasser-Wärmepumpe [kW]		Erdwärmesonde [kW]	Sole-Wasser-Wärmepumpe [kW]	Luft-Wasser-Wärmepumpe [kW]	elektr. Heizung [kW]			Ofen, Pellets [kW]	Ofen, Scheitholz [kW]			Solarthermie, Freifläche, Röhrenkoll. [m ²]	
Optimierungsziel	2028	2038	2028	2038	2023	2023	2028	2023	2028	2038	2023	2023	2033	2038	2023	2038
Kosten	854	699	1269	1039	165	251	12*	445	1863	600	2000		88	1912		
EU Environmental Footprint + Kosten	1153	267	1713	396	720	1091		224	1730		2000					
Klimawandel/THG	360	1208	535	1795	155	234			4873	229	2000	2000			37	4211
	Wärmespeicher [kWh]															
	2023	2028	2033	2038												
Kosten	3308		334	13288												
EU Environmental Footprint + Kosten	3183	816		7966												
Klimawandel/THG	10256	495		5722												

*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.