

ENERGIEKONZEPT GERSTETTEN-GUSSENSTADT

Februar 2024
Projekt: InPEQt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Hottenroth, Heidi
Hochschule Pforzheim, INEC
Projektleitung: Prof. Dr. Ingela Tietze, Prof. Dr. Tobias Viere

INHALT

1	Einleitung	2
2	Rahmendaten	2
3	Bedarfe	2
4	Bestandsanlagen	5
5	Potenzielle Erzeugungsanlagen und Speicher	5
6	Szenarien	7
	6.1 Alle Optionen, Hackschnitzelverfügbarkeit ohne Limit	7
	6.2 Alle Optionen mit begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit	7
	6.3 Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzelkessel	7
	6.4 Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzelkessel mit begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit	7
7	Eingangsparameter	8
	7.1 Kosten	8
	7.2 Umweltwirkungen	9
	7.3 Lebensdauern	10
	7.4 Technische Parameter	10
	7.5 Wetterabhängige Daten	11
8	Optimierungsziel	12
9	Ergebnisse	14
	9.1 Installierte Leistung	14
	9.2 Strom- und Wärmeerzeugung	15
	9.3 Kosten	16
	9.4 Treibhauspotenzial	18
10	Unsicherheiten	18
11	Schlussfolgerungen	19
12	Empfehlungen	19

1 EINLEITUNG

Im Teilort Gussenstadt der Gemeinde Gerstetten soll das Wärmenetz erweitert werden. Da das Potenzial an Biomasse, das die bestehende Biogasanlage samt Blockheizkraftwerken speist, begrenzt ist, müssen andere erneuerbare Energieträger zum Einsatz kommen.

Im Rahmen des Projekts InPEQt 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. Damit können in der frühen Planungsphase nachhaltigere sektorkoppelnde Energiesystemkonfigurationen identifiziert werden, die Wärme und Strom (inkl. E-Mobilität) abdecken. Obwohl es in Gussenstadt vornehmlich um die Wärmeerzeugung geht, wird der Strombedarf mit betrachtet, um die Auswirkungen der strombasierten Wärmeerzeugung berücksichtigen zu können. Zwischenergebnisse wurden mit einem Vertreter der Gemeinde Gerstetten¹ diskutiert und mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse das Energiekonzept abgeleitet. Dieses dient zur Orientierung bei der Auswahl einer möglichst nachhaltigen Energieinfrastruktur. Es beinhaltet keine Detailplanung.

2 RAHMENDATEN

Die Systemgrenze in Bezug auf Strom- und Wärmebedarf bildet der Teil von Gussenstadt, der noch nicht an das Wärmenetz angeschlossen ist. Es werden 200 Haushalte einbezogen. Die Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) und Industrie bleiben außen vor, da hier meist spezielle Anforderungen bei Strom- und Wärmebedarf bestehen.

Für die Vorlauftemperatur des Wärmenetzes werden 80 °C angenommen. Kosten und Umweltwirkungen von Bau und Betrieb des neuen Wärmenetzes bleiben unberücksichtigt, da Größe und Art des Wärmenetzes keine Entscheidungsvariablen sind.

Der Zeithorizont der Energiesystemmodellierung beträgt 20 Jahre (2023 bis 2042).

Die Einwohnerzahl von Gussenstadt beträgt 1425², was ca. einem Anteil von 12 % an der Gesamteinwohnerzahl von Gerstetten entspricht. Diese bleibt über die Zeit konstant.

Die Wetterdaten für ein typisches meteorologisches Jahr für die Koordinaten latitude = 48.642°, longitude = 9.958° wurden über das Tool PVGIS³ ermittelt.

3 BEDARFE

Für den Strom- und Wärmebedarf werden die für die Planung verwendeten Werte angesetzt. Für den Strombedarf ergeben sich bei einem Durchschnittswert von 3,5 MWh/a pro Haushalt für 200 Haushalte 700 MWh/a.

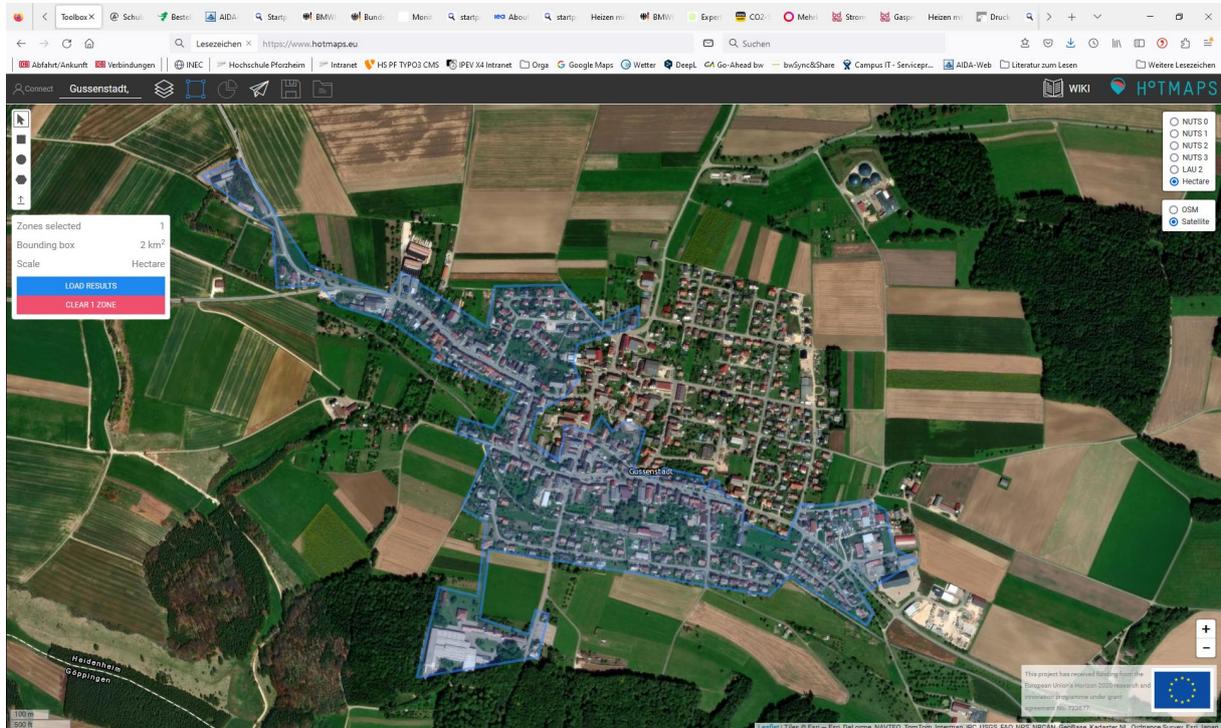
¹ Hermann Köpf

² <https://www.gerstetten.de/de/Wir-in-Gerstetten/Ortsportraet/Zahlen-und-Fakten>, Zugriff: 07.07.2023

³ PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

Der durchschnittliche Wärmebedarf pro Haushalt werden 25 MWh/a angenommen, woraus sich eine Summe von 5 GWh/a ergibt.

Für die Ermittlung des stündlichen Wärme- und Strombedarfs des relevanten Teilgebiets von Gussenstadt werden die Tools hotmaps⁴ und nPro verwendet. Mit Hilfe von hotmaps werden die Wohnflächen nach Baualtersklassen ermittelt und mit dem nPro-Tool* der Wärme- und Strombedarf pro m², Gebäudeart und Baualtersklasse.



Für das betrachtete Teilgebiet von Gussenstadt ergibt sich mit nPro ein Wärmebedarf für ein typisches meteorologisches Jahr von 6,4 GWh. Die Ermittlung kann aus Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1 Ermittlung des Wärmebedarfs mit Kennwerten aus hotmaps und nPro

	Flächen nach Baualtersklassen nach hotmaps	Spez. Wärmebedarf nach nPro			
		Raumwärme	Trinkwarmwasser	Raumwärme	Trinkwarmwasser
		kWh/m ² /a		kWh/a	
	m ²				
Einfamilienhaus (1958-1968)	9134	187	35	1708143	319706
Einfamilienhaus (1979-1983)	10541	135	35	1423070	368944
Einfamilienhaus (1995-2001)	4095	114	35	466813	143320
Einfamilienhaus ab 2002	13908	81	35	1126576	486792
Summe	37679			4724601	1318762

Die mittels der o.g. Kennwerte mit nPro erstellte Zeitreihe wird linear mit dem Wert von 5 GWh skaliert.

⁴ <https://www.hotmaps.eu>

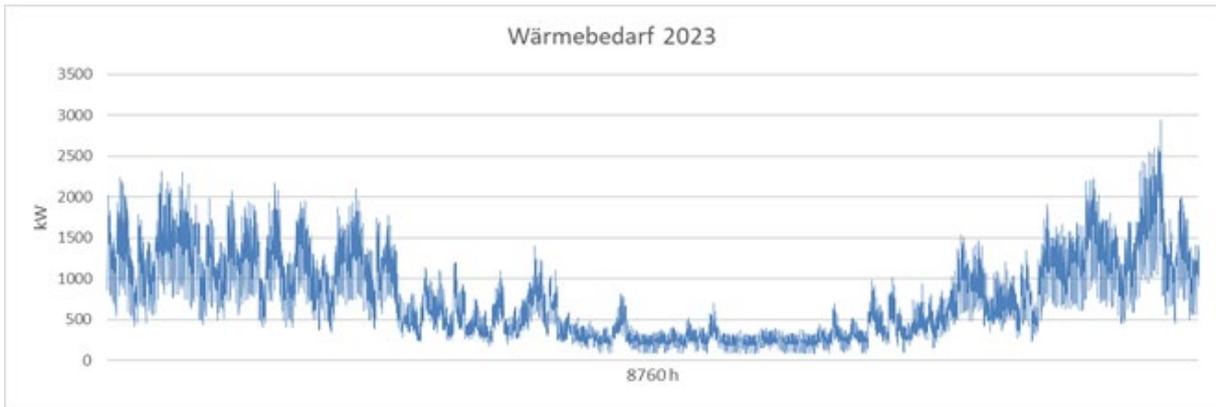


Abbildung 1 Lastprofil Wärme

Für den Wärmebedarf wird ein Absinken über die Zeit angenommen. Ausgangspunkt ist die Annahme der KEA-BW⁵, dass der Wärmebedarf bis 2050 um 50 % sinkt. Für die Eingangsdaten im Modell wird ein linearer Abfall bis 2038 um 1/3 angenommen.

Für den Strombedarf für Gussenstadt (Teilgebiet) wird mit nPro ein Wert von 0,8 GWh/a mit einem Maximalwert von 203 kW ermittelt. Die zugehörige Zeitreihe wird ebenfalls mit nPro über die Flächen je Baualterklasse aus Tabelle 1 erstellt. Der Strombedarf umfasst nur Haushaltsstrom. Strom für Wärmeerzeugung ist nicht enthalten. Auch hier wird mit dem geplanten Wert von 0,7 GWh/a skaliert.

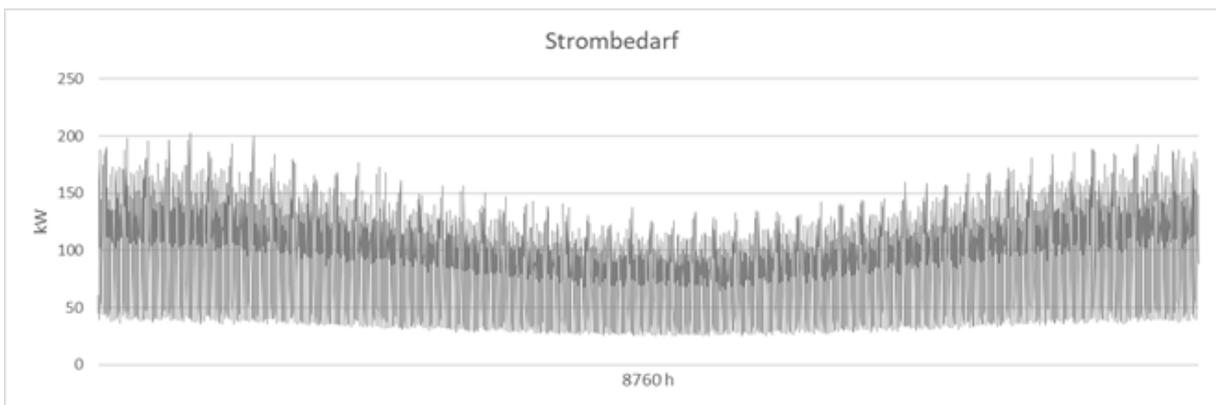


Abbildung 2 Lastprofil Strom

Beim Strombedarf für die E-Mobilität wird von 1,1 MWh/a pro Ladepunkt ausgegangen. Dieser wird für den Ausbau der Ladeinfrastruktur von 25 Ladepunkten im ersten Jahr auf 200 Ladepunkte im Jahr 2038 verwendet. Im Jahr 2028 wird von 50 und im Jahr 2032 von 100 Ladepunkten ausgegangen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten jährlichen Strombedarfe und das in Abbildung 3 gezeigte Lastprofil für 2023.

Tabelle 2 Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042

		Strombedarf E-Mobilität
2023-2027	MWh/a	27,5
2028-2032	MWh/a	55
2033-2037	MWh/a	110
2038-2042	MWh/a	220

⁵ KEA-BW (2022) Technikatalog, Tabellen v1

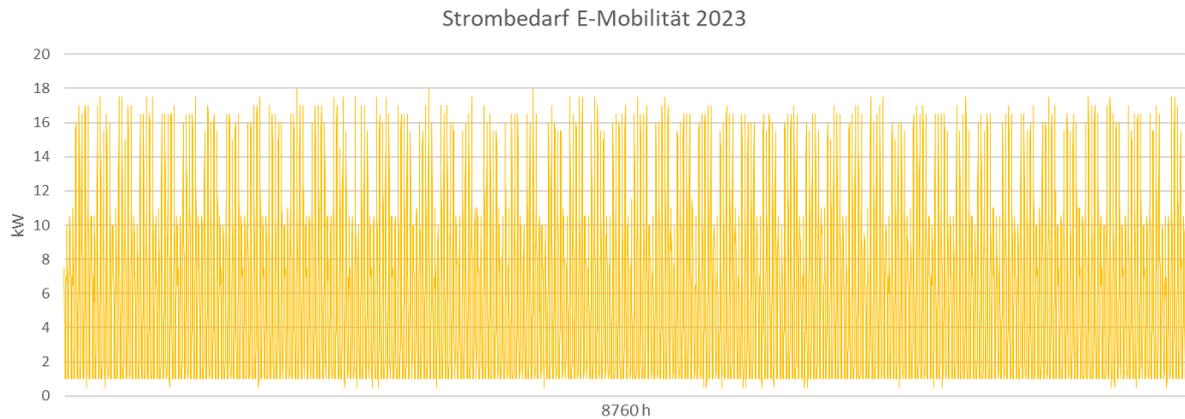


Abbildung 3 Lastprofil E-Mobilität 2023

4 BESTANDSANLAGEN

In Gerstetten bzw. Gussenstadt existieren bereits mehrere Windkraftanlagen. Diese werden jedoch im Energiesystemmodell nicht berücksichtigt, da der Strom auch jetzt schon ins Netz eingespeist wird und der Bedarf an Windstrom bundesweit noch nicht gedeckt ist.

Bei stromerzeugenden Bestandsanlagen wurden jedoch PV-Anlagen berücksichtigt, da PV-Strom überwiegend dem Eigenverbrauch dient. Dafür wurde eine Auswertung der Daten im Marktstammdatenregister (Stand 07/23) durchgeführt. Dazu wurde die Nettonennleistung pro Jahr und Ausrichtung für den Gesamort Gerstetten abgefragt. Anlagen mit Nordausrichtung wurden aufgrund ihres geringen Beitrags, Anlagen über 20 Jahre aufgrund der geringen noch zu erwartenden Lebensdauer vernachlässigt. Der Anteil für den Teilort Gussenstadt wurde über den Einwohneranteil (12 %) heruntergerechnet. Die sich daraus ergebenden Leistungen können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3 Bestands-PV-Anlagen im Teilort Gussenstadt nach Marktstammdatenregister

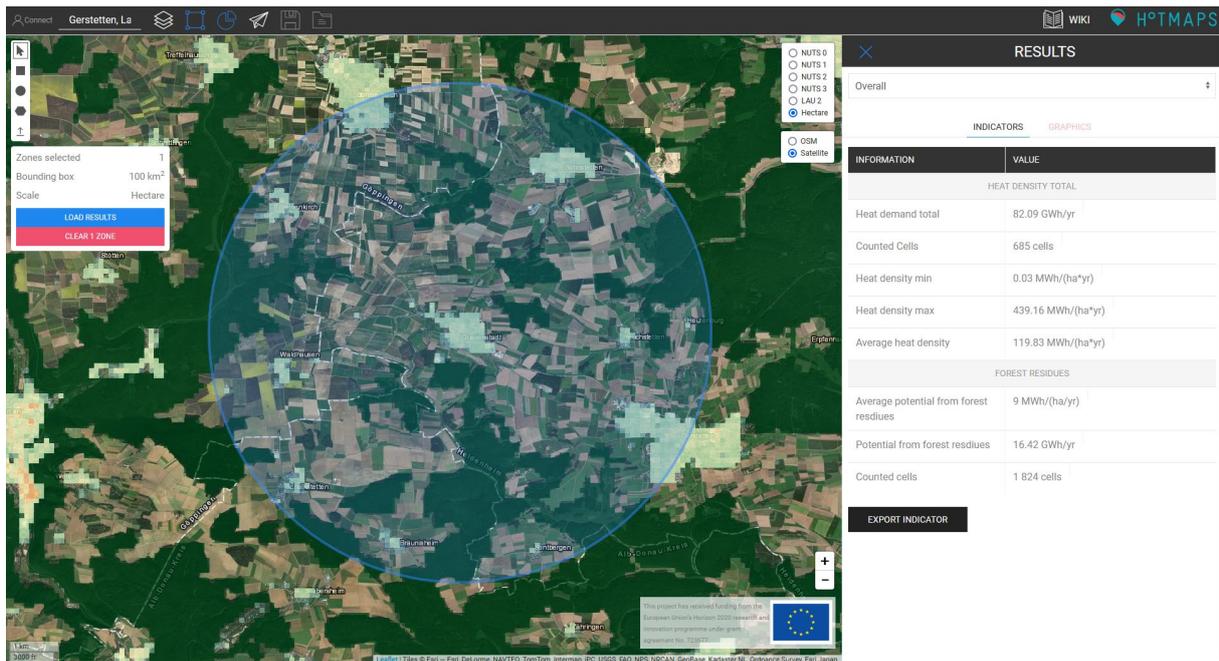
Alter [a]	Ost [kWp]	West [kWp]	Süd [kWp]
1	15	9	58
5	49	45	205
10	15	20	106
15	37	48	510
20 ¹	4	9	182
¹ Aufgrund geringer Relevanz vernachlässigt			

5 POTENZIELLE ERZEUGUNGSANLAGEN UND SPEICHER

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

- Windenergieanlagen
 - Annahme: 3,2 MW pro Anlage; Typ Siemens SWT-3.2-113

- Potenzial (ganze Gemeinde Gerstetten): lt. Energieatlas Baden-Württemberg⁶ 63 Anlagen in geeigneten Flächen, 42 Anlagen in bedingt geeigneten Flächen → 336 MW
- Photovoltaik: Potenzial lt. Energieatlas Baden-Württemberg⁷
 - Freifläche: 73 MWp
 - Flachdach: 3,8 MWp
 - Aufdach: Süd: 6,6 MWp, West: 3,4 MWp, Ost: 2,4 MWp
- Holzhackschnitzel, primär: 1,2 GWh/a (Potenzial für Reststoffe Forstwirtschaft nach hotmaps im Umkreis von 5 km skaliert mit Wärmebedarf innerhalb der 5 km und Wärmebedarf Gussenstadt)
- Holzhackschnitzel, sekundär: ein Drittel des Hackschnitzelbedarfs kann aus sekundärem Holz gedeckt werden



- Holzhackschnitzel-BHKW
- Hackschnitzel-Kessel
- Abwasser: Abwasser-Wärmetauscher (5000 kW nach ASUE⁸: 2-3 kWh/d/EW) + Abwasser-Wasser-Wärmepumpe

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

- Luft: Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Pufferspeicher
- Lithium-Ionen-Batterie
- Vanadium-Redox-Flow-Batterie
- Zusätzlich Netzstrom
- Power to Heat: Heizstab oder Elektrodenkessel
- Solarthermie, Freifläche, Röhren-/bzw. Flachkollektor

⁶ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/index.xhtml>

⁷ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/index.xhtml>

⁸ ASUE (2021): Innovative Quartiersversorgung

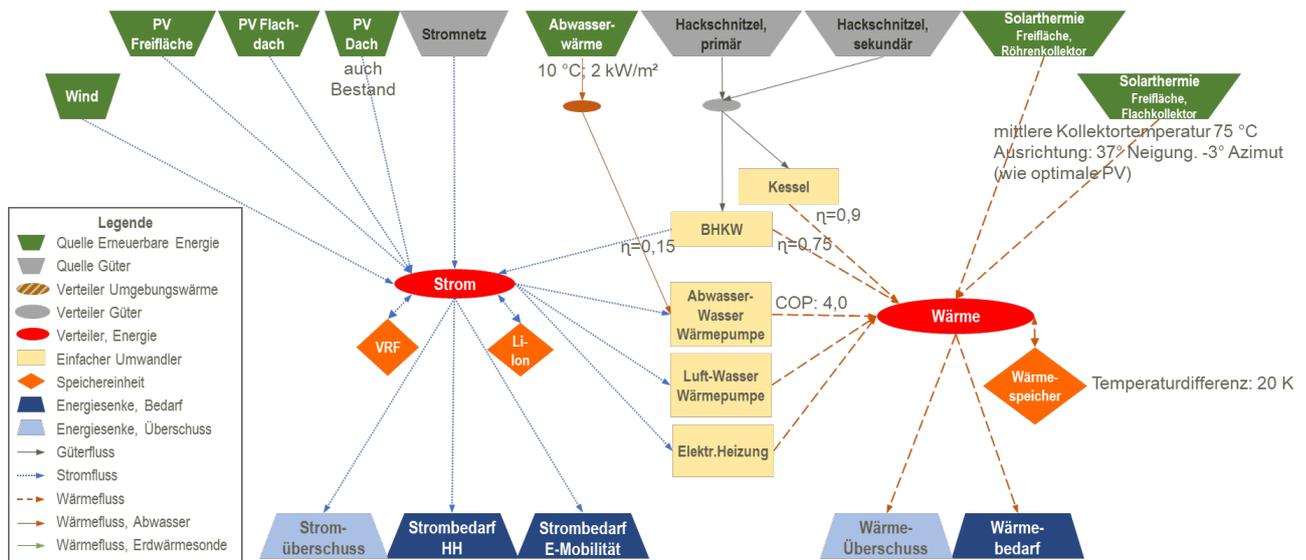


Abbildung 4 Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern

6 SZENARIEN

Die im Folgenden beschriebenen Szenarien variieren in der Auswahl der zur Optimierung zur Verfügung stehenden Technologien zur Wärmeerzeugung und dem verfügbaren Holzhackschnitzelpotenzial. Im Basisszenario stehen alle Technologien mit dem im Abschnitt 5 dargestellten Potenzial zur Verfügung, wobei das Hackschnitzelpotenzial unbegrenzt ist. In einem weiteren Szenario wird die Hackschnitzelverfügbarkeit limitiert. Derzeit wird geplant, das neue Wärmenetz über eine Luft-Wasserwärmepumpe und einen Hackschnitzelkessel zu speisen. Aus diesem Grund umfassen zwei weitere Szenarien nur diese beiden Technologien, wobei einmal die Hackschnitzelverfügbarkeit unbegrenzt und einmal begrenzt ist.

6.1 ALLE OPTIONEN, HACKSCHNITZELVERFÜGBARKEIT OHNE LIMIT

Alle Technologien stehen mit den oben beschriebenen Potenzialen zur Verfügung und Hackschnitzel sind unbegrenzt verfügbar.

6.2 ALLE OPTIONEN MIT BEGRENZTER HACKSCHNITZELVERFÜGBARKEIT

Hackschnitzel aus Primärmaterial stehen im Umfang von 1,2 GWh pro Jahr und sekundäre Hackschnitzel mit 0,6 GWh pro Jahr zur Verfügung.

6.3 LUFT-WASSERWÄRMEPUMPE UND HACKSCHNITZELKESSEL

Zur Wärmeerzeugung stehen nur Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzelkessel zur Verfügung, wobei das Hackschnitzelpotenzial unbegrenzt ist.

6.4 LUFT-WASSERWÄRMEPUMPE UND HACKSCHNITZELKESSEL MIT BEGRENZTER HACKSCHNITZELVERFÜGBARKEIT

Hackschnitzel aus Primärmaterial stehen im Umfang von 1,2 GWh pro Jahr und sekundäre Hackschnitzel mit 0,6 GWh pro Jahr zur Verfügung.

7 EINGANGSPARAMETER

7.1 KOSTEN

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

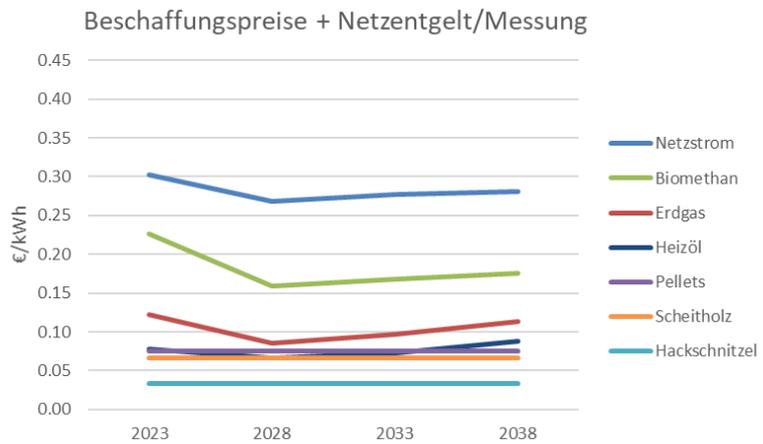


Abbildung 5 Preisentwicklung für eingekaufte Energieträger

Tabelle 4 Kostenannahmen für eingekaufte Energieträger

	Jahr	Kosten [Euro/kWh]	Quelle
Strom	2023	0,302	https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizen-mit-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	
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

Weitere variable Betriebskosten können Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5 Variable Betriebskosten (außer Brennstoffkosten)

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

Es erfolgt keine Gutschrift für Überschüsse an Strom und Wärme.

Die Kosten für energetische Sanierungen der Gebäude bleiben unberücksichtigt. Bei den Investitionen in Energieanlagen sind (noch) keine Änderungen für zukünftige Jahre berücksichtigt. Eine Diskontierung findet nicht statt (analog zu den Umweltwirkungen).

Die Fixkosten für Wartung sowie die Investitionen (o. Mehrwertsteuer) können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 6 Fixkosten und Investitionen (netto) 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	700	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Flachdach	10	kWp	26	1100	Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien, S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Aufdach	10	kWp	27	1141	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, Hackschnitzel	500	kWel	21	880	https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten
Luft-Wasser Wärmepumpe	110	kW HWL	8	461	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx.
Abwasser-Wasser-Wärmepumpe	110	kW HWL	5	263	Wie Sole-Wasser-Wärmepumpe
Abwasserwärmetauscher	k.A.	kW	0	1000	Herstellerangabe (Uhrig-Bau)
Flach-/Röhrenkollektor, Freifläche	k.A.	m ²	3,3	298	https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/07/Foerderleitfaden_Freiflaechen-Solarthermie.pdf
Elektrowärme: Heizstab/Kessel	7	kW	0	304	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.10 Dezentrale_Waermeversorgung_Stromdirektheizungen v1.xlsx.
Hackschnitzel-Kessel	110	kW	17	243	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Biomassekessel_automatisch_beschickt v1.xlsx
Pufferspeicher	500	l	0	2,37	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen v1. 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx

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. Es erfolgt keine Gutschrift für Überschüsse an Strom und Wärme.

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.

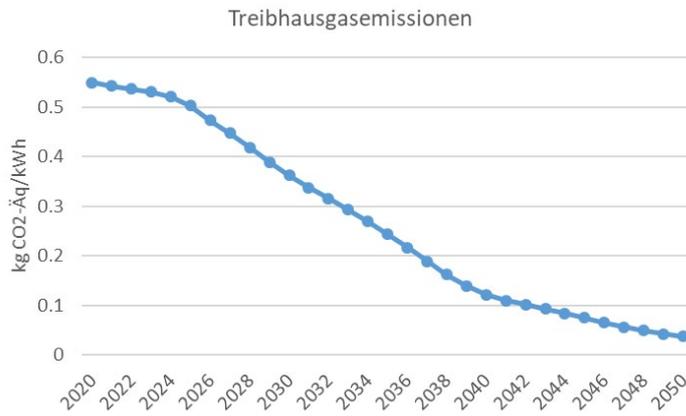


Abbildung 6 Verlauf der Treibhausgasemissionen (Szenario VI (basiert auf Repenning, J. et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Öko-Institut. FhG ISI. Hans-Joachim Ziesing) aus Naegler, T. et al. (2022): Life cycle-based environmental impacts of energy system transformation strategies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

Für PV-Anlagen wird die Sachbilanz anteilig aus mono- und multi-kristallinen Silizium-Solarzellen modelliert.

Die Umweltwirkungen, die für die Herstellung und Entsorgung der Materialien zur energetischen Sanierung entstehen, bleiben unberücksichtigt.

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 7 Lebensdauerannahmen pro Technologie

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 (ORC), Holzhack-schnitzel	15	https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten
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
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, 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
Elektrowärme/Heizstab	30	KEA-BW (2022): Technikkatalog, Tabellen: 3.10 Dezentrale_Waermeversorgung_Stromdirektheizungen v1.xlsx, 7 kW
Abwasserwärmetauscher	50	Annahme

7.4 TECHNISCHE PARAMETER

Tabelle 8 enthält eine Übersicht der berücksichtigten Wirkungsgrade und Leistungszahlen der Technologien. Zur Berechnung der Leistungszahlen für die Wärmepumpen muss eine Eingangstemperatur angenommen werden. Für das Abwasser wurde eine Temperatur von 11°C angenommen.

Tabelle 8 Leistungszahlen und Wirkungsgrade pro Technologie

	COP	Quelle
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Temperaturabhängig (55 °C t_{high})	Berechnet mit oemof.thermal
Abwasser-W.-Wärmepumpe	4,0	Eigene Berechnung (353 K/(55-11)K*0.55)
	%	
BHKW, Holzhackschnitzel, elektrisch	15	https://www.3-n.info/media/4_Downloads/pdf_WssnSrcv_Srvc_Fst-brnnstff_KwkHolzStatusbericht_1409.pdf
BHKW, Holzhackschnitzel, thermisch	75	
Heizstab	100	
Hackschnitzel-Kessel	90	Datenblatt Agroforst zwischen 85,7 % und 92,2 %
Photovoltaik	19,3	Friskhnecht, 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 9 Parameter für die Modellierung der Speicher

	capacity loss	[Quelle]	efficiency inflow	efficiency outflow	[Quelle]	capacity min	[Quelle]	capacity max	[Quelle]	invest_relation_input_capacity	[Quelle]	invest_relation_output_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. 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): Technikkatalog. Tabellen v1. 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx. 500l													
[7] eigene Berechnung													

7.5 WETTERABHÄNGIGE DATEN

Für die Koordinaten latitude = 48.642°, longitude = 9.958° wurden die Wetterdaten für ein typisches meteorologisches Jahr über das Tool PVGIS⁹ ermittelt.

Für dieses typische meteorologische Jahr wurden auf Basis von Daten aus PVGIS Zeitreihen für die Stromerzeugung mit PV-Anlagen erstellt. Dabei wurde kristallines Silizium mit einem Systemverlust von 14 % angenommen.

⁹ PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

Tabelle 10 Annahmen für Photovoltaik-Anlagen

	Neigung [°]	Azimet [°]	Ertrag [kWh/kWp]	Maximum [kW/kWp]
Optimal (Süden, Flachdach, Freifläche)	35	-3	924	0,82
Osten	38	-90	784	0,74
Westen	38	90	761	0,75

Die Zeitreihe für Solarthermie (Ausrichtung: 37° Neigung, -3° Azimet; wie optimale PV) wird über das Tool nPRO ermittelt. Für den Ertrag eines Röhrenkollektors ergeben sich 567 Wh/m², für einen Flachkollektor 384 kWh/m² bei mittlerer Kollektortemperatur von 75°C.

Das Erzeugungsprofil für Windenergie wird mit Hilfe von windpowerlib¹⁰ für eine Anlage vom Typ Siemens SWT-3.2-113 mit einer Leistung von 3,2 MW und einer Nabenhöhe von 113 m erstellt.

Der temperaturabhängige COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe wird mit oemof.thermal¹¹ ermittelt (55°C Vorlauftemperatur, Qualitätsfaktor: 0,4).

8 OPTIMIERUNGSZIEL

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. Aus Kosten und Umweltwirkungen wird ein mehrkriterielles Optimierungsziel 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 Footprints¹². Die entsprechenden Faktoren zeigt die folgende Tabelle bzw. Abbildung.

¹⁰ Python-Bibliothek zur Simulation der Stromerzeugung von Windkraftanlagen

¹¹ jnnr, Caroline Möller, FranziPI, 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

¹² 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 11 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

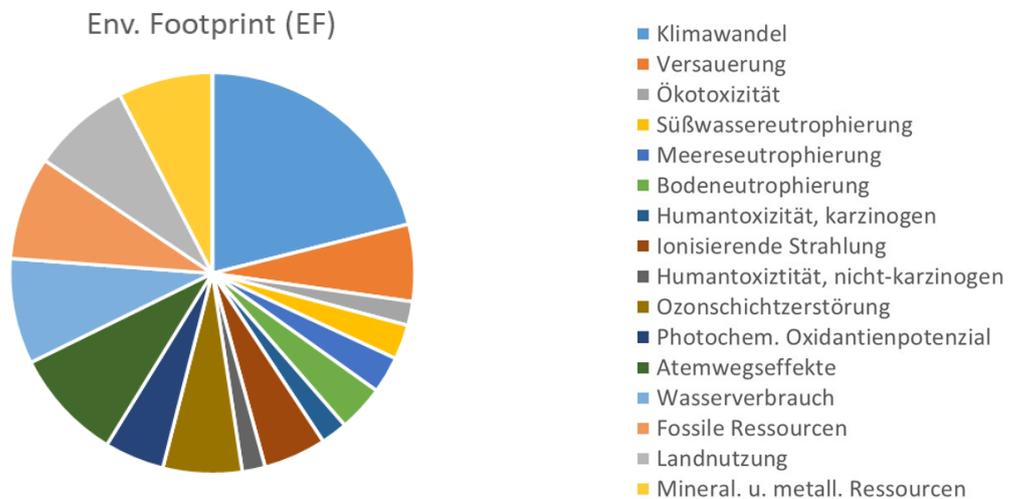


Abbildung 7 Gewichtungen für den Environmental Footprint

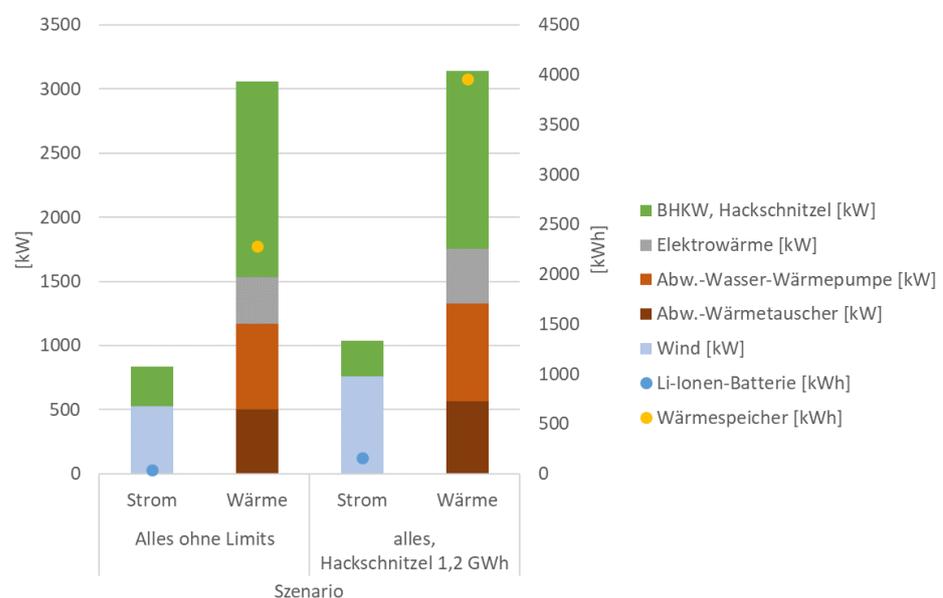
9 ERGEBNISSE

9.1 INSTALLIERTE LEISTUNG

Wenn alle in Abschnitt 5 genannten Technologien zur Verfügung stehen, würde die überwiegende Leistung von einem Hackschnitzel-BHKW zur Verfügung gestellt. Diese würde unterstützt von einer Abwasser-Wasser-Wärmepumpe und Wärmespeicher. Es werden weder Luft-Wasser-Wärmepumpe, noch Solarthermie oder Hackschnitzel-Kessel eingesetzt. In Stromdirektheizungen (Elektrowärme) wird investiert, um den Überschussstrom aus den Windenergieanlagen zu nutzen, die zur Deckung der Haushaltsstromnachfrage installiert werden. Das Optimierungsergebnis sieht keine weitere Installation von PV-Anlagen vor. In geringem Umfang wird in Kapazitäten zur Stromspeicherung investiert. Hier werden Lithium-Ionen-Batterien den Vanadium-Redox-Flow-Batterien vorgezogen.

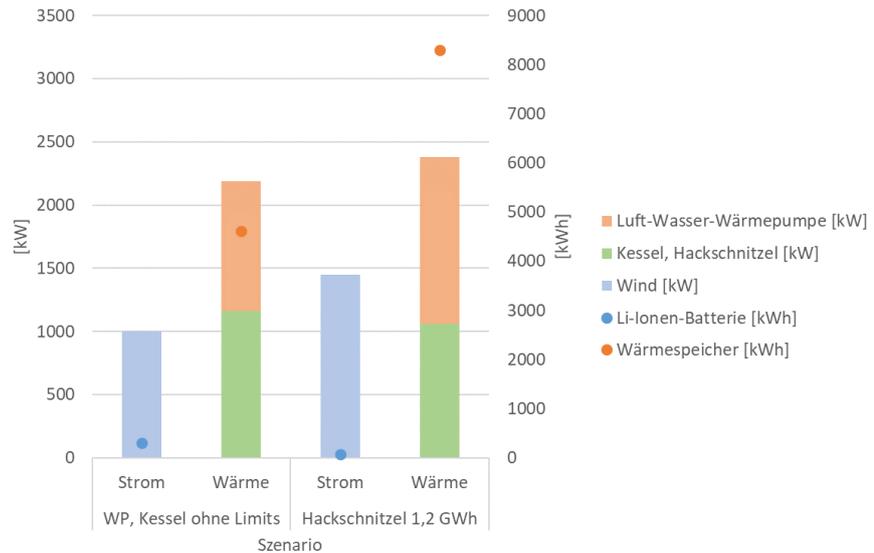
Bei einer begrenzten Hackschnitzel-Verfügbarkeit sinkt die BHKW-Leistung. Gleichzeitig steigen die Wärmepumpenleistung und Speicherkapazitäten (sowohl von Wärmespeicher als auch Batterie). Auch der Ausbau der Windenergieleistung steigt, da mehr Strom zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird.

Abbildung 8
Installierte Leistung
bzw. Kapazität (Speicher)
für die Szenarien
mit allen Technologien



Wird die Wärme nur über Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzelkessel erzeugt, steigt im Vergleich zum unlimitierten Szenario der Windenergieausbau und auch die Speicherkapazitäten – vor allem für Wärme. Letztere steigt weiter, wenn die Hackschnitzel-Verfügbarkeit beschränkt ist. In Bezug auf die Erzeugungstechnologien sinkt bei einer Beschränkung die Leistung des Kessels leicht, während die Wärmepumpenleistung steigt. In Windenergie würde deutlich mehr investiert.

Abbildung 9 *Instal-*
lierte Leistung bzw. Kapazität
(Speicher) für die Szenarien
mit Luft-Wasserwärme-
pumpe und Hackschnitzelkes-
sel

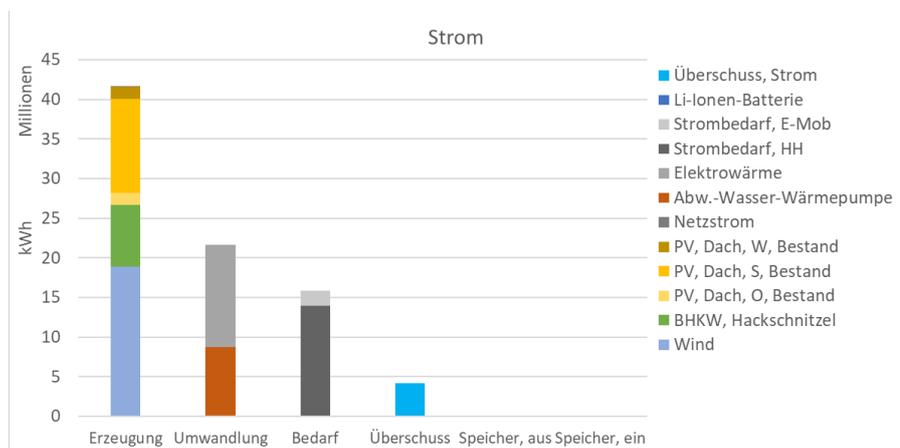


9.2 STROM- UND WÄRMEERZEUGUNG

Die erzeugten Strom- und Wärmemengen werden im Folgenden für das unlimitierte Szenario und das am stärksten limitierte Szenario (nur Luft-Wärmepumpe und Kessel bei 1,2 GWh primärer Hackschnitzelverfügbarkeit) analysiert.

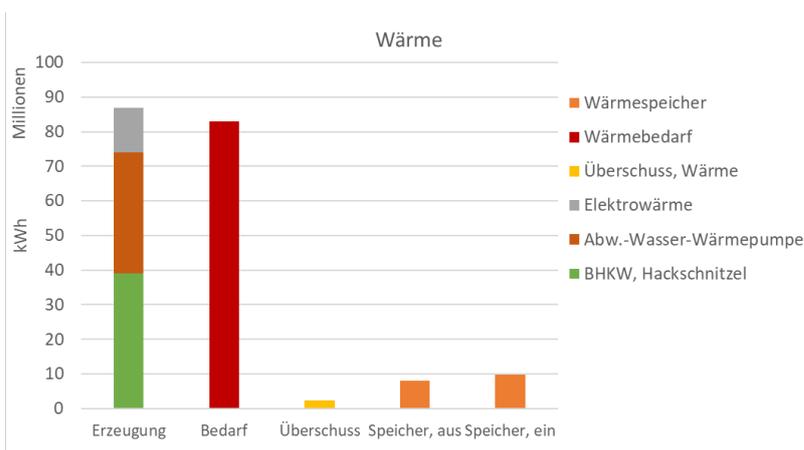
Beim unlimitierten Szenario geht gut die Hälfte des erzeugten Stroms in die Umwandlung in Wärme. Der Stromüberschuss beträgt gut 10 % der erzeugten Strommenge. Die Speichernutzung ist vernachlässigbar gering.

Abbildung 10 *Strombi-*
lanz für das Szenario mit al-
len Optionen (20 Jahre)



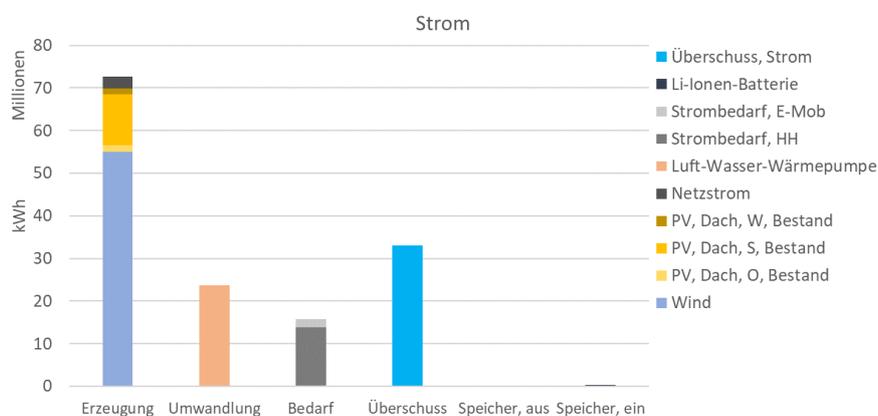
Die Wärme wird zu fast gleichen Teilen von BHKW und Abwasser-Wasserwärmepumpe erzeugt. Einen deutlich kleineren Teil erzeugt die Stromdirektheizung (Elektrowärme). Der Überschuss hat nur einen geringen Anteil an der Wärmeerzeugung. Etwa 11 % der erzeugten Wärme wird gespeichert.

Abbildung 11 Wärmebilanz für das Szenario mit allen Optionen (20 Jahre)



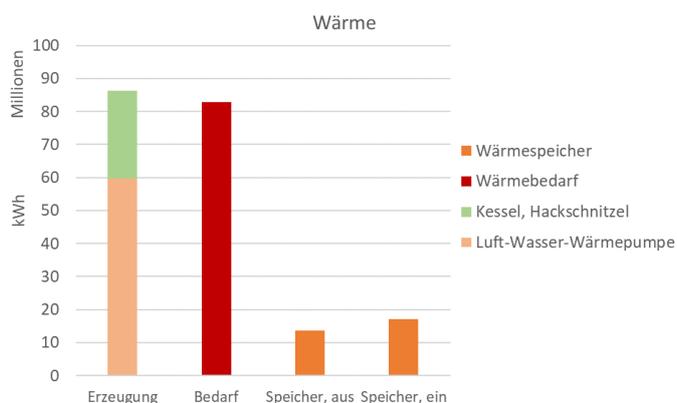
Beim stark limitierten Szenario wird deutlich mehr Strom aus Windenergie erzeugt, wobei der Überschuss ca. doppelt so hoch ist wie der Bedarf.

Abbildung 12 Strombilanz für das Szenario mit Luft-Wärmepumpe, Kessel und begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit (20 Jahre)



Die Wärme wird im stark limitierten Szenario ca. zu zwei Drittel über die Luft-Wasserwärmepumpe und zu einem Drittel über den Kessel erzeugt. Durch die flexible Fahrweise des Kessels werden keine Überschüsse erzeugt. Die Speichernutzung und damit auch die Speicherverluste liegen um gut zwei Drittel über dem unlimitierten Szenario mit Nutzung eines BHKWs.

Abbildung 13 Wärmebilanz für das Szenario mit Luft-Wärmepumpe, Kessel und begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit (20 Jahre)



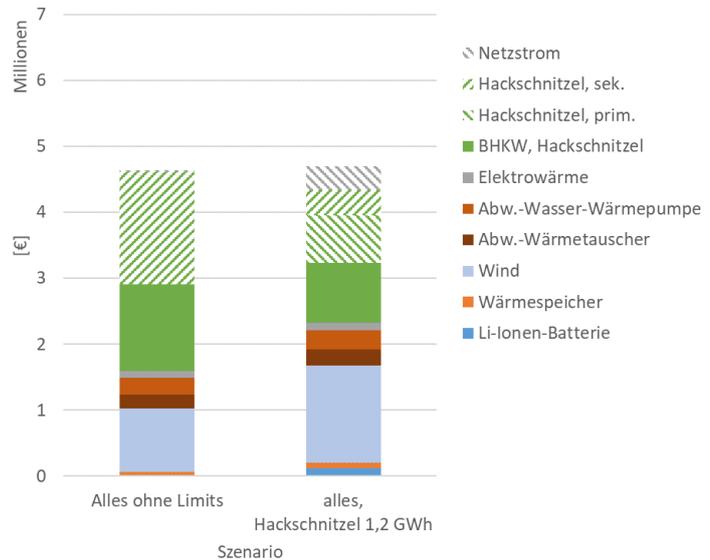
9.3 KOSTEN

Betrachtet werden hier die Gesamtkosten über 20 Jahre, welche ohne Einschränkung der Technologien und Hackschnitzelverfügbarkeit am geringsten ausfallen. Der Hackschnitzeleinkauf ist hierbei mit 37 %

der größte Einzelposten, gefolgt von den Investitionen in das Hackschnitzel-BHKW und die Windenergieanlage. Die Nutzung von Abwasserwärme steht an vierter Position, jedoch mit einem deutlich geringeren Investitionsvolumen. Der Investitionsbedarf für Elektrowärme und Speicher ist vergleichsweise gering. Auch für Strom aus dem Netz wird nur ein geringer Betrag fällig.

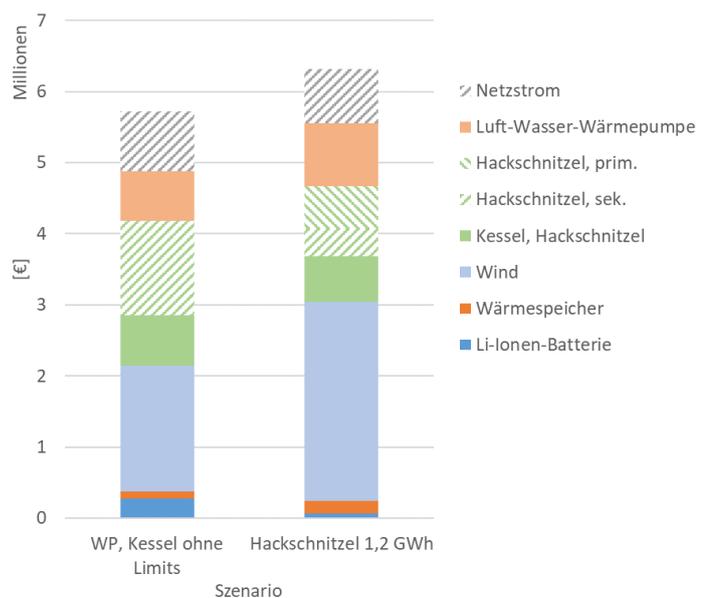
Wird eine beschränkte Hackschnitzel-Verfügbarkeit angenommen, steigen die Gesamtkosten über 20 Jahre nur geringfügig an. Die Aufteilung auf die Technologien bzw. Energieträger ändert sich jedoch. Den größten Anteil hat jetzt die Investition in Windenergie.

Abbildung 14 Investitionen und variable Kosten über 20 Jahre für die Szenarien mit allen Technologien



Die Einschränkung auf Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzel-Kessel verursacht deutliche Mehrkosten. Grund dafür ist der Windenergieausbau und ein höherer Netzstrombezug. Das Hackschnitzellimit wirkt sich weniger negativ auf die Gesamtkosten aus.

Abbildung 15 Investitionen und variable Kosten über 20 Jahre für die Szenarien mit Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzelkessel



9.4 TREIBHAUSPOTENZIAL

Bezüglich des Treibhauspotenzials über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich bei einer Betrachtung von 20 Jahren eine signifikante Erhöhung (~ Faktor 2-3) bei Einschränkung auf Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzel-Kessel. Gründe hierfür sind der Netzstrombezug und Betriebsemissionen aus der Wärmepumpe.

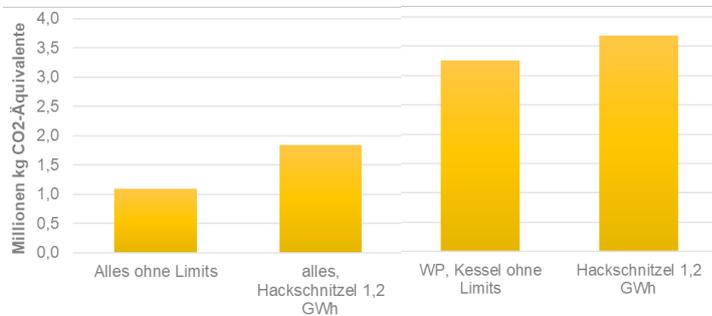


Abbildung 16 Szenarienvergleich in Bezug auf das Treibhauspotenzial über 20 Jahre

10 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 deshalb unberücksichtigt. Auch um die komplizierte Kosten- und Erlössituation des deutschen Strommarktes abzubilden, müsste das Modell

anders aufgebaut werden. So werden z.B. Einspeiseerlöse nicht berücksichtigt, weshalb die Gesamtkosten der Szenarien überschätzt werden.

11 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Analyse lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Hackschnitzel erweisen sich sowohl aus Kosten- als auch aus Umweltsicht als eine vergleichsweise günstige und effiziente Energiequelle. Wenn Hackschnitzel verwendet werden, zeigt sich das Biomasseheizkraftwerk (BHKW) als die bevorzugte Option im Vergleich zum Hackschnitzelkessel, wobei hier technische Restriktionen bei der Betriebsweise des BHKWs unberücksichtigt bleiben.

Die Abwasser-Wasser-Wärmepumpe ist aus Kosten- und Umweltsicht vorteilhafter gegenüber der Luft-Wasser-Wärmepumpe, während Solarthermie im Vergleich zu anderen Technologien unterlegen ist.

Die Nutzung von Wärmepumpen zieht einen Ausbau der Stromkapazitäten nach sich, wobei sich Windenergie als eine bessere Option herausstellt als Photovoltaik. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass bei der Nutzung von Strom für Wärme lediglich die reinen Gestehungskosten berücksichtigt werden, ohne weitere Preisbestandteile wie z.B. Netzentgelt, Steuern und Abgaben. Die Eigenerzeugung von Strom erweist sich als vorteilhafter als der Bezug aus dem Netz. Darüber hinaus zeigt sich, dass Wärmespeicher eine größere Relevanz haben als Stromspeicher.

Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer umfassenden Bewertung verschiedener Energiequellen und -technologien sowie deren Wechselwirkungen im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung.

12 EMPFEHLUNGEN

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

Es sollte geprüft werden, ob statt eines Hackschnitzel-Kessels auch ein Blockheizkraftwerk möglich wäre. Auf jeden Fall stellen Hackschnitzel und Wärmepumpe eine gute Kombination dar, wobei eine begrenzte Verfügbarkeit der Hackschnitzel berücksichtigt werden sollte.

Da die Abwasser-Wasserwärmepumpe der Luft-Wasserwärmepumpe überlegen zu sein scheint, ist deren Einbindung in das Wärmenetz genauer zu prüfen.

Da der Strombedarf für die Wärmeerzeugung in jedem Fall steigt, sollten regenerative Stromerzeugungskapazitäten weiter ausgebaut werden.

Auch der weitere Ausbau der Wärmespeicherung erscheint sinnvoll.