

Institut für Industrial Ecology
der
Hochschule Pforzheim

Weiterentwicklung und Erprobung
des Modells LAEND zur
ganzheitlichen Planung und Optimierung
dezentraler Energieversorgungssysteme
für Quartiere
(InPEQt*)

Abschlussbericht

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem Az: 35603/01

von

Heidi Hottenroth
Prof. Dr. Ingela Tietze
Prof. Dr. Tobias Viere

Pforzheim, Juni 2024

* **I**ntegrierte kosten- und lebenszyklusbasierte **P**lanung dezentraler **E**nergie-
systeme für eine energie- und ressourcenschonende **Q**uartiersentwicklung

INHALTSVERZEICHNIS

I.	Abbildungsverzeichnis	II
II.	Tabellenverzeichnis	III
III.	Abkürzungsverzeichnis	III
V.	Zusammenfassung	IV
1	Einleitung.....	1
2	Vorhabensdurchführung und –ergebnisse	4
2.1	Entwicklung integratives Planungsmodell	5
2.1.1	Spezifikation wesentlicher Anforderungen.....	5
2.1.2	Weiterentwicklung und Anpassung Funktionalitäten.....	7
2.1.3	Annahmen zu Kosten- und Ökobilanzdaten	10
2.1.4	Diskussion.....	15
2.1.5	Bewertung der Ergebnisse	16
2.2	Anwendung des Planungsmodells zur Identifikation der optimalen Ausbau- und Einsatzpfade für drei Quartiere	17
2.2.1	Quartier Konstanz	17
2.2.2	Quartier Wiernsheim	21
2.2.3	Quartier Gerstetten	26
2.2.4	Beobachtungen über alle Fallbeispiele hinweg.....	30
2.2.5	Diskussion.....	31
2.2.6	Bewertung der Ergebnisse	32
2.3	Ableitung klima- und umweltschonender Energieversorgungskonzepte.....	33
2.3.1	Durchführung Stakeholder-Dialoge	33
2.3.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	33
2.3.3	Diskussion.....	35
2.3.4	Bewertung der Ergebnisse	35
2.4	Maßnahmen zur Verbreitung	36
3	Fazit.....	37
4	Literaturverzeichnis.....	39
Anhang	42
A 1	Normierungswerte	44
A 2	Projektbeirat	44
A 3	LCA Daten	45
A 4	Eingangsdaten und Detailergebnisse Quartier Konstanz	48
A 5	Eingangsdaten und Detailergebnisse Quartier Wiernsheim	56
A 6	Eingangsdaten und Detailergebnisse Quartier Gerstetten	64
A 7	Presseartikel Stakeholder-Dialog.....	71

I. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Gewichtung bei der multi-kriteriellen Optimierung.....	5
Abbildung 2	Ideensammlung für Funktionalität und Technologieumfang	6
Abbildung 3	Modellstruktur mit zur Verfügung stehenden Technologien.....	9
Abbildung 4	Preisentwicklung für Energieträger	11
Abbildung 5	Verlauf der Treibhausgasemissionen für Netzstrom nach [35]	13
Abbildung 6	Umweltwirkung pro investierter Einheit	14
Abbildung 7	Umweltwirkung pro variabler Einheit.....	14
Abbildung 8	Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern für das Quartier Konstanz	18
Abbildung 9	Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH40 (PV = Photovoltaik)	19
Abbildung 10	Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für EH40-Standard für Quartier Konstanz.....	20
Abbildung 11	Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern für Quartier Wiernsheim	21
Abbildung 12	Kumulierte installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele über 20 Jahre (Leistungen für Wärmepumpen entsprechen den maximalen Wärmeleistungen)	22
Abbildung 13	Stromerzeugung nach Technologien und nach Fünfjahreszeiträumen je Optimierungsziel (PV, Dach = Bestand).....	23
Abbildung 14	Wärmeerzeugung nach Technologien und nach Fünfjahreszeiträumen je Optimierungsziel.....	24
Abbildung 15	Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für Fallstudie Wiernsheim	25
Abbildung 16	Vergleich ausgewählter Indikatoren bis 2042 für die Optimierungsergebnisse im Vergleich zu einem Business as usual-Szenario	25
Abbildung 17	Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern für Quartier Gerstetten	26
Abbildung 18	Kumulierte installierte Leistung bzw. Kapazität (Speicher) für das Szenario mit allen Technologien über 20 Jahre	27
Abbildung 19	Kumulierte installierte Leistung bzw. Kapazität (Speicher) für das Szenario mit Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzelkessel über 20 Jahre.....	28
Abbildung 20	Relativer Indikatorvergleich für das Szenario mit allen Optionen (höchster Wert je Indikator 100 %)	29
Abbildung 21	Relativer Indikatorvergleich für das beschränkte Szenario (höchster Wert je Indikator 100 %)	29
Abbildung 22	Investitionen und variable Kosten über 20 Jahre bei multi-kriterieller Optimierung von Umweltwirkungen und Kosten.....	30
Abbildung 23	Szenarienvergleich in Bezug auf das Treibhauspotenzial über 20 Jahre bei multi-kriterieller Optimierung von Umweltwirkungen und Kosten.....	30

II. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Bewertung der Vorschläge und Ideen hinsichtlich Bedarf und Umsetzbarkeit...	6
Tabelle 2	Kostenannahmen für eingekaufte Energieträger	11
Tabelle 3	Variable Betriebskosten (außer Brennstoffkosten)	11
Tabelle 4	Fixkosten und Investitionen (netto) pro Technologie.....	11
Tabelle 5	Liste der Maßnahmen zur Verbreitung	36

III. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

COP	Coefficient of performance
EF	Environmental Footprint
kW	Kilowatt
kW(p)	Kilowatt peak
kWh	Kilowattstunden
Lilon	Lithium-Ionen
NT	Niedertemperatur
PV	Photovoltaik
VRF	Vanadium-Redox-Flow
WW	Warmwasser

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Eine der treibenden Größen regionaler und globaler Umweltbelastungen ist die Energieversorgung. Deren Umbau zu erneuerbaren Energiesystemen führt zu einer Verlagerung der Umweltwirkungen, so dass es zu Zielkonflikten zwischen verschiedenen Umweltwirkungskategorien kommen kann. Im Rahmen des Projekts wurde ein Planungsmodell für dezentrale Energiesysteme entwickelt und erprobt, das eine umfassende Umweltwirkungsbewertung und Integration mit technischen und ökonomischen Aspekten ermöglicht. Das Planungsmodell unterstützt die Transformation zu erneuerbaren Energieversorgungssystemen für Quartiere und zeigt Lösungen zum Überwinden von Zielkonflikten zwischen Umweltwirkungen und Kosten sowie zwischen den Umweltwirkungen untereinander auf. Ergebnis des multi-kriteriell optimierenden Modells sind Ausbau- und Einsatzpfade für Energieversorgungstechnologien im Zeitverlauf mit ausgewogenen Kosten und Umweltwirkungen.

Zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit wurde das entwickelte Modell auf drei unterschiedliche Praxisfälle angewandt und dabei sukzessive angepasst und erweitert. In Gerstetten und Wiernsheim wurden jeweils Transformationskonzepte für den Bestand ermittelt, in Konstanz wurde das Energiesystem für ein Neubauquartier optimiert. Je nach Optimierungsziel fallen in allen drei Quartieren die Systemkonfigurationen in Bezug auf den Energiemix und die Höhe der installierten Leistungen sehr unterschiedlich aus. Systemkonfiguration bei Minimierung von Kosten sind deutlich anders als bei Minimierung des Treibhauspotenzials. In Übereinstimmung mit dem Forschungsstand zeigt sich, dass Kostenminimierung und Klimawirkung gegensätzliche Ziele sind. Allerdings zeigen die Modellergebnisse auch die Auswirkungen der Dekarbonisierung auf andere Ziele und weisen auf Lösungsansätze hin. So bietet die Sektorenkopplung Potenzial, Zielkonflikte zu vermeiden. Bei allen drei Fallstudien zeigt sich, dass die multi-kriterielle Optimierung Systemkonfigurationen liefert, die einen Kompromiss zwischen Kosten und Umweltwirkungen darstellen.

Die erarbeiteten Konzepte für die drei Fallstudien Konstanz, Wiernsheim und Gerstetten wurden in den Gemeinden vorgestellt und intensiv mit den Stakeholdern diskutiert. Die Konzepte stehen auch über die Vorhabenslaufzeit hinaus auf der Homepage des Instituts für Industrial Ecology zur Verfügung (<https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec/projekte#c389771>), aktuell werden sie in Konstanz auch auf der Homepage der Stadt zur Verfügung gestellt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der detaillierteren Modellierung der energetischen Gebäudesanierung und der Verbesserung der Abbildung von Strom- und Wärmespeichern sowie der Erhebung konsistenter und technologisch differenzierter Ökobilanzdaten. Zudem könnte die Aktualisierung der Environmental Footprint-Methode das Modell weiter an den Stand der Forschung anpassen. Obwohl das Modell Verbesserungen bei der Nutzerfreundlichkeit erfahren hat, bleibt es ein Expertentool, dessen Aussagekraft durch eine systematische Robustheitsanalyse und die Anwendung der Methode „Modelling to Generate Alternatives“ weiter gesteigert werden könnte.

Folgende Partner haben das Vorhaben durch die Bereitstellung von Informationen und Diskussion der Ansätze sowie Ergebnisse unterstützt:

- Gemeindeverwaltung Gerstetten
- Gemeindeverwaltung Wiernsheim
- Netze BW GmbH
- Netzgesellschaft Ostwürttemberg DonauRies GmbH
- Stadt Konstanz, Amt für Stadtplanung und Umwelt
- Stadtwerke Fellbach GmbH

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Förderthema 5: Energie und ressourcenschonende Quartiersentwicklung und –erneuerung, Aktenzeichen 35603 vom 1. Februar 2021 bis 31. März 2024 gefördert. Der Abschlussbericht ist in der Förderdatenbank der DBU online verfügbar: <https://www.dbu.de/projektdatenbank/35603-01/>

Der Programmcode des Planungsmodells LAEND wird über die Vorhabenslaufzeit hinaus zur Verfügung gestellt:

- GIH-Homepage: <https://jih-bw.de/planungstool-laend/>
- Download Programmcode (inkl. englischer Dokumentation: <https://github.com/inec-mod/LAEND>)
- Deutsche Dokumentation und Schulungsvideo: <https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec/sonstiges/laend>

1 EINLEITUNG

Die Energiewende spielt eine zentrale Rolle bei der Erreichung der Treibhausgasneutralität und stellt eine bedeutende Herausforderung für Kommunen dar. Während die Maßnahmen zur Erreichung der Energiewende im Stromsektor mittlerweile weitgehend definiert sind, sind die Herausforderungen im Wärmesektor deutlich komplexer. Eine strategische Planung, die sowohl den Strom- als auch den Wärmesektor beinhaltet, ist daher essentiell. Dazu kommt die Elektrifizierung des Verkehrs- und des Wärmesektors, die einen Ausbau der Stromkapazitäten erfordert.

Der Umstieg auf erneuerbare Energien ist mit vielerlei Herausforderungen verbunden. Auch umweltseitig darf nicht übersehen werden, dass in Bezug auf Treibhausgase emissionsarme Technologien andere Umweltprobleme verursachen können. Hier besteht einerseits der Umstand, dass Umweltbelastungen von der Nutzungsphase in die Herstellphase verschoben werden: Bei fossilen Energieumwandlungstechnologien wie z.B. Gasthermen entstehen die meisten Umweltbelastungen beim Verbrennen des Erdgases in der Nutzungsphase, während z.B. bei Photovoltaikanlagen die meisten Umweltbelastungen aus der Herstellung der Anlagen resultieren. Andererseits findet durch den Wechsel auf erneuerbare Energien eine Verschiebung innerhalb der Umweltbelastungen statt: Technologien zur Verwendung erneuerbarer Energien vermeiden im Vergleich zu fossilen Brennstoffen Treibhausgasemissionen, jedoch steigt z.B. der Aufwand für Mineralien und Metalle durch Photovoltaik oder der Flächenbedarf für die Gewinnung von Biomasse.

Die Methode der Ökobilanzierung erlaubt eine Umweltbewertung von Energiesystemen über deren gesamten Lebensweg inklusive aller der Nutzung vor- und nachgelagerter Prozesse. Hinsichtlich zukünftiger Energiesysteme haben vorhandene Ökobilanzdaten von erneuerbaren Energietechnologien den Nachteil, dass sie in Bezug auf Parameter wie Volllaststunden oder Wirkungsgrade statisch sind. Standortspezifische Unterschiede, die sich bei erneuerbaren Energietechnologien die Ökobilanz beeinflussen, werden meistens vernachlässigt – ebenso wie der zeitliche Zusammenhang zwischen Angebot und Nachfrage von Energie.

Die Methode der Energiesystemmodellierung zur Planung von Energiesystemen ist in Praxis und Wissenschaft anerkannt und häufig erprobt. Dabei werden standort- und technologiespezifische sowie zeitlich variierende Eingangsdaten berücksichtigt. Die Vielzahl der vorhandenen Optimierungsmodelle in der Energiesystemmodellierung setzt die Kostenminimierung als Zielfunktion ein: Ergebnis der Modelle ist die kostenoptimale Zusammensetzung der Energieumwandlungstechnologien und der kostenoptimale Einsatz dieser zur Befriedigung der vorgegebenen Nachfrage. Beschränkungen in Form von Nebenbedingungen werden zur Einhaltung von Emissionsgrenzen für bspw. CO₂, NO_x, SO_x und CH₄ verwendet. Eine umfassende Berücksichtigung von Umweltwirkungen fehlt bei diesem Ansatz zur Planung zukünftiger Energiesysteme, da einerseits nur wenige ausgewählte Indikatoren Berücksichtigung finden und andererseits meist ausschließlich die Umweltwirkungen der Nutzungsphase erfasst werden.

Um die Schwächen der beiden Methoden Energiesystemmodellierung und Ökobilanzierung zu überwinden, wurden bereits Ansätze entwickelt, um lebenszyklusbasierte Umweltindikatoren in Energiesystemmodelle zu integrieren z.B. von Azapagic et al. [1], Rauner und Budzinski [2] und Vandepaer et al. [3]. Die Abbildung der Energiesysteme in diesen Modellen ist stark aggregiert mit dem Zweck der übergeordneten Politikberatung auf nationaler und internationaler Ebene und berücksichtigt zumeist nur ausgewählte Wirkungsindikatoren. Auf Ebene der Planung von Energiesystemen von Quartieren stehen einige Planungsinstrumente zur Verfügung, die teils auch Umweltindikatoren berücksichtigen:

- Effort [4] ermöglicht die Ermittlung des Energiemixes für Quartiere unter Einbezug von ökologischen und sozialen Indikatoren. Die Nachhaltigkeitsbewertung bildet dabei keine umfassende Umweltbewertung entsprechend der Ökobilanzierung ab. Weiterhin ist eine multi-kriterielle Optimierung unter Berücksichtigung aller Indikatoren nicht möglich, da die Nachhaltigkeitsbewertung größtenteils nachgelagert ist.
- Das Tool Modellstadt25+ [5] berücksichtigt eine begrenzte Anzahl von fünf Wirkungskategorien zur nachgelagerten Bewertung und optimiert entweder nach den Gesamtkosten oder den Treibhausgasemissionen.
- KomMod [6] legt den Schwerpunkt auf die Einsatzplanung und berücksichtigt techno-ökonomische Aspekte. Die Optimierungskriterien sind Gesamtkosten, Energieautarkie und Treibhausgasemissionen.
- Das Tool des Verbundvorhabens Transformation im ländlichen Raum (TRAIL) [7], optimiert nach den Gesamtkosten, Bezugskosten oder CO₂-Emissionen. Das Online-Softwaretool ermittelt auf Basis öffentlich zugänglicher Daten eine individuelle Zusammenstellung von Erzeugungsanlagen zur Deckung des Wärme- und Stromverbrauchs für Kommunen in Thüringen.
- Weitere Tools wie z.B. urbs+rivus [8] und SIMSTADT [9] ermitteln den Energiemix für die Bereitstellung von Strom und Wärme für Quartiere kostenbasiert und setzen die Verringerung von Treibhausgasemissionen als Nebenbedingung fest.

Eine umfassende multi-kriterielle Optimierung unter Einbezug ökologischer, lebenszyklusbasierter Indikatoren auf Quartiersebene ist mit keinem der Modelle möglich. Zielkonflikte können nur bedingt identifiziert werden und der Großteil der Umweltwirkungen wird bei der Auslegung der Energiesysteme vernachlässigt. Studien zur Umweltwirkung von Energiesystemen [10, 11] zeigen jedoch die Relevanz unterschiedlicher Wirkungskategorien in Abhängigkeit der betrachteten Energieversorgungssysteme. Werkzeuge aus dem wissenschaftlichen Umfeld, welche Aspekte der Ökobilanzierung auch für die Optimierung berücksichtigen, konzentrieren sich auf nationale Energiesysteme (DESIRE [1], MOROSA [2]). Die Sektorenkopplung (Strom, Wärme, Mobilität) wird nicht berücksichtigt und der anwendungsorientierte Charakter zur Entscheidungsunterstützung fehlt. Ebenso werden zumeist nur ausgewählte Wirkungsindikatoren berücksichtigt. Es fehlt ein hochaufgelöstes, sektorenübergreifendes Planungsmodell zur multi-kriteriellen Entscheidungsunterstützung unter simultaner Optimierung von lebenszyklusbasierten Kosten und verschiedenen Umweltwirkungen (wie Luft- und Wasserschadstoffe, Landnutzung und Ressourcenverbrauch) für kommunale Entscheidungsträger.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird deshalb ein Planungsmodell entwickelt, das Gemeinden bei der Transformation ihrer Energieversorgung unterstützt. Im Gegensatz zu anderen Planungstools werden nicht nur die Kosten von Energiesystemen, sondern auch lebenszyklusbasierte Treibhausgasemissionen und andere Umweltwirkungen in die Planung einbezogen.

Übergeordnet werden im Projekt zwei zentrale Ziele verfolgt:

1. Entscheidungsunterstützung bei der optimalen Ausgestaltung einer ressourcenschonenden, sektorübergreifenden Energieversorgung für Quartiere unter Berücksichtigung von Kosten und Umweltwirkungen, indem eine Weiterentwicklung des Planungsmodells LAEND [12] erfolgt, und
2. die Erarbeitung von konkreten Konzepten unter Berücksichtigung der Sektoren Elektrizität, Wärme und Verkehr in Form von Elektromobilität und multi-kriterielle Entscheidungsunterstützung bei der Transformation zu treibhausgasneutralen und umweltschonenden Energieversorgungssystemen auf Quartiersebene zur Sicherstellung der Funktionalität des Planungsmodells.

Aus dieser Zielstellung ergeben sich verschiedene Aufgaben. Die Version des Modells vor der Weiterentwicklung umfasst ausschließlich die Elektrizitätsversorgung fiktiver Quartiere ohne praxisrelevante Rahmenbedingungen und ist auf wissenschaftliche Einsätze zur generellen Diskussion des methodischen Ansatzes beschränkt. Der erste Arbeitsschritt umfasst die Weiterentwicklung der Grundfunktionalitäten des Planungstools LAEND. Dazu werden zuerst die Anforderungen definiert. Entsprechend der erweiterten Grundfunktionalitäten muss die Datenbasis in Bezug auf Kosten- und Ökobilanzdaten erweitert werden. Zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit wird das Planungsmodell auf drei Fallbeispiele angewendet, um auf Basis der spezifischen Anforderungen die Funktionalitäten weiter anpassen zu können. Aus den Ergebnissen der Modellierung werden Konzepte mit konkreten Handlungsempfehlungen hin zu einer klima- und umweltschonenden Energieversorgung abgeleitet und im Rahmen von Stakeholder-Dialogen diskutiert.

2 VORHABENSDURCHFÜHRUNG UND –ERGEBNISSE

Kern des Projektes ist die Erweiterung der Methodik für die Energiesystemplanung hin zur umfassenden Berücksichtigung der Umweltwirkungen. Das weiterentwickelte Planungsmodell setzt auf dem Modell LAEND auf, das durch Kopplung des open-source energy system modelling framework oemof [13] mit der open-source Ökobilanzsoftware openLCA [14] die Methoden der Energiesystemmodellierung und Ökobilanzierung vereint. Mit dem Schwerpunkt auf dezentralen Stromerzeugungstechnologien berücksichtigt LAEND die Kosten und Umweltwirkungen des gesamten Lebenswegs in der Zielfunktion. So werden multi-kriterielle Entscheidungen unterstützt, indem das Modell das optimale Energieversorgungssystem in Bezug auf Ausbau und Einsatz verschiedener Energietechnologien identifiziert. Die Umweltbewertung erfolgt auf Basis des Indikatorensatzes, wie er für den Environmental Footprint der Europäischen Kommission [15] entwickelt wurde. Folgende Wirkungsindikatoren sind im EU Environmental Footprint enthalten:

- Klimawandel/Treibhauspotenzial
- Süßwasser- u. Bodenversauerung
- Süßwasserökotoxizität
- Süßwassereutrophierung
- Meereseutrophierung
- Bodeneutrophierung
- Humantoxizität, karzinogen
- Ionisierende Strahlung
- Humantoxizität, nicht-karzinogen
- Ozonschichtzerstörung
- Photochemisches Oxidantienpotenzial
- Atemwegseffekte
- Wasserverbrauch
- Fossile Ressourcen
- Landnutzung
- Mineralische u. metallische Ressourcen

Für diesen Indikatorensatz liegen Normierungs- und Gewichtungsfaktoren [16] vor, so dass eine Aggregation auf einen Einzelwert (gewichtete Summe) möglich ist. Das Energiesystemmodell kann damit sowohl auf einzelne Umweltindikatoren hin als auch über alle Umweltwirkungen hinweg aggregiert optimiert werden. Darüber hinaus wird ein multi-kriterielles Optimierungsziel aus EU Environmental Footprint und Kosten gebildet, wobei eine Gewichtung von 50:50 (Grundeinstellung, die individuell angepasst werden kann) verwendet wird. Die Gewichtung der Kosten und Umweltindikatoren innerhalb der gewichteten Summe zeigt die folgende Abbildung¹. Die Gewichtung der Zielkriterien untereinander ist im Modell flexibel und kann entsprechend der Nutzerpräferenzen angepasst werden.

¹ Zur Normierung siehe Anhang A 1

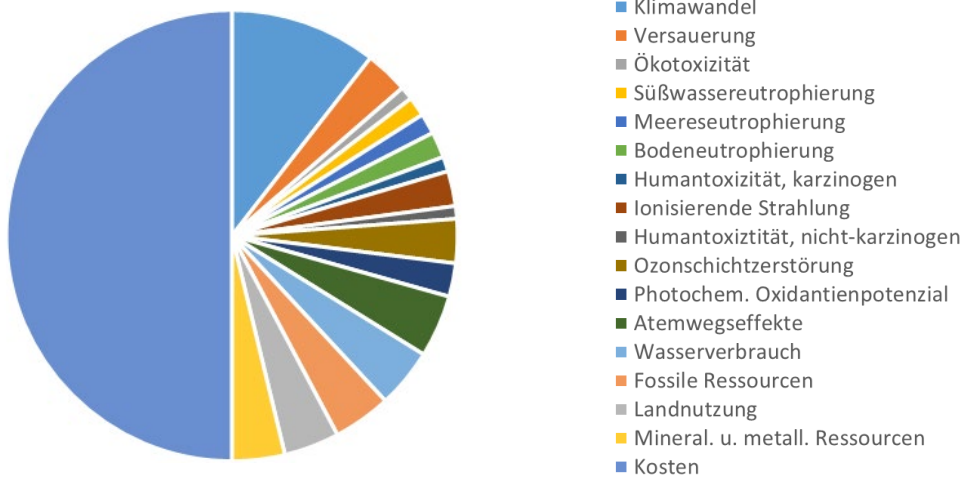


Abbildung 1 Gewichtung bei der multi-kriteriellen Optimierung

Sowohl die Ausbauplanung, (d.h. wann soll welche Leistung welcher Technologie zugebaut werden) als auch die Einsatzplanung (d.h. welche Technologie wird zu welchem Zeitpunkt in welchem Umfang eingesetzt) sind Ergebnis der Optimierung. Hierbei steht nicht die Einzelinvestition im Vordergrund, sondern vielmehr die Identifikation von geeigneten Technologiemixen in den Quartieren. Die Technologien werden hierfür im Modell mit Kosten und Umweltwirkungen parametrisiert.

2.1 ENTWICKLUNG INTEGRATIVES PLANUNGSMODELL

2.1.1 Spezifikation wesentlicher Anforderungen

Zur Unterstützung der Akzeptanz des zu entwickelnden Planungsmodells wurden zu Beginn des Projekts gemeinsam mit dem Projektbeirat aus Energieberatern und Energieplanern² als potenziellen Anwender:innen die zentralen inhaltlichen Anforderungen hinsichtlich Funktionalität und Technologieumfang erarbeitet. Darüber hinaus wurden die inhaltlichen Anforderungen an das Planungsmodell bei den weiteren beteiligten Kommunen und Unternehmen erhoben und der Anforderungskatalog ergänzt.

² Zur Zusammensetzung des Beirates siehe Anhang A 2

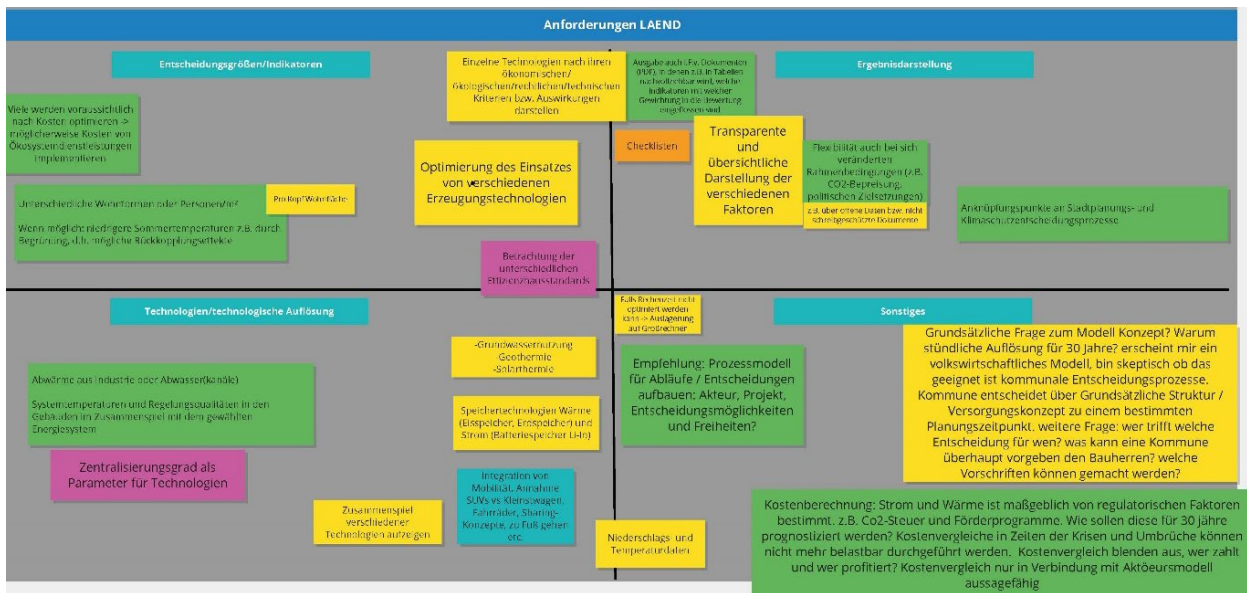


Abbildung 2 Ideensammlung für Funktionalität und Technologieumfang

Im Folgenden wird die prinzipielle Umsetzbarkeit der Anforderungen bewertet.

Tabelle 1 Bewertung der Vorschläge und Ideen hinsichtlich Bedarf und Umsetzbarkeit

	Vorschlag	Kommentar
Entscheidungsgrößen/Indikatoren	Viele werden voraussichtlich nach Kosten optimieren -> möglicherweise Kosten von Ökosystemdienstleistungen implementieren	Ökosystemdienstleistungen zu monetarisieren wäre ein alternativer Ansatz zur multi-kriteriellen Bewertung durch die gewichtete Summe, der für dieses Projekt gewählt wurde.
	Leitindikatoren denkbar, z.B.	
	Sensitivitätsanalysen zum Ausschluss von Umweltwirkungen	wird berücksichtigt
	Monetarisierung	s.o.
	Gewichte für Zielfunktion vorschlagen, Benutzer sollte die Gewichte anpassen können	wird berücksichtigt
	Unterschiedliche Wohnformen oder Personen/m ² ; Pro-Kopf-Wohnfläche	Berücksichtigung möglich, wenn in Lastkurven abbildbar
Technologien/technologische Auflösung	Optimierung des Einsatzes von verschiedenen Erzeugungstechnologien	wird berücksichtigt
	Abwärme aus Industrie oder Abwasser(-kanälen)	wird berücksichtigt
	Grundwassernutzung	wird berücksichtigt
	Geothermie	wird berücksichtigt
	Speichertechnologien Wärme (Eisspeicher, Erdspeicher) und Strom (Batteriespeicher Li-Io)	wird berücksichtigt
	Integration von Mobilität, Annahme SUVs vs Kleinstwagen, Fahrräder, Sharing-Konzepte, zu Fuß gehen etc.	Eingeschränkt möglich (würde eine Erweiterung der Systemgrenze in Bezug auf die Umweltauswirkungen nach sich ziehen)
	Zusammenspiel verschiedener Technologien aufzeigen	wird berücksichtigt
	niedrigere Sommertemperaturen z.B. durch Begrünung, d.h. mögliche Rückkopplungseffekte	wird berücksichtigt
	Systemtemperaturen und Regelungsqualitäten in den Gebäuden im Zusammenspiel mit dem gewählten Energiesystem	Nicht möglich, da Auflösung zu gering
Zentralisierungsgrad als Parameter für Technologien	eingeschränkt möglich ¹	

Tabelle 2 (Fortsetzung) Bewertung der Vorschläge und Ideen hinsichtlich Bedarf und Umsetzbarkeit

	Vorschlag	Kommentar
Ergebnisdarstellung	Einzelne Technologien nach ihren ökonomischen/ökologischen/rechtlichen/technischen Kriterien bzw. Auswirkungen darstellen	Rechtliche Kriterien sind nicht vorgesehen
	Checklisten	Könnten auf Basis der Ergebnisse erstellt werden
	Ausgabe auch i.F.v. Dokumenten (PDF), in denen z.B. in Tabellen nachvollziehbar wird, welche Indikatoren mit welcher Gewichtung in die Bewertung eingeflossen sind	wird berücksichtigt
	Transparente und übersichtliche Darstellung der verschiedenen Faktoren	wird berücksichtigt
	Auf geeignete Visualisierung der Ergebnisse achten	wird berücksichtigt
	Vom Übergeordneten (zentrale Botschaften) ins Detail	wird berücksichtigt
	Flexibilität auch bei sich veränderten Rahmenbedingungen (z.B. CO ₂ -Bepreisung, politischen Zielsetzungen)	wird berücksichtigt
	Ergebnisse z.B. über offene Daten bzw. nicht schreibgeschützte Dokumente	wird berücksichtigt
	Anknüpfungspunkte an Stadtplanungs- und Klimaschutzentscheidungsprozesse	wird berücksichtigt
Sonstiges	Betrachtung der unterschiedlichen Effizienzstandards	wird berücksichtigt
	Rechenzeiten wichtig, nicht zu lange	Wird berücksichtigt
	Empfehlung: Prozessmodell für Abläufe / Entscheidungen aufbauen: Akteur, Projekt, Entscheidungsmöglichkeiten und Freiheiten?	Außerhalb des Projektziels
	Eingangsdaten Strom- und Wärmenachfrage:	
	Änderung der Nachfrage im Zeitverlauf (z.B. veränderte Wohnfläche pro Kopf)	Bezugsgröße ist Energiebedarf pro Jahr, Berücksichtigung möglich
	Informationen aus Wärmeplanung der Kommunen	wird berücksichtigt
	Schnittstellen zu anderen Tools/Modellen	Außerhalb des Projektziels
	Niederschlags- und Temperaturdaten	Temperaturdaten werden berücksichtigt; Niederschlag nicht relevant
	Anwender nicht überfordern => Anwender führen	Wird berücksichtigt
Eingaben erzwingen, um plausible Ergebnisse sicherzustellen	wird berücksichtigt	
	¹ Kenngrößen wie Anzahl und geografische Verteilung sowie Eigentümerstruktur können aufgrund der Auflösung des Modells nicht erhoben werden. Diversität der Erzeugung könnte herangezogen werden.	

2.1.2 Weiterentwicklung und Anpassung Funktionalitäten

Um den gestellten Anforderungen der sektorenübergreifenden Flexibilisierung aus der verstärkten Nutzung dezentraler Technologien gerecht zu werden, wurde das den Stromsektor abbildende Modell LAEND um weitere Sektoren erweitert. Ziel war die Weiterentwicklung des Modells, um die Identifikation und Ausschöpfung von Synergien zwischen den Sektoren Elektrizität, Wärme und Transport zu erlauben. Dazu mussten sektorenübergreifende Technologien wie beispielsweise Elektromobilität, Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke adäquat abgebildet werden.

An dieser Stelle werden die Arbeitsschritte „Weiterentwicklung Grundfunktionalitäten“ und „Anpassung und Verfeinerung integratives Planungsmodell“ zusammengefasst. Der erstgenannte

Arbeitsschritt wurde durch die Masterthesis von Dorothee Birnkammer unterstützt. Übergeordneten Entwicklungen betreffen die Umstellung von perfekter Voraussicht auf myopische Optimierung, die Integration von Änderungen auf Jahresbasis, die Ermöglichung von Brownfield-Ansätzen³, die Berücksichtigung des Typischen Meteorologischen Jahrs (TMY) sowie die Integration des Wärmesektors und der Elektromobilität.

Das auf der Programmiersprache Python basierende Planungsmodell LAEND wurde auf die oemof-Version 0.4.1 aktualisiert und der Programmcode umstrukturiert, um die o.g. Weiterentwicklungen integrieren zu können. LAEND ist nun in vier Python-Hauptdateien unterteilt:

- `main.py`: Hauptdatei, die zum Start LAEND ausgeführt werden muss
- `laend_module.py`: Hier werden die zwei wichtigsten Funktionen ausgelöst:
 - `Main()`: Diese Funktion führt alle Vorbereitungen durch, die unabhängig vom Optimierungsziel sind.
 - `optimizeForObjective()`: Diese Funktion erhält ein Optimierungsziel und führt die myopische Optimierung durch
- `utils.py`: Dokument, das alle Berechnungen/Funktionen enthält
- `config.py`: Diese Datei enthält Einstellungen zu Zeit, Ziel, Ort, Profilerstellung usw.

Zur Erhöhung des Anwendungsbezugs und zur Reduzierung der Rechenzeit wurde das Modell von Perfect Foresight auf myopische Optimierung umgestellt. Die myopische Optimierung umfasst drei Schritte: (1) Abbildung des bestehenden Energiesystems, (2) Optimierung für ein repräsentatives Stützjahr, welches für eine Periode von aufeinanderfolgenden Jahren steht und (3) Übertragung der Ergebnisse auf das nächste Stützjahr, das für die nächste Periode von Jahren steht. Eine Periode dauert z.B. fünf Jahre, von denen immer das erste Jahr optimiert wird. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis der gesamte Modellierungszeitraum (z.B. 20 Jahre) optimiert worden ist.

Die Integration von Änderungen auf Jahresbasis ermöglicht die Berücksichtigung von:

- Steigendem Strombedarf (z.B. durch Zuwachs an Ladestationen)
- Sinkendem Wärmebedarf (z.B. aufgrund von Effizienzmaßnahmen)
- Verändertem Netzstrommix
- Steigenden oder sinkenden Kosten für Energieträger oder Anlagen
- Außerbetriebnahme von Bestandsanlagen
- Markteinführung neuer Technologien

Mit dem neu implementierten Brownfield-Ansatz können bestehende Anlagen einbezogen werden, um die Transformation von Energiesystemen zu optimieren. Abwärmequellen aus der Industrie können mit diesem Ansatz als Bestand in Form von Erneuerbaren Energien modelliert werden.

Die Weiterentwicklung umfasst auch die konsistente Integration von Wetterdaten, indem mit typischen meteorologischen Jahren (TMY) gearbeitet wird. Wenn das TMY auf einen neuen Standort aktualisiert werden soll, erfolgt dies über PVGIS (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.1). Mit einem TMY können für den gewählten Standort verschiedene feste Zeitreihen erstellt werden (z.B. für Windenergie, Solarthermie). Der TMY dient als Filter für PV-Daten aus dem PVGIS, da diese noch nicht für das TMY vorliegen sondern für einen 10-Jahres-Zeitraum.

Um neben dem Stromsektor auch den Wärmesektor optimieren zu können, wurde die Generation von Wärmelastkurven aus jährlichen Bedarfen mit Hilfe des Tools `demandlib` im Modell integriert. Bei Bedarf können Heizwärme- und Warmwasserbedarf getrennt werden. Darüber

³ Gegenteil von Greenfield-Ansatz, bei dem Bestandsanlagen unberücksichtigt bleiben.

hinaus können temperaturabhängige COPS⁴ für Luft-Wasser-Wärmepumpen generiert werden. Neben Luft-Wasser-Wärmepumpen wurden für den Wärmesektor weiterhin Sole-Wasser- (inkl. Erdwärmesonde), Abwasser-Wasser-Wärmepumpen (inkl. Abwasserwärmetauscher), Solarthermie (Röhren-/Flachkollektor als Aufdach und Freifläche), verschiedene Biomassekessel und Wärmespeicher ins Modell integriert. Die folgende Abbildung zeigt die Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Technologien.

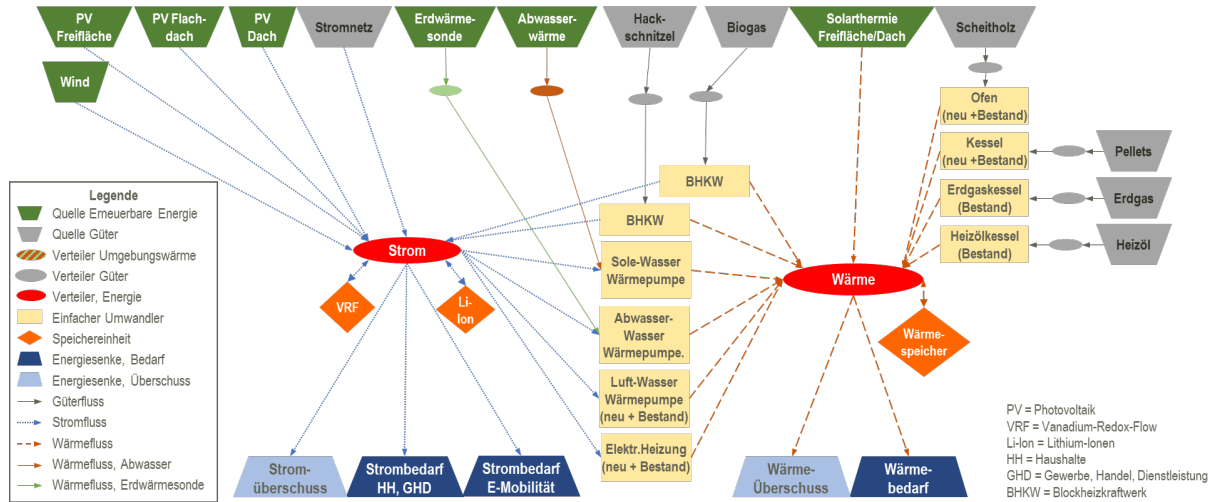


Abbildung 3 Modellstruktur mit zur Verfügung stehenden Technologien

Der Mobilitätssektor kann durch Berücksichtigung entsprechender Nachfrage über Lastkurven integriert werden. Durch Variation dieser Lastkurven können auch Auswirkungen verschiedener Mobilitätskonzepte berücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung einer Obergrenze für die zur Verfügung stehende Fläche (z.B. für Solarthermie und Photovoltaik) wurde neu im Modell implementiert.

Zusätzlich wurde die Abbildung von Technologien verbessert und erweitert: Im Stromsektor wurde die Modellierung von Windenergieanlagen verbessert, indem das Erzeugungsprofil auf Basis des spezifischen Leistungsprofils (Leistung/Windgeschwindigkeit) erstellt wird. Durch die Möglichkeit, eine Obergrenze für neu installierte Leistungen zu setzen, die entweder als Summe für den gesamten Optimierungszeitraum oder für jedes einzelne Stützjahr gelten, kann im zweiten Fall ein Hochlauf von neuen Technologien simuliert werden.

Das Setzen eines Limits für Energieträger (z.B. Holz) ermöglicht es, deren begrenzte Verfügbarkeit zu berücksichtigen.

Um die energetische Gebäudesanierung ins Modell zu integrieren, kann diese näherungsweise wie eine erneuerbare Energiequelle mit einem fixen Fluss modelliert werden. Diese Quelle speist in den Wärme-Verteiler ein.

Um das Energiesystemmodell für einen bestimmten Standort zu konfigurieren, werden die Parameter der zur Verfügung stehenden Technologien und Energieträger nun in einer xlsx-Datei vorgenommen, womit eine nutzerfreundliche Modelldefinition implementiert wurde.

⁴ COP = Coefficient of Performance

Darüber hinaus wurde eine Modellvariante entwickelt, in der politische Emissionsminderungsziele mit Emissionsbeschränkungen, einem anpassbaren Dekarbonisierungs-Vorausschauhorizont und modellspezifischer Treibhausgasneutralität gesetzt werden können.

Ein direkt im Modell implementierter Visualisierungsansatz wurde für einen Zwischenstand des Modells programmiert. Für die Endversion des Tools wurde jedoch ein Visualisierungsansatz mit Hilfe eines Excel-Datenmodells gewählt, da dieser mehr Flexibilität bei der Visualisierung bietet. Für einen ersten Überblick über die Ergebnisse wurde eine tabellarische Ausgabe gewählt, wobei eine Tabelle mit den installierten Leistungen pro Jahr direkt nach Beendigung der Optimierung angezeigt wird.

Im September 2022 fand eine Modelldemonstration statt, bei der die Weiterentwicklungen des Planungsmodells vorgestellt wurden und die teilnehmenden Projektpartner die Möglichkeit hatten, das Modell selber zu testen. Der Programmcode wird seitdem über das Online-Repository github zum Download und freien Nutzung zur Verfügung gestellt (<https://github.com/inec-mod/LAEND>). Dort ist ebenfalls eine englischsprachige Dokumentation verfügbar. Eine deutsche Dokumentation sowie ein Tutorial sind auf der Webseite des INEC (<https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec/sonstiges/laend>) und des GIH (<https://gih-bw.de/planungs-tool-laend/>) verfügbar.

2.1.3 Annahmen zu Kosten- und Ökobilanzdaten

Um sowohl Kosten als auch Umweltwirkungen in die Zielfunktion integrieren zu können, müssen konsistente Daten für beide Kategorien zur Verfügung stehen. Modellseitig werden die Kosten und/oder Umweltwirkungen den variablen Flüssen (z.B. bezogene Energieträger) und den Investitionen zugeschrieben.

Kosten

Bei den Kosten ist nach variablen, fixen Kosten und nach Kosten für Investitionen zu unterscheiden. Bei den variablen Kosten für bezogene Energieträger muss Konsistenz mit den Modellannahmen hergestellt werden. Da bei der Eigenerzeugung modellseitig reine Gesteungskosten herangezogen werden, muss dieser Ansatz auch für den bezogenen Netzstrom gelten. Deshalb werden nur die Kostenbestandteile Beschaffung und Netzentgelt/Messung mit zeitlicher Dynamik berücksichtigt (Abbildung 4).

Um die anderen Energieträger nicht zu benachteiligen, werden für Erdgas und Biomethan auch diese Kostenbestandteile plus CO₂-Preis bei Erdgas angesetzt, bei Heizöl wird nur die Beschaffung plus CO₂-Preis betrachtet. Für Brennstoffe auf Basis von Holz wurden konstante Nettopreise angenommen (Tabelle 3).

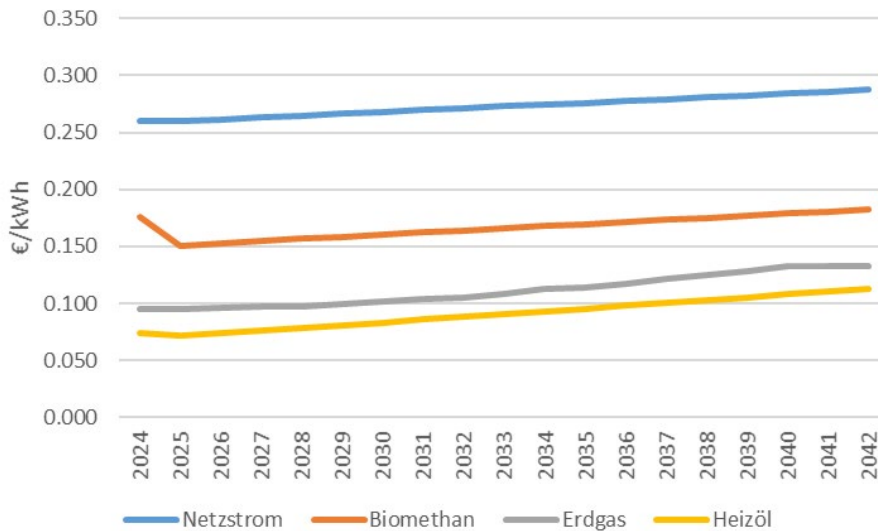


Abbildung 4 Preisentwicklung für Energieträger

Tabelle 3 Kostenannahmen für eingekaufte Energieträger

	Kosten [Euro/kWh]	Kostenbestandteile	Quelle
Strom	s. Abbildung 4	Beschaffung, Netzentgelte/Messung	[17, 18]
Erdgas	s. Abbildung 4	Beschaffung, Netzentgelt, CO ₂ -Preis	[19, 20]
Biomethan	s. Abbildung 4	Beschaffung, Netzentgelt	[17, 20]
Heizöl	s. Abbildung 4	Beschaffung, CO ₂ -Preis	[17, 21]
Pellets	0,076	Beschaffung	[17]
Hackschnitzel	0,034	Beschaffung, Lieferung	[22] 2022, D Süden, Wassergehalt 20%
Scheitholz	0,066	Beschaffung, Lieferung	[23]

Weitere variable Betriebskosten können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4 Variable Betriebskosten (außer Brennstoffkosten)

Technologie	€/kWh	Quelle
Windenergieanlagen	0,009	[24] S. 6, zweite Dekade
BHKW, Hackschnitzel	0,02	[25]

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

Tabelle 5 Fixkosten und Investitionen (netto) pro Technologie

Technologie	Größenklasse	Einheit	Wartung [€/Einheit]	Invest [€/Einheit]	Quelle
Windenergieanlagen	k.A.	kW	43	800	[24, 26] S. 11, MW niedrig/hoch
PV, Freifläche	k.A.	kWp	17	700	[26], S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Flachdach	10	kWp	26	1100	[26] S. 11, MW niedrig/hoch (monokristallin)
PV, Aufdach	10	kWp	27	1141	[27] 3.11 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-PV v1.xlsx, 10 kW
Batterie. Li-Ionen	k.A.	kWh	25	714	[26] S. 28, niedrig
Batterie. Vd-Re-dox-Flow	k.A.	kWh	25	857	Annahme (20 % höher als Li-Ionen-Batterie)

Technologie	Größenklasse	Einheit	Wartung [€/Einheit]	Invest [€/Einheit]	Quelle
BHKW, Hackschnitzel	500	kWel	21	880	[25]
Luft-Wasser Wärmepumpe	110	kW HWL	8	461	[27] 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx
Luft-Wasser Wärmepumpe	50	kW HWL	8	548	[27] 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx
Luft-Wasser Wärmepumpe	8	kW HWL	18	1177	[27] 3.7.1 Dezentrale_Waermeversorgung_Luft_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx.
Sole-Wasser-Wärmepumpe	9	kW HWL	18	1201	[27] 3.7.3 Dezentrale_Waermeversorgung_Sole_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx.
Sole-Wasser-Wärmepumpe	50	kW HWL	7	478	[27] 3.7.3 Dezentrale_Waermeversorgung_Sole_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx, 41-50 kW (50)
Erdwärmesonde	Bis 100	m	0	100	[28] 50-100 €/m
Abwasser-Wasser-Wärmepumpe	110	kW HWL	5	263	Stellvertretend [27] 3.7.3 Dezentrale_Waermeversorgung_Sole_Wasser_Waermepumpen v1.xlsx
Abwasserwärmtauscher	k.A.	kW	0	1000	[29] 500-1200€/kW
Flachkollektor, Aufdach	k.A.	m ²	1,5	579	[27] 3.9 Dezentrale_Waermeversorgung_Dach-Solarthermie v1.xlsx, 140 kW
Flach-/Röhrenkollektor, Freifläche	k.A.	m ²	3,3	298	[30]
Elektrowärme: Heizstab/Kessel	7	kW	0	304	[27] 3.10 Dezentrale_Waermeversorgung_Stromdirektheizungen v1.xlsx.
Erdgas-/Biomethan-Kessel	80	kW	3	107	[27] 3.1 DEzentrale_Waermeversorgung_Gasbrennwertkessel v1.xlsx, 61-80 kW
Hackschnitzel-Kessel	110	kW	17	243	[27] 3.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Biomassekessel_automatisch_beschickt v1.xlsx
Pellet-Kessel	23	kW	27	453	[27] 3.4 Dezentrale_Waermeversorgung_Biomassekessel_automatisch_beschickt v1.xlsx
Scheitholz-Ofen	30	kW	9	200	[27] 3.6 Dezentrale_Waermeversorgung_Holzheizungen v1.xlsx, ohne Wasserspeicher, 30 kW
Pufferspeicher	500	l	0	2,37	[27] 5.1 Speichertechnologien_puffer_Tagesspeicher v1.xlsx
HWL: Heizwärmeleistung					

Die Gesamtkostenbetrachtung wird auf Systemebene, nicht auf Akteursebene vorgenommen. D.h. die Kosten sind reine Gestehungskosten ohne Vergütungen, Subventionen, Steuern, Abgaben, Umlagen etc, da hierfür die individuellen Rahmenbedingungen einzelner Akteure ausschlaggebend sind. Um eine konsistente Betrachtung von Kosten und Umweltwirkungen zu gewährleisten, erfolgt keine Diskontierung von zukünftigen Kosten unter der Annahme, dass auch Umweltwirkungen zu jeder Zeit gleich bewertet werden.

Im Einklang mit den Vorgaben zur ökologischen Bewertung erfolgt auch keine monetäre Gutschrift für Überschüsse an Strom und Wärme.

Ökobilanzdaten

Um die Umweltwirkungen zu bestimmen, werden sog. Sachbilanzen benötigt. Mit diesen Sachbilanzen wird die Herstellung (und ggf. Entsorgung) von Anlagen und Energieträgern sowie der Betrieb von Anlagen modelliert, so dass alle Stoffströme bis zur Entnahme aus der Erdkruste und alle Emissionen in die Umweltmedien über den gesamten Lebensweg aufsummiert werden können. Mit der Sachbilanz auf Basis der (kostenpflichtigen) Ökobilanzdatenbank ecoinvent v3.7 [31] werden mit der Software openLCA die Wirkungsindikatoren des Environmental Footprint (vgl. Seite 4) berechnet.

Um LAEND auch ohne gültige ecoinvent-Lizenz nutzen zu können, sind lizenzfreie Ökobilanzdatensätze notwendig⁵. Aus diesem Grund wurden neue Ökobilanzdatensätze generiert bzw. ecoinvent-Datensätze so adaptiert, dass sie ohne Lizenz nutzbar sind. So liegen nun für die meisten auf Quartiersebene gängigen Technologien frei verfügbare Datensätze vor:

- Auf Basis von Schreiber et al. [32] wurden drei Windenergieanlagentypen modelliert: zwei getriebelose (mit und ohne Permanentmagnet) und eine Anlage mit Getriebe mit Leistungen zwischen 3 und 3,3 MW. Um Windenergie auf Quartiersebene noch besser berücksichtigen zu können, wurde desweiteren eine Kleinwindenergieanlage mit 6 kW Leistung modelliert (Masterthesis Knausenberger [33]).
- Um auf ökobilanzieller Seite aktuelle und frei zugängliche Daten zu Photovoltaikanlagen berücksichtigen zu können, wurden entsprechende Datensätze von der Internationalen Energieagentur [34] für die Nutzung in openLCA/LAEND adaptiert.
- Zur Wärmeerzeugung wurden ein Abwasserwärmetauscher und Freiflächensolaranlagen (Flach- bzw. Röhrenkollektor) neu modelliert.
- Um weitere lizenzfreie Datensätze zur Verfügung stellen zu können, wurden auf Basis von in ecoinvent enthaltenen Datensätzen für Energietechnologien Datensätze mit anderem geografischem Bezug erstellt (z.B. ein Datensatz für die Schweiz auf Deutschland adaptiert).

Für den Netzstrom werden aufgrund des fortschreitenden Ausbaus erneuerbarer Energien sich über die Zeit ändernde Umweltwirkungen angenommen. Basis hierfür ist eine Studie von Naegler et al. [35], in der die Umweltwirkungen verschiedener Szenarien für die Transformation des Energiesystems verglichen wurden. Ausgewählt wurde ein in Bezug auf die Treibhausgasreduktion als ambitioniert bewertetes Szenario (Szenario VI basierend auf Repenning et al. [36]). Für die Treibhausgasemissionen wird die Reduktion aus Abbildung 5 ersichtlich.

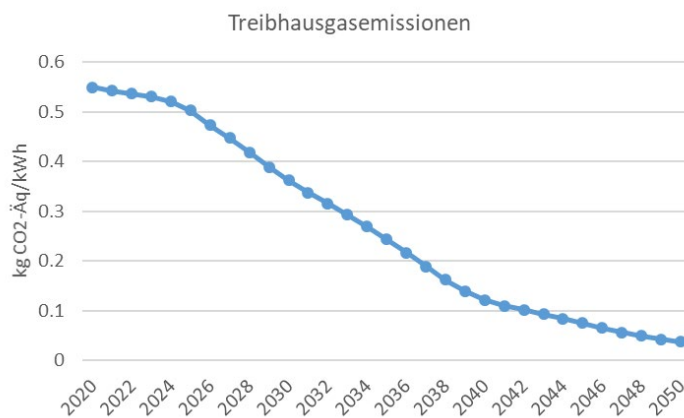


Abbildung 5 Verlauf der Treibhausgasemissionen für Netzstrom nach [35]

Eine Liste der ohne Datenbankbindung nutzbaren Datensätze findet sich im Anhang A 3. Mit Anbindung an eine ecoinvent-Lizenz für openLCA können weitere in der Datenbank vorhandene Energietechnologien im Modell genutzt werden. So finden sich in ecoinvent Datensätze für Dämmmaterialien oder Fenster. Soll auch die energetische Sanierung im Modell berücksichtigt werden, können die Summe aller für die Sanierung notwendigen Materialien oder ein spezifisches Dämmmaterial integriert werden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die aggregierten Umweltwirkungen als EU Environmental Footprint für Investitionen und variable Einheiten für verschiedene Technologien und Energieträger. Die Werte für die Investitionen enthalten sowohl den Bau/die Produktion als

⁵ Fünf Datensätze dürfen lt. den Lizenzbedingungen veröffentlicht werden und können somit auch in der Version ohne Datenbankbindung verwendet werden.

auch die Entsorgung der Anlagen. Durch das Energiesystemmodell wird bestimmt, wieviel Einheiten je Technologie benötigt werden, woraus sich die Ökobilanz des Gesamtsystems ergibt.

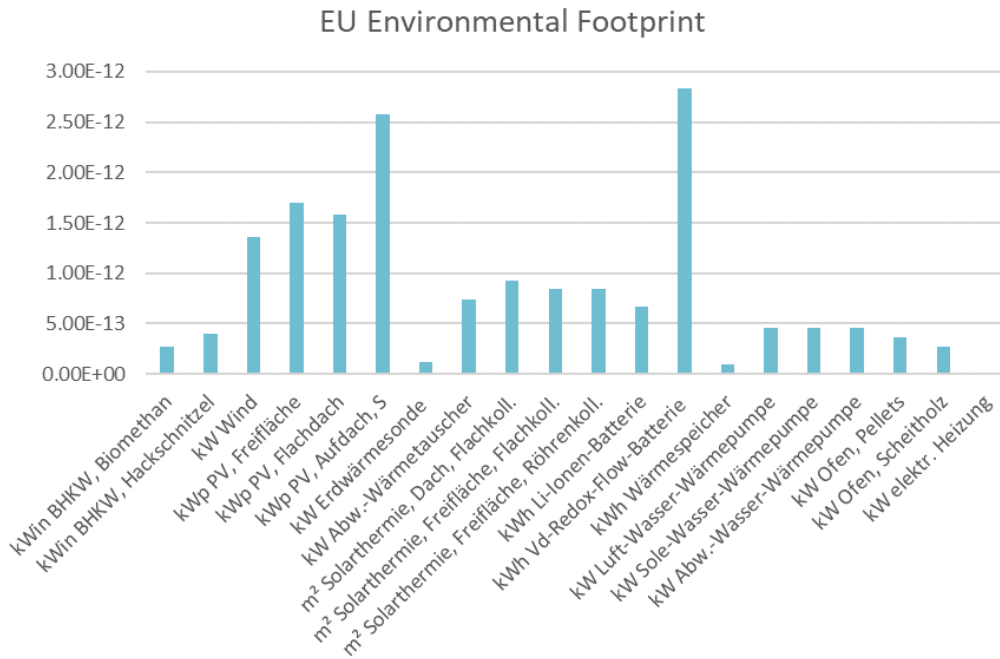


Abbildung 6 Umweltwirkung pro investierter Einheit

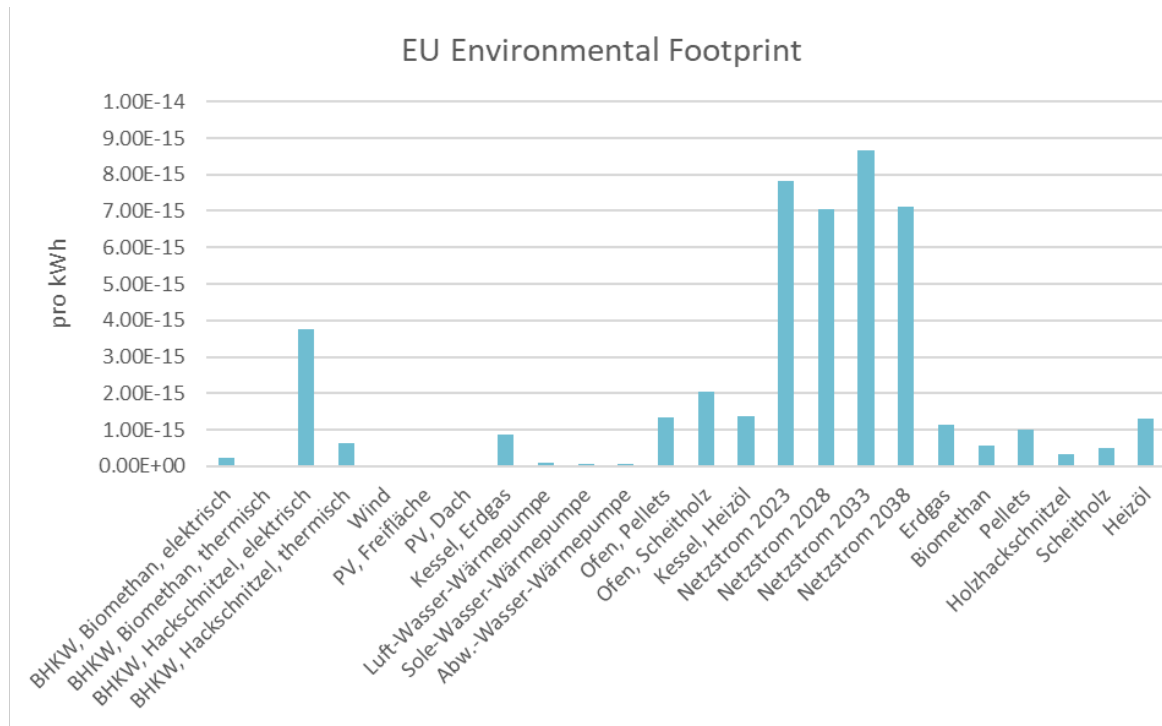


Abbildung 7 Umweltwirkung pro variabler Einheit

2.1.4 Diskussion

Die Belastbarkeit der Ergebnisse einer Energiesystemoptimierung ist u.a. abhängig von den Eingangsdaten für Kosten, Umweltwirkungen, Technologieparameter 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 den Tabellen zum Technikkatalog der KEA-BW [27] entnommen, so dass eine einheitliche Quelle vorliegt, die eine Vergleichbarkeit zum Ziel hat. Die im Jahr 2022 erfolgten Kostensteigerungen wurde in diesen Daten jedoch nicht berücksichtigt. Falls diese Kostensteigerungen für alle Technologien und Energieträger gleich ausfielen, würde sich an der Ausbau- und Einsatzplanung wenig ändern, die absoluten Kosten würden jedoch unterschätzt.

Die Sachbilanzen, 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. Diese Sachbilanz repräsentiert beim Kältemittel einen Marktmix, so dass z.B. das Treibhauspotenzial von propanhaltigen Anlagen damit überschätzt wird. Für ein Wärmenetz liegen bislang keine Sachbilanzdaten vor. Insgesamt ist die Auswahl von Technologien im Modell maßgeblich abhängig von Verfügbarkeit von entsprechenden Sachbilanzen für die Ermittlung der Umweltwirkungen. Trotz Datenlücken können aber alle auf Quartiersebene gängigen Technologien ökobilanziell abgebildet werden.

Des Weiteren gibt es relativ große Unsicherheiten bei Normierung und Gewichtung der Umweltindikatoren. In der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit wurde die Datenbank ecoinvent herstellerseitig aktualisiert und gleichzeitig eine neue Version der Wirkungsabschätzungsmethode des EU Environmental Footprint (v3) zur Verfügung gestellt. Die Aktualisierung des Tools auf diese Version während der Bearbeitung der Fallbeispiele hätte die Neuberechnung der schon berechneten Fallbeispiele bedeutet, da sonst die Fallbeispiele untereinander nur eingeschränkt vergleichbar gewesen wären.

Für Investitionen in der Zukunft können für neue Technologien sich ändernde Kosten erwartet werden, die im Modell zwar berücksichtigt werden könnten, zu denen aber noch keine Daten recherchiert worden sind. In Bezug auf die Umweltwirkungen ist ebenfalls mit einer Änderung in der Zukunft zu rechnen. Dafür würden prospektive Ökobilanzdatensätze benötigt, die nur ansatzweise vorliegen und mit sehr vielen Unsicherheiten verbunden sind. Bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren und Lebensdauern von 15 -25 Jahren, erfolgen Investitionen in der Zukunft nur in begrenztem Umfang, so dass der Fehler hier gering ist. Die Umweltwirkungen durch den Netzstrombezug ändern sich jedoch kontinuierlich, weshalb hier mit prospektiven Daten auf Jahresbasis gearbeitet wurde. Für den Netzstrom würden stündlich aufgelöste Umweltwirkungen die Realität noch besser abbilden, da die Umweltwirkungen stark vom Technolgiemix der Stromerzeugung abhängen, der zeitlich stark variiert. Das ist jedoch für eine prospektive Betrachtung sehr herausfordernd.

Durch die Modellierung des Energiesystems als lineares Modell 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. Ebenso wie Kapazitätsstufen bei Investitionen in neue Anlagen. Für eine strategische Entscheidungsunterstützung können diese Vereinfachungen akzeptiert werden.

Generell wird die Komplexität des Strommarktes nicht vollständig erfasst, da keine Förderungen, Vergütungen, Abgaben etc. berücksichtigt werden. Der Systemkostenansatz ist aufgrund der Fragestellung einer übergeordneten Planung gerechtfertigt (Systemsicht und nicht Einzelsicht) und die Kosten sind weniger relevant bei multi-kriterieller Optimierung als bei reiner Kostenoptimierung.

Die Sektorenkopplung zwischen strom- und wärmeerzeugenden Technologien kann durch die Weiterentwicklung des Planungsmodells abgebildet werden. Die Batterien der E-Autos wurden nicht explizit modelliert, da die Berücksichtigung von Sperrzeiten noch nicht implementiert werden konnte (was auch für Wärmepumpen der Fall ist).

In Bezug auf das unterschiedliche Temperaturniveau des Wärmebedarfs bei Trinkwarmwasser und Niedertemperaturheizwärme ist es sinnvoll, diesen in unterschiedlichen Zeitreihen zu modellieren. Das im Modell implementierte Vorgehen auf Basis der demandlib sieht diese Trennung nicht vor. Bei der Trennung der generierten Zeitreihe kommt es zu einem über die Stunden konstanten Bedarf an Trinkwarmwasser, was nicht der Realität entspricht. Alternativ wurden hier Zeitreihen mit dem Tool nPro generiert. Diese müssen jedoch manuell in das Modell integriert werden.

Obwohl der Umfang an zur Verfügung stehenden Technologien im Wärmesektor die wichtigsten Technologien umfasst, wäre die Modellierung weiterer Technologien hier wünschenswert. Die Modellierung von Langzeitwärmespeichern konnte modelltechnisch noch nicht umgesetzt werden. Auch die Abbildung von Wärmenetzen fehlt bislang. Weitere Wärme- u. Stromspeichertechnologien würden das Modell ebenfalls verbessern.

2.1.5 Bewertung der Ergebnisse

Das Planungsmodell LAEND konnte während der Projektlaufzeit wesentlich verbessert und erweitert werden. Alle geplanten Erweiterungen konnten umgesetzt werden, manche nur ansatzweise, andere sogar darüber hinaus. Die von den potenziellen Nutzer:innen gestellten sinnvollen Anforderungen konnten erfüllt werden. Vor allem das bei der Sektorenkopplung wichtige Zusammenspiel verschiedener Technologien konnte aufgezeigt werden. Die Nutzerfreundlichkeit wurde verbessert, wobei der offene Quellcode viel Flexibilität bietet, um das Modell z.B. an sich verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Auf Seiten der Sachbilanzen konnten alle auf Quartiersebene gängigen Technologien mit lizenzfreien Datensätzen abgebildet werden. Somit wurden alle gesetzten Ziele erreicht.

Eine Limitierung stellen häufig die Daten dar, wobei die Funktionalität vorhanden ist, eine langfristige Perspektive abzubilden. Dabei sind die Details jedoch von untergeordneter Bedeutung, wichtig ist es, die zentralen Charakteristika korrekt abzubilden, was mit der Weiterentwicklung erfolgt ist.

2.2 ANWENDUNG DES PLANUNGSMODELLS ZUR IDENTIFIKATION DER OPTIMALEN AUSBAU- UND EINSATZPFADE FÜR DREI QUARTIERE

Zum Testen der Weiterentwicklungen und zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit wurde das Planungstool LAEND auf drei Fallbeispiele angewendet. Auf Basis der sich aus den Anforderungen der Fallbeispiele ergebenden Anforderungen wurden die Funktionalitäten entsprechend angepasst oder ergänzt. Es wurden Quartiere in Konstanz, Wiernsheim und Gerstetten ausgewählt. Für alle drei Quartiere wurden zuerst die Zielstellungen definiert. In den drei untersuchten Quartieren war die Art der Fragestellungen unterschiedlich:

- Konstanz: Ableitung von Vorgaben für den Bebauungsplan für ein Neubauquartier für klimaneutrale Energieversorgung/Unterstützung Machbarkeitsstudie (Stadtverwaltung)
- Wiernsheim: Orientierung für Förderung von Energietechnologien für ein Bestandsquartier durch die Gemeindeverwaltung
- Gerstetten: Technologieauswahl zur Nahwärmeerzeugung bei Erweiterung eines Nahwärmenetzes einer Energiegenossenschaft

Nachdem die Systemgrenzen definiert und die Bedarfe, Potenziale und ggf. die Art und Leistung der Bestandsanlagen ermittelt waren, wurde mit diesen Daten das Modell konfiguriert und für verschiedene Ziele (Kosten und/oder Umweltwirkungen) für einen Zeitraum von 20 Jahren optimiert. Diese Zwischenergebnisse wurden mit den Vertreter:innen der Quartiere diskutiert und ggf. Parameter angepasst, bevor die endgültige Optimierung stattfand. Die Ergebnisse umfassen die für das gewählte Ziel optimale Ausbau- und Einsatzplanung, welche in Bezug auf die neu installierten Leistungen, Gesamtkosten und Umweltwirkungen verglichen wurden. 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 – ermittelt werden.

2.2.1 Quartier Konstanz

Rahmenbedingungen und Modellaufbau

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

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

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Modells mit den zur Verfügung stehenden Technologien und deren Verknüpfung untereinander. Aus den Verbindungen zu den Bedarfen ist auch die Kopplung der Sektoren ersichtlich.

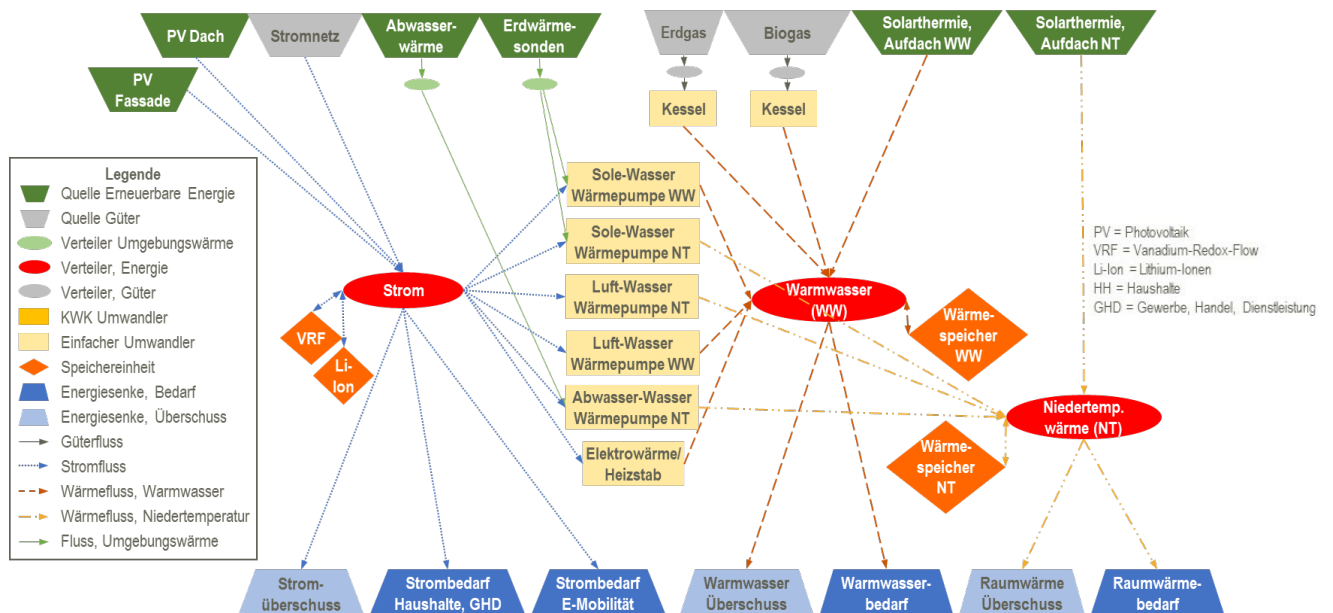


Abbildung 8 Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern für das Quartier Konstanz

Es werden zwei Optionen für den Wärmebedarf betrachtet:

- einmal der Wärmebedarf für den Effizienzhaus(EH)40-Standard⁶ und
- einmal für den EH55-Standard.

Dazu werden zwei verschiedene Wärmebedarfszeitreihen für die Raumwärme generiert und der Optimierung zu Grunde gelegt. Beim EH40-Standard werden die Kosten und die Umweltwirkungen für den Mehraufwand an Dämmung nachträglich zu den Ergebnissen addiert (zu den Inputdaten, Annahmen und Parametern siehe Anhang A 4).

Das oben beschriebene Modell wird für vier verschiedene Ziele optimiert. Minimierung von:

- Gesamtkosten
- Treibhauspotenzial
- Multi-kriteriell: aggregierte Umweltwirkungen als EU Environmental Footprint
- Multi-kriteriell: Kosten und EU Environmental Footprint (70:30)

Im Folgenden werden die Optimierungsergebnisse in Bezug auf die Systemkonfigurationen (installierten Leistungen), die Kosten und die Umweltwirkungen für den EH40-Standard dargestellt und für die verschiedenen Optimierungsziele verglichen. Die Ergebnisse für den EH55-Standard finden sich im Anhang A 4, ebenso wie eine Sensitivitätsanalyse zur isolierten Betrachtung des Wärmesystems.

Installierte Leistung

Bei der Stromerzeugung wird bei allen Optimierungszielen in Photovoltaikanlagen auf dem Dach investiert, allerdings variiert die Leistung: Bei der Kostenoptimierung ist sie am geringsten, bei der Minimierung des Treibhauspotenzials wird die ganze Dachfläche ausgeschöpft und mit Photovoltaik- bzw. Solarthermie-Anlagen bestückt. Die Fassaden-Photovoltaik-Anlage wird nur bei der Kosten- und der Treibhauspotenzialminimierung verwendet. Außer bei der

⁶ Das bedeutet, dass das Gebäude einen Energiebedarf von 40 % des gesetzlich vorgeschriebenen maximalen Energiebedarfs nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) hat; analog 55 % bei EH55.

Kostenoptimierung wird bei den anderen Optimierungszielen zu Beginn in relativ große Lithium-Ionen-Batterien investiert und über die Jahre erweitert. Im Jahr 2038 nach Ende der Lebensdauer wird unterschiedlich stark in Ersatz investiert.

Die Wärme wird bei allen Optimierungszielen überwiegend mit Wärmepumpen erzeugt, wobei der Typ variiert und außer bei der Optimierung der Umweltwirkungen über den EU Environmental Footprint auch mehrere Typen eingesetzt werden. Hier wird allein auf die Sole-Wasser-Wärmepumpe gesetzt. Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe kommt bei allen anderen Optimierungszielen zum Einsatz, wobei die Leistung⁷ bei der Umwelloptimierung und der Treibhauspotenzialminimierung sehr gering ist. Die größere Leistung haben entweder die Abwasser-Wasser- oder die Sole-Wasser-Wärmepumpe. Bei allen Optimierungszielen werden Elektrowärme und Wärmespeicher verwendet. Außer im kostenoptimalen Energiesystem wird immer ein Biomethankessel verwendet. Stattdessen wird im kostenoptimalen Energiesystem ein kleiner Erdgaskessel gebaut. Solarthermische Anlagen werden nur bei der Treibhauspotenzialminimierung zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt. Die Vanadium-Redox-Flow-Batterie kommt in keinem der optimierten Energiesysteme zum Einsatz.

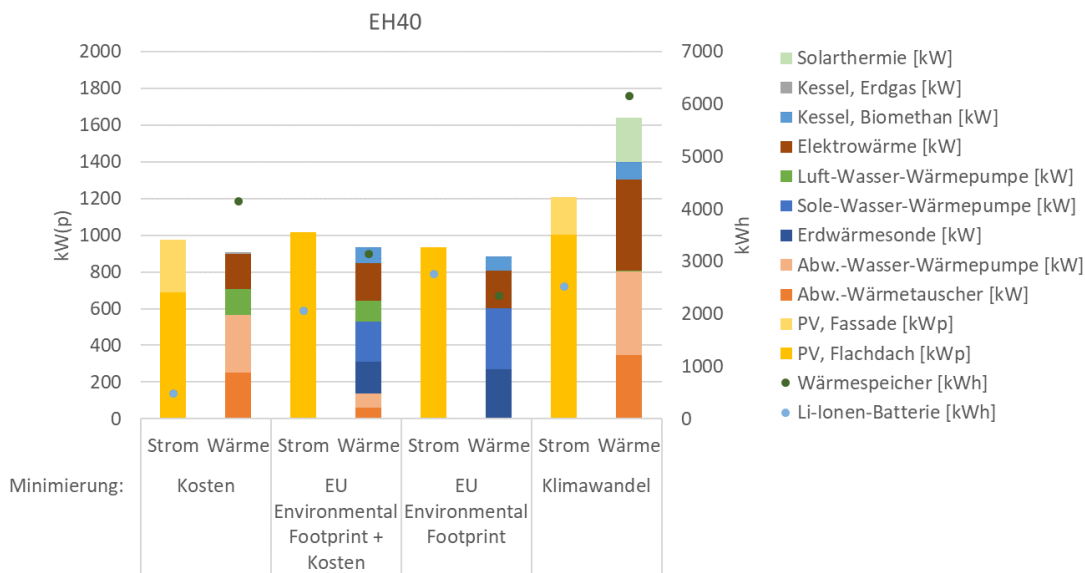


Abbildung 9 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH40 (PV = Photovoltaik)

Beim Ergebnis für die multi-kriterielle Optimierung aus Umweltwirkungen und Kosten wird deutlich, dass hier für die Wärmeerzeugung fast alle Technologien mit geringeren installierten Leistungen zum Einsatz kommen, statt verstärkt auf einzelne Technologien wie Abwasserwärme (Kostenoptimierung) oder Erdwärme (Optimierung Env. Footprint) zu setzen.

Kosten und Umweltindikatoren im Vergleich

Die folgende Abbildung zeigt die Indikatoren Kosten, Umweltwirkungen als EU 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 Optimierungsziel zu finden. So hat bspw. die Optimierung der Kosten den geringsten Wert beim Indikator Kosten.

⁷ Die Leistungen für Wärmepumpen entsprechen den maximalen Wärmeleistungen.

Für die Kostenoptimierung ergeben sich sowohl 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 sind die größeren PV-Anlagen bei diesem Optimierungsziel. Als Kompromisslösung zeigt sich die multi-kriterielle Optimierung von EU Environmental Footprint und Kosten. Die Gesamtumweltwirkungen (Env. Footprint) sind gegenüber der Kosten- und Treibhauspotenzialoptimierung deutlich reduziert, das Treibhauspotenzial ist nur leicht höher als würde dieses isoliert optimiert. Insgesamt liegen die Indikatorwerte je Ziel relativ nah beieinander (max. 20 % Unterschied). Grund hierfür ist, dass die Auswahl an Technologien relativ klein ist, so dass auch die Optimierungsergebnisse relativ ähnlich sind.

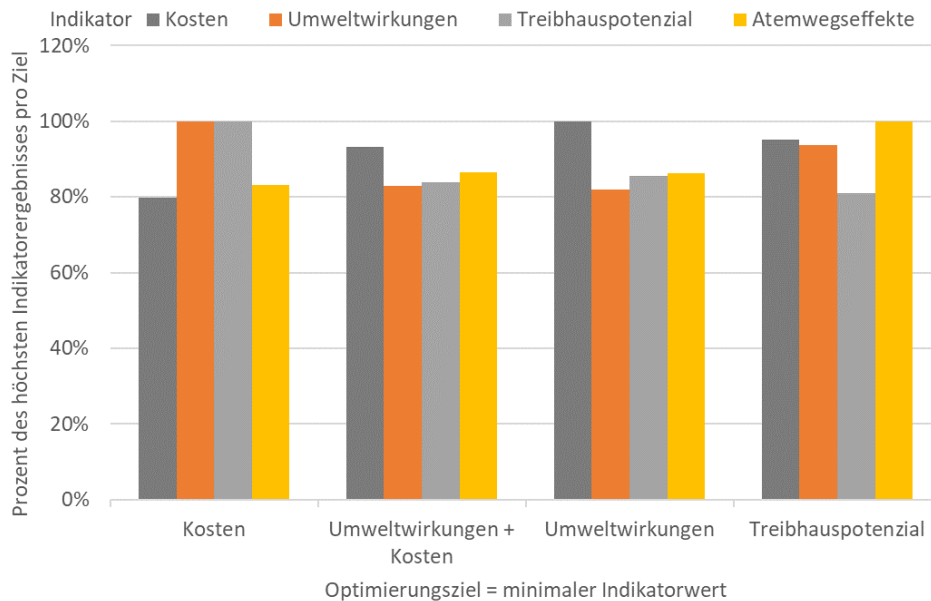


Abbildung 10 Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für EH40-Standard für Quartier Konstanz

Ergebnisanalyse

Die Ergebnisse zeigen, dass die multi-kriterielle Optimierung unter Einbezug von Kosten und Umweltwirkungen zu einer Systemkonfiguration führt, die einen Kompromiss zwischen den Zielen ermöglicht. Bei den Einzeloptimierungen fallen die Systemkonfigurationen in Bezug auf die Höhe der installierten Leistungen sehr unterschiedlich aus; die Art der verwendeten Anlagen unterscheidet sich allerdings nicht extrem. Wenn Erdgas- und Biomethan-Kessel zur Verfügung stehen, wird außer im kostenoptimalen Fall der Biomethan-Kessel bevorzugt. Beim Kostenoptimum wird stattdessen Erdgas eingesetzt, da aus Kostensicht die hohen Kosten für den Bezug von Biomethan nachteilig sind, aus Umwelt- und Klimasicht dieses jedoch Vorteile hat. Auch Lithium-Ionen-Batterien zeigen Nachteile bei den Kosten, aber Vorteile bei Umwelt- und Klimazielen. Vanadium-Redox-Flow-Batterien sind im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien für keines der Ziele vorteilhaft. Demgegenüber kommen Photovoltaik-Anlagen in allen Konfigurationen zum Einsatz, wobei das vorhandene Potenzial nicht immer voll genutzt wird. Hier zeigt sich, dass die Umweltwirkungen und Kosten noch relativ hoch sind. Ersteres trifft vor allem auf Fassaden-PV zu, deren Ausbeute geringer ist als bei Aufdach-PV, was die Umweltwirkungen pro erzeugter Kilowattstunde Strom erhöht. Auch Wärmespeicher sind in jedem Fall sinnvoll. Solarthermie hat demgegenüber in den meisten Fällen in der hier betrachteten Konstellation keine Vorteile. Bei der in relativ großem Umfang genutzten Elektrowärme ist zu

berücksichtigen, dass diese nur vorteilhaft ist, solange sie aus Überschussstrom aus der Photovoltaik-Anlage gespeist wird. Luft-Wasser-Wärmepumpen werden nur in sehr geringem Umfang eingesetzt, da sie im Vergleich zu Sole- und Abwasser-Wasser-Wärmepumpen eine geringere Effizienz aufweisen, was sich sowohl für Kosten als auch Umweltwirkungen nachteilig auswirkt, so dass die anderen Technologien bevorzugt werden. Das heißt jedoch nicht, dass sie nicht prinzipiell geeignet wären.

Im Vergleich der Dämmstandards werden beim EH55 tendenziell höhere Wärmeleistungen installiert als beim EH40-Standard (insg. 14-19 %) und etwas mehr Leistung zur Stromerzeugung gebaut, da für die Wärmeerzeugung zusätzlicher Strom benötigt wird. Die Gesamtkosten für Wärmeerzeugung und Dämmung liegen bei höherem Dämmstandard zwischen 2 bis 3 % über den Gesamtkosten des EH55-Standards. Die eingesparten Kosten für die Wärmedämmung werden in etwas geringerem Umfang in Investition bzw. Betrieb von Energieerzeugungsanlagen gesteckt. Ähnliches gilt für die Umweltwirkungen.

2.2.2 Quartier Wiernsheim

Rahmenbedingungen und Modellaufbau

Für den Teilort Wiernsheim wurden die Nachfrage von Haushalten und Gewerbe, Handel und Dienstleistung inkl. Elektromobilität betrachtet. Die Industrie blieb außen vor, da spezielle Anforderungen beim Strom- und Wärmebedarf bestehen, für die keine spezifischen Daten vorliegen.

Den Aufbau des Modells mit den berücksichtigten Technologien und deren Verknüpfungen untereinander und zur Nachfrage zeigt die folgende Abbildung. Bei diesem Quartier werden auch Bestandsanlagen für die Wärmeerzeugung berücksichtigt. Detaillierte Angaben zu den Eingangsdaten finden sich im Anhang A 5.

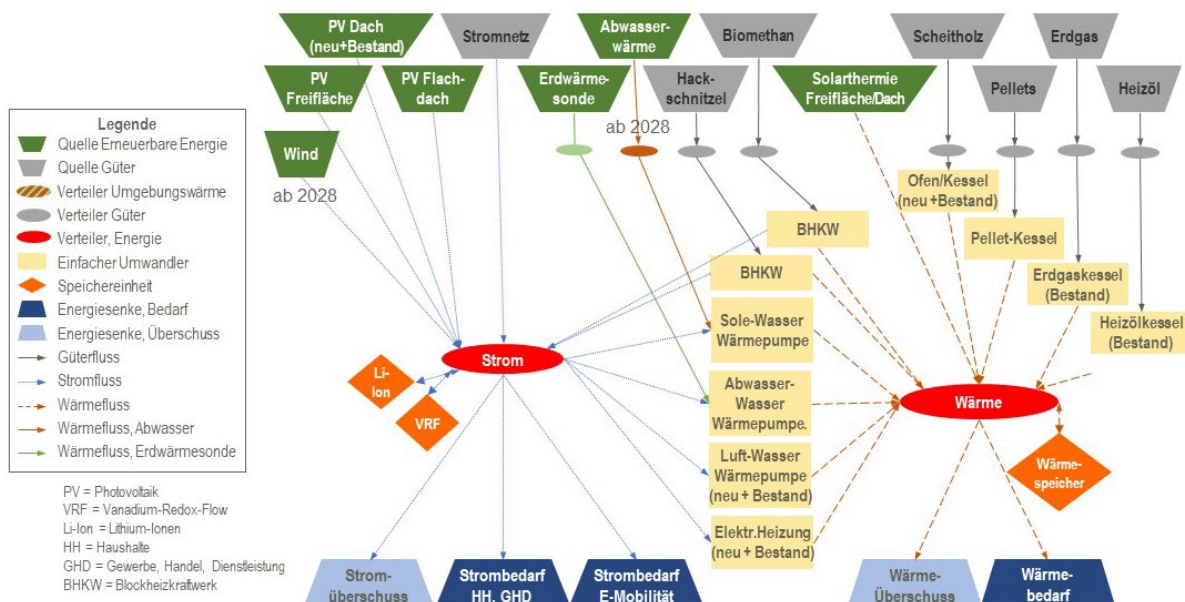


Abbildung 11 Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern für Quartier Wiernsheim

Das Modell für Wiernsheim wird für drei Ziele optimiert und die Ergebnisse in Bezug auf die installierten Leistungen, Kosten und Umweltwirkungen verglichen:

- Gesamtkosten

- Treibhauspotenzial
- Multi-kriteriell: Kosten und EU Environmental Footprint (50:50)

Die Kosten und Umweltwirkungen werden darüber hinaus einem Business-as-usual-Szenario gegenübergestellt.

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 multi-kriterieller Optimierung wird eine Freiflächenanlage, bei Treibhauspotenzialoptimierung werden Flachdachanlagen präferiert. In diese wird zum überwiegenden Teil erst im Jahr 2038 investiert (Lebensende Hackschnitzel-BHKW). 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 multi-kriteriellen 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 multi-kriteriellen Optimierung. Die Kostenoptimierung setzt nur auf Biomethan als Brennstoff.

Die Wärme wird bei allen Optimierungszielen mit einem Mix aus Erzeugungstechnologien bereitgestellt, wobei die Leistungen je nach Ziel variieren. Holzfeuerungen (außer Scheitholz bei multi-kriterieller Optimierung) finden immer bis zur Obergrenze Verwendung. Wärmepumpen und elektrische Heizungen werden in unterschiedlichen Leistungen eingesetzt. Wärme aus solarthermischen Freiflächen-Anlagen wird nur bei der Treibhauspotenzialoptimierung eingesetzt 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. Neubau von Aufdachanlagen für Photovoltaik und Solarthermie kommen in keinem der optimierten Energiesysteme vor. Wärmespeicher sind in allen Optimierungen in ähnlicher Größenordnung vorgesehen.

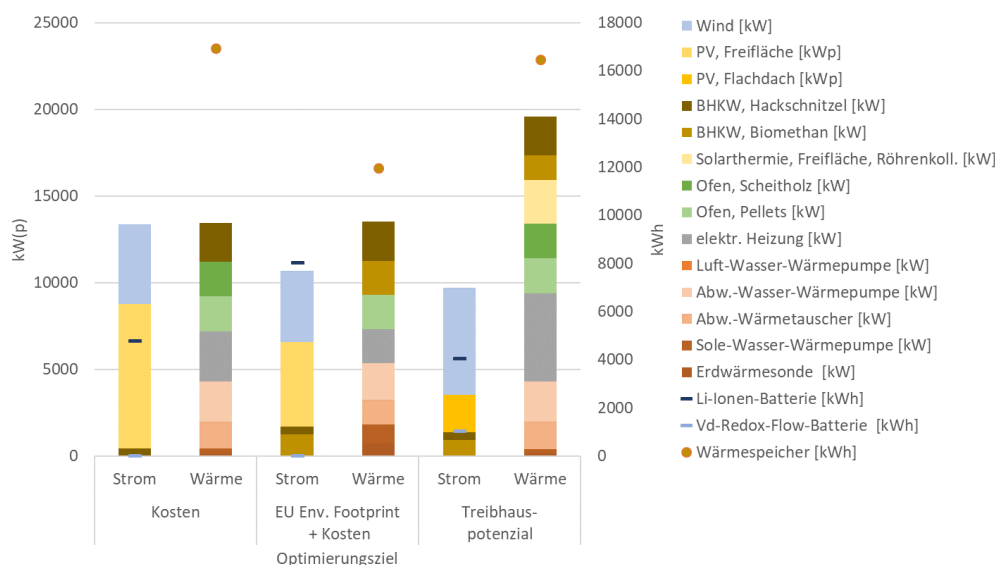


Abbildung 12 Kumulierte installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele über 20 Jahre (Leistungen für Wärmepumpen entsprechen den maximalen Wärmeleistungen)

Energieerzeugung

Wenn man sich die Strom- und Wärmeerzeugung über die Zeit anschaut, kann einerseits der Einsatz der Bestandsanlagen und andererseits der Bezug von Netzstrom veranschaulichen.

Strom

Bei allen Optimierungszielen wird gleich viel Strom aus den PV-Bestandsanlagen (PV, Dach) 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, da dieser dann klimafreundlicher geworden ist. Die unterschiedlichen Strommengen in den Szenarien resultieren aus dem steigenden Bedarf aufgrund der Annahmen für Elektromobilität und den unterschiedlich hohen Einspeisungen ins Stromnetz (für die keine Vergütung angenommen werden).

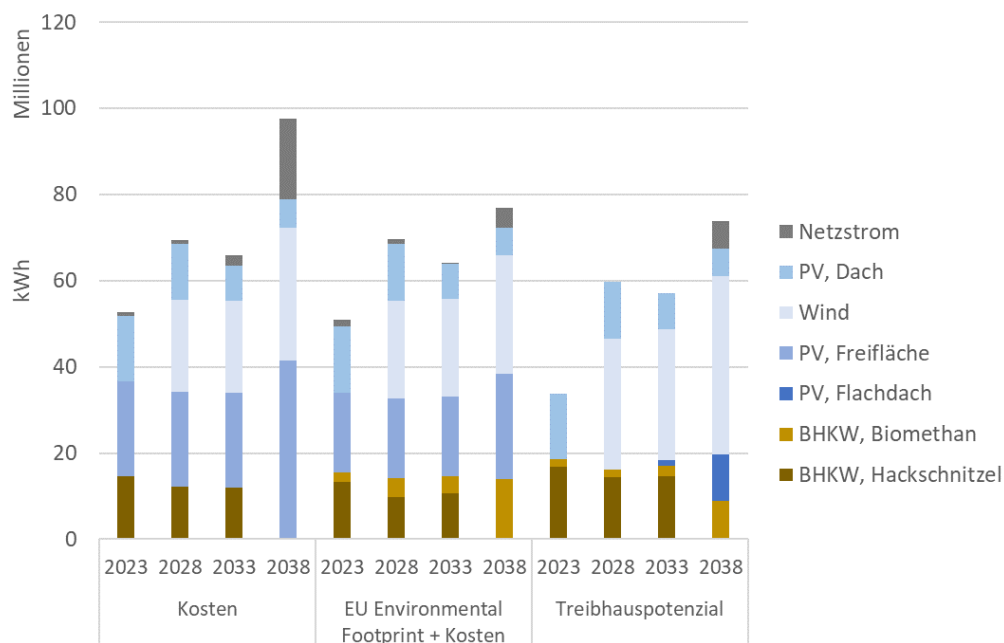


Abbildung 13 Stromerzeugung nach Technologien und nach Fünfjahreszeiträumen je Optimierungsziel (PV, Dach = Bestand)

Wärme

Der Wärmebedarf sinkt über die Jahre (aufgrund energetischer Sanierung). Die Nutzung von Bestandsanlagen ist gering bis gar nicht vorgesehen. Bei der Kostenoptimierung werden noch in nennenswertem Umfang, allerdings über die Zeit sinkend, Heizölkessel aus dem Bestand genutzt. Bei der multi-kriteriellen Optimierung ist das bei den Erdgaskesseln der Fall. Bei der Treibhauspotenzialoptimierung kommen keine fossilen Energieträger zur Wärmeerzeugung mehr zum Einsatz.

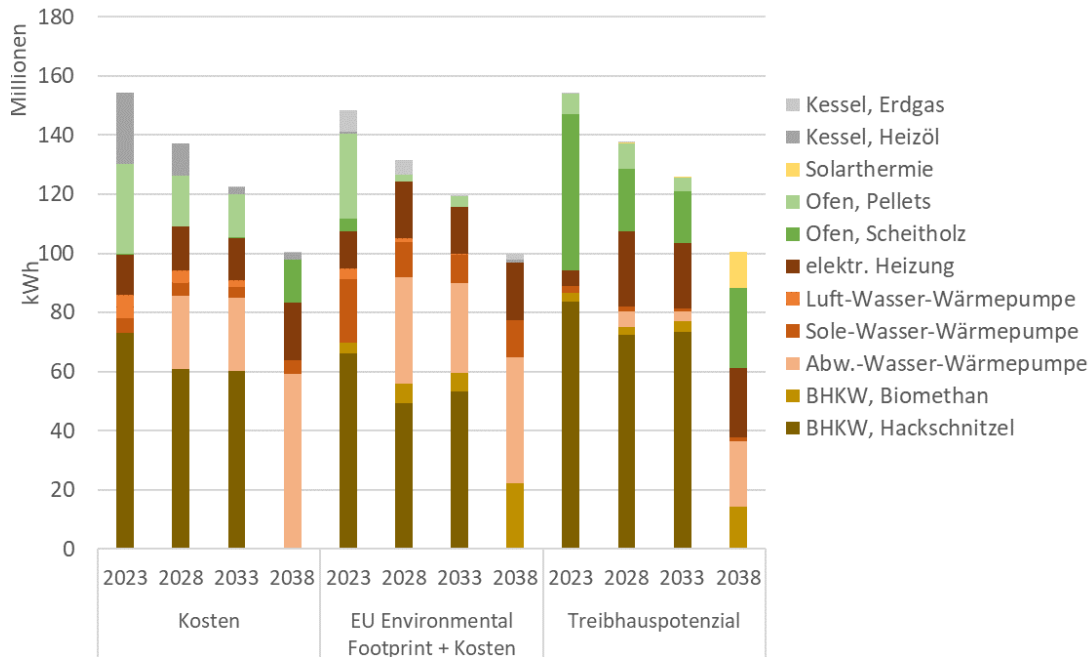


Abbildung 14 Wärmeezeugung nach Technologien und nach Fünfjahreszeiträumen je Optimierungsziel

Kosten und Umweltindikatoren im Vergleich

Abbildung 15 zeigt die Indikatoren Kosten, Gesamtumweltwirkungen als Environmental Footprint, Treibhauspotenzial und exemplarisch Atemwegseffekte für die verschiedenen Optimierungsziele.⁸

Vergleicht man die Kostenoptimierung mit der multi-kriteriellen 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 multi-kriteriellen 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, Atemwegseffekte noch deutlicher. Das Treibhauspotenzial liegt im Mittelfeld.

⁸ 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.

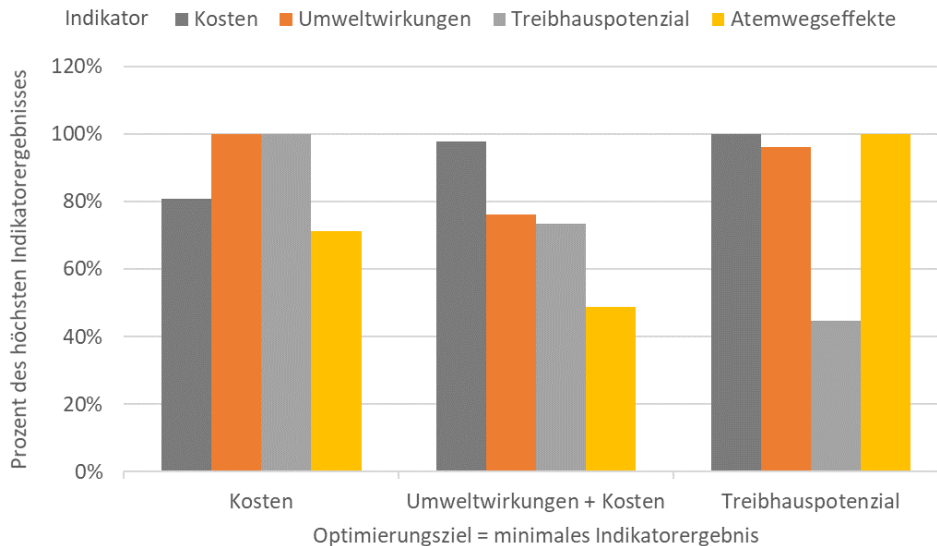


Abbildung 15 Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für Fallstudie Wiernsheim

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 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 multi-kriteriellen 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.

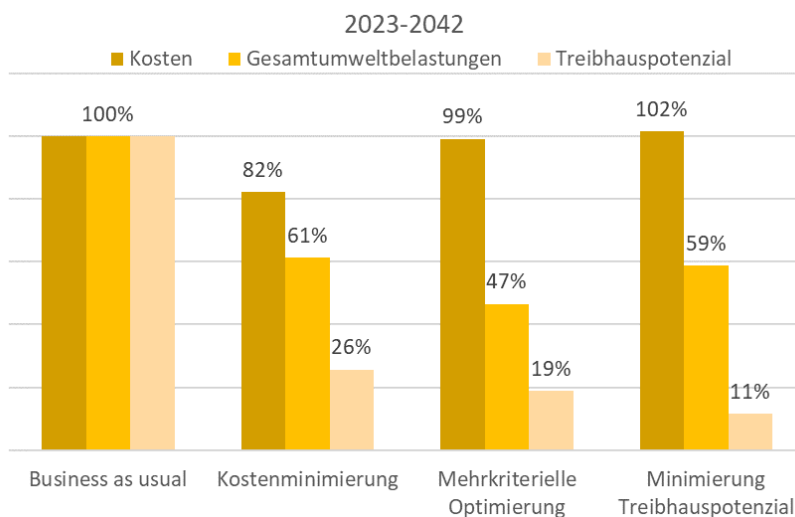


Abbildung 16 Vergleich ausgewählter Indikatoren bis 2042 für die Optimierungsergebnisse im Vergleich zu einem Business as usual-Szenario

Ergebnisanalyse

Obwohl in diesem Fallbeispiel Bestandsanlagen zur Wärmeerzeugung mit der Möglichkeit der kompletten Wärmebedarfsdeckung zur Verfügung stehen, werden diese für alle Optimierungsziele wenig bis gar nicht eingesetzt. Selbst die Kostenoptimierung greift kaum darauf zurück. Das bedeutet, dass die Bestandsanlagen im Betrieb weder kosten- noch umweltseitig vorteilhaft sind. Insgesamt zeigen alle Optimierungsergebnisse relativ wenig Netzstrombezug, d.h. Umweltwirkungen und Kosten durch Eigenerzeugung mit erneuerbaren Energien sind sowohl für Wärme- als auch für Stromerzeugung auf lange Sicht gesehen günstiger. Hier zeigt sich, dass ein Mix aus verschiedenen Technologien vorteilhaft ist.

Da auch das System nach Kostenoptimierung weitgehend auf erneuerbare Energietechnologien setzt, zeigt sich, dass auch die Optimierung nach Kosten schon eine deutliche Reduktion des Treibhauspotenzials im Vergleich zum Ist-Zustand ermöglicht. Eine weitere Reduktion um 5 bzw. 10 % geht mit Kostensteigerungen von 20 bzw. 22,5 % einher.

2.2.3 Quartier Gerstetten

Rahmenbedingungen und Modellaufbau

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.

Obwohl es in Gussenstadt vornehmlich um die Wärmeerzeugung geht, wird der Strombedarf mitbetrachtet, um die Auswirkungen der strombasierten Wärmeerzeugung berücksichtigen zu können. 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. Kosten und Umweltwirkungen von Bau und Betrieb des neuen Wärmenetzes bleiben unberücksichtigt, da Größe und Art des Wärmenetzes keine Entscheidungsvariablen sind.

Die für das Quartier Gussenstadt berücksichtigten Technologien zur Befriedigung der Strom- und Wärmenachfrage können nachstehender Abbildung entnommen werden. Weitere Details zur Modellkonfiguration finden sich im Anhang A 6.

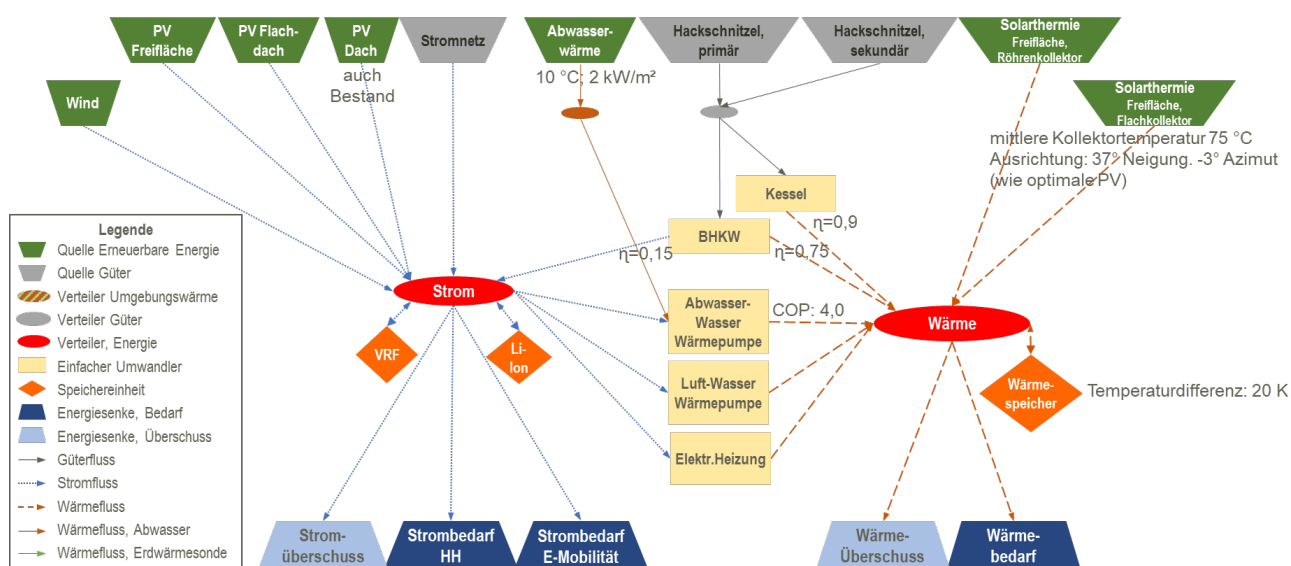


Abbildung 17 Modellstruktur mit den zur Verfügung stehenden Erzeugungstechnologien und Speichern für Quartier Gerstetten

Für dieses Fallbeispiel werden zwei verschiedene Szenarien in Bezug auf die Auswahl der zur Verfügung stehenden Technologien zur Wärmeerzeugung und dem verfügbaren Holzhackschnitzelpotenzial verglichen. Im Basisszenario stehen alle Technologien (vgl. Abbildung 17) mit dem im Anhang A 6 dargestellten Potenzial zur Verfügung. Hackschnitzel sind gut verfügbar (Obergrenze Primärmaterial: 3,3 GWh, Sekundärmaterial: 1,67 GWh). Derzeit wird geplant, das neue Wärmenetz über eine Luft-Wasser-Wärmepumpe und einen Hackschnitzelkessel zu speisen. Aus diesem Grund umfasst ein weiteres Szenario nur diese beiden Technologien, wobei die Hackschnitzelverfügbarkeit stärker begrenzt ist. Hackschnitzel aus Primärmaterial stehen im Umfang von 1,2 GWh pro Jahr und sekundäre Hackschnitzel mit 0,6 GWh pro Jahr zur Verfügung.

Die beiden Szenarien werden für die drei Ziele Gesamtkosten, Gesamtkosten und Umweltwirkungen multi-kriteriell sowie Treibhauspotenzial optimiert und im Hinblick auf die installierten Leistungen, Kosten und Umweltwirkungen verglichen.

Installierte Leistung

Wenn alle Technologien zur Verfügung stehen, wird die überwiegende Leistung zur Wärmeerzeugung von einem Hackschnitzel-BHKW bereitgestellt. Dieses wird bei Kosten- und multi-kriterieller Optimierung unterstützt von einer Abwasser-Wasser-Wärmepumpe und Elektrowärme. Bei der Minimierung des Treibhauspotenzials kommt anstelle der Wärmepumpe ein Hackschnitzelkessel zum Einsatz. Wärmespeicher werden in allen Systemen verwendet. Es werden weder Luft-Wasser-Wärmepumpe noch Solarthermie eingesetzt. In Stromdirektheizungen (Elektrowärme) wird investiert, um den Überschussstrom aus den Windenergieanlagen zu nutzen, die zur Deckung der Haushaltsstromnachfrage bei allen Optimierungszielen in etwa gleichem Umfang installiert werden. Nur die Optimierung der Kosten sieht (neben der Nutzung vorhandener Kapazitäten) eine weitere Installation von PV-Anlagen vor. In geringem Umfang wird bei der multi-kriteriellen Optimierung in Kapazitäten zur Stromspeicherung investiert. Hier werden Lithium-Ionen-Batterien den Vandium-Redox-Flow-Batterien vorgezogen.

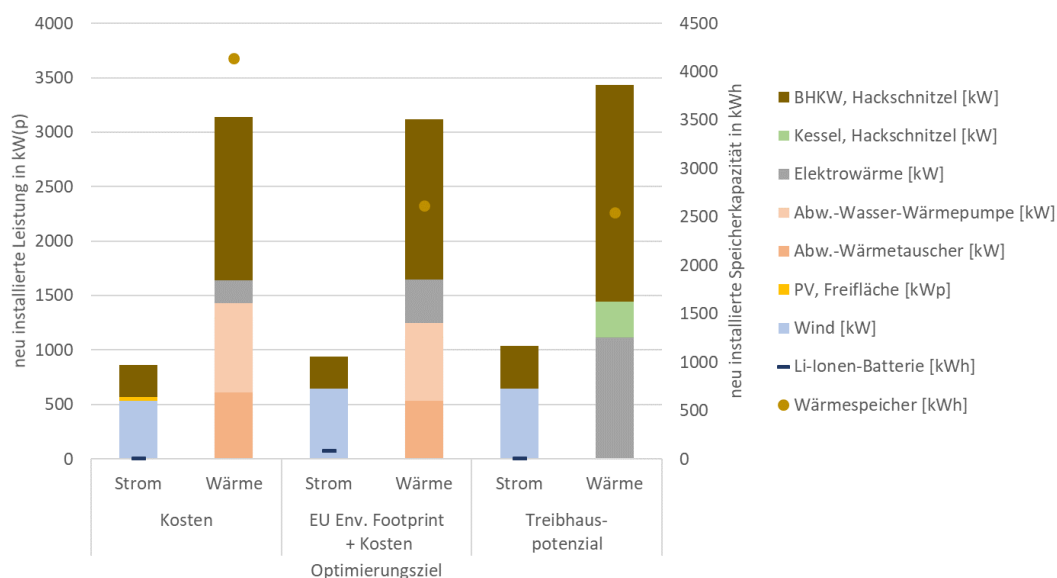


Abbildung 18 Kumulierte installierte Leistung bzw. Kapazität (Speicher) für das Szenario mit allen Technologien über 20 Jahre

Wird die Wärme nur über Luft-Wasser-Wärmepumpe und Hackschnitzelkessel erzeugt, steigt im Vergleich zum unlimitierten Szenario der Windenergieausbau und auch die Speicherkapazitäten – vor allem für Wärme. Wird das Treibhauspotenzial minimiert werden zusätzlich zur Li-Ionen-Batterie auch in eine Vanadium-Redox-Flow-Batterie und in Solarthermie investiert.

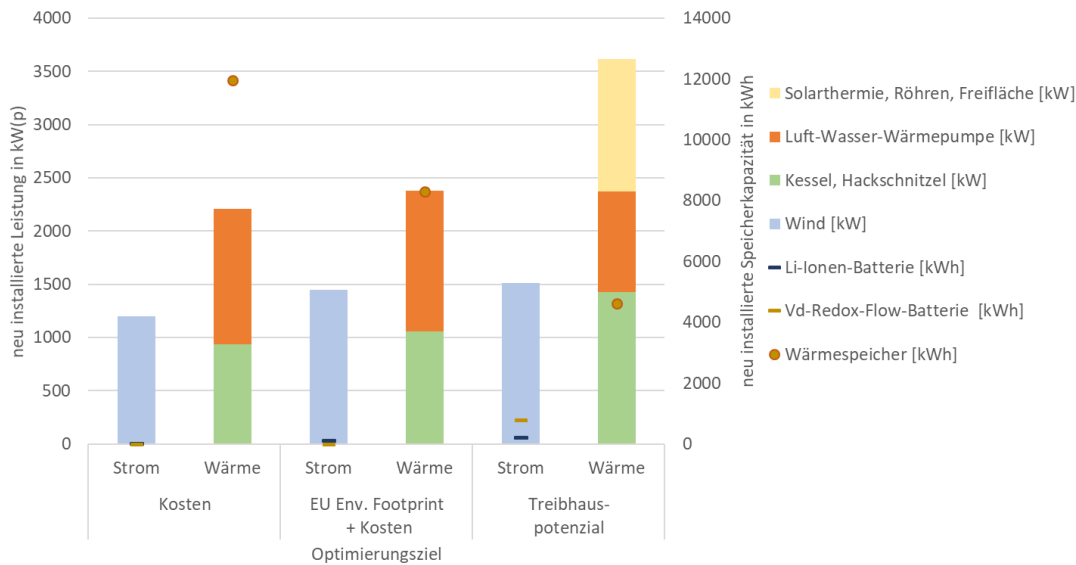


Abbildung 19 Kumulierte installierte Leistung bzw. Kapazität (Speicher) für das Szenario mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Hackschnitzelkessel über 20 Jahre

Kosten und Umweltindikatoren im Vergleich

Beim relativen Vergleich der Indikatoren werden zuerst die Ergebnisse der verschiedenen Optimierungsziele je Szenario und dann die Szenarien untereinander für die multi-kriterielle Optimierung verglichen.

Bei beiden Szenarien können durch die multi-kriterielle Optimierung im Vergleich zu Einzielloptimierung Kosten bzw. Umweltwirkungen reduziert werden. Beim Szenario mit allen Optionen sind die Unterschiede höher als beim limitierten Szenario. Durch die beschränkte Auswahl an Optionen sind auch die optimalen Systeme je Ziel relativ ähnlich und damit die Indikatorwerte. Bei beiden Szenarien führt die Treibhauspotenzialminimierung zu höheren Kosten und Umweltwirkungen als die Kostenoptimierung, welche jedoch beim Treibhauspotenzial zu höheren Wirkungen führt.

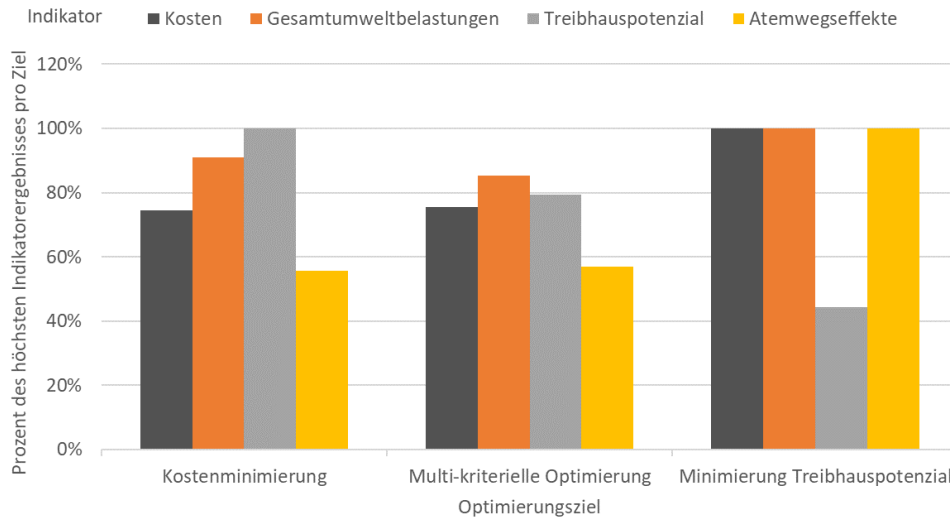


Abbildung 20 Relativer Indikatorvergleich für das Szenario mit allen Optionen (höchster Wert je Indikator 100 %)

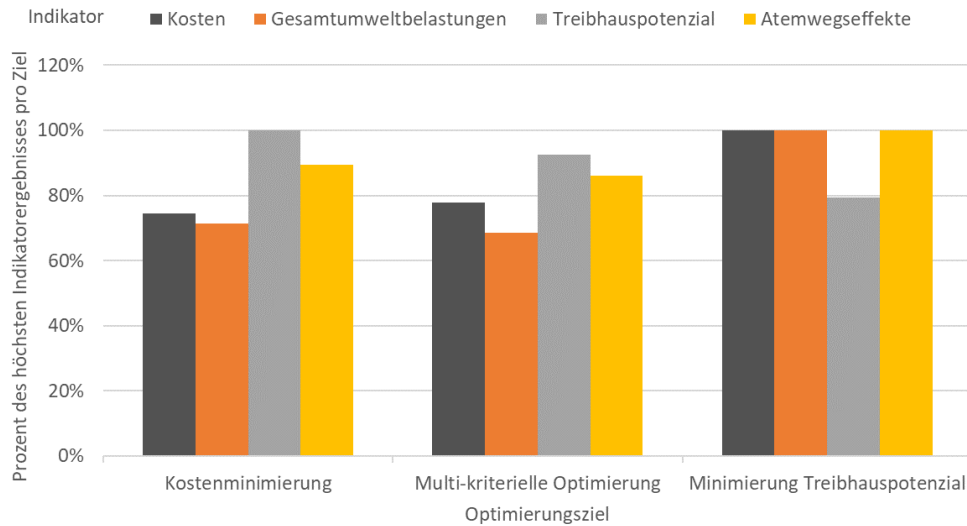


Abbildung 21 Relativer Indikatorvergleich für das beschränkte Szenario (höchster Wert je Indikator 100 %)

Beim Vergleich der absoluten Kosten über 20 Jahre fallen diese ohne Einschränkung der Technologien und Hackschnitzelverfügbarkeit geringer aus (Abbildung 22). Die Einschränkung auf Luft-Wasserpumpe und Hackschnitzel-Kessel verursacht deutliche Mehrkosten. Grund dafür ist der Windenergieausbau, der aufgrund des nicht zur Verfügung stehenden BHKWs und den höheren Bedarf durch die Luft-Wasser-Wärmepumpe stärker ausfällt.

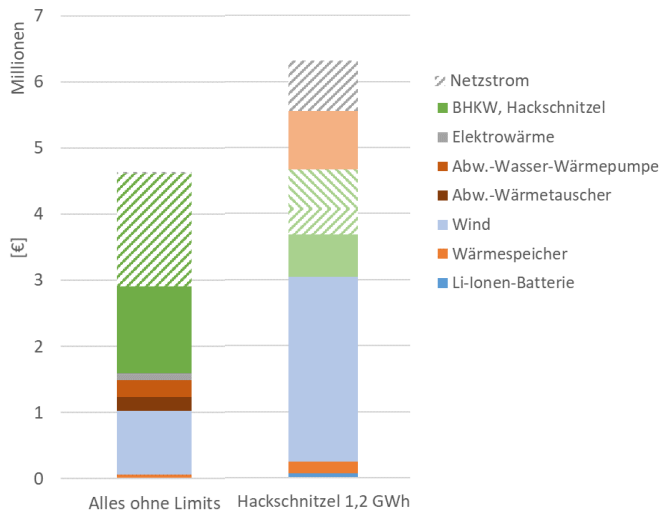


Abbildung 22 Investitionen und variable Kosten über 20 Jahre bei multi-kriterieller Optimierung von Umweltwirkungen und Kosten

Bezüglich des Treibhauspotenzials über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich bei einer Betrachtung von 20 Jahren eine signifikante Erhöhung (~ Faktor 3) bei Einschränkung auf Luft-Wasserwärmepumpe und Hackschnitzel-Kessel (Abbildung 23). Gründe hierfür sind der Netzstrombezug und Betriebsemissionen aus der Wärmepumpe.

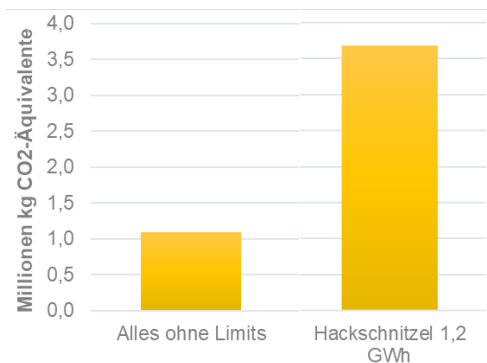


Abbildung 23 Szenarienvergleich in Bezug auf das Treibhauspotenzial über 20 Jahre bei multi-kriterieller Optimierung von Umweltwirkungen und Kosten

Ergebnisanalyse

Hackschnitzel erweisen sich sowohl aus Kosten- als auch aus Umweltsicht als eine vergleichsweise günstige und effiziente Energiequelle. Wenn Hackschnitzel verwendet werden, zeigt sich das Blockheizkraftwerk (BHKW) als die bevorzugte Option im Vergleich zum Hackschnitzelkessel. 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. Die Eigenerzeugung von Strom erweist sich bei multi-kriterieller Betrachtung als vorteilhafter als der Bezug aus dem Netz. Darüber hinaus zeigt sich, dass Wärmespeicher in diesem System eine größere Relevanz haben als Stromspeicher.

2.2.4 Beobachtungen über alle Fallbeispiele hinweg

Über alle Fallbeispiele und Optimierungsziele hinweg zeigt sich auf Systemebene, dass der Hochlauf der Elektromobilität den Ausbau von Stromkapazitäten nach sich zieht. Dasselbe gilt für die Nutzung von Wärmepumpen. Elektrowärme erweist sich nur dann als vorteilhaft, wenn sie aus Überschussstrom gespeist wird. Aus der Gesamtsystemsicht ergibt sich, dass die

Speicherung von Strom für die Wärmeerzeugung nicht sinnvoll ist, während Wärmespeicher in jedem Fall sinnvoll sind.

Im Vergleich zur reinen Kostenoptimierung zeigt die multi-kriterielle Optimierung von Kosten und Umweltwirkungen, dass

- Lithium-Ionen-Batterien stärker ausgebaut werden,
- in mehr BHKW-Leistung investiert wird,
- Biomethan genutzt wird.

Auf der Technologieebene lassen sich folgende generelle Aussagen für ein System treffen, bei dem sowohl Gesamtkosten als auch Umweltwirkungen berücksichtigt werden:

- Es wird tendenziell wenig Netzstrom bezogen, was bedeutet, dass die Umweltwirkungen und Systemkosten durch Eigenerzeugung mit regenerativen Energien geringer sind. Völlig autarke Systeme sind jedoch selten, vor allem zu späteren Zeitpunkten, wenn der Strommix mit geringeren Umweltwirkungen verbunden ist.
- Bei ausreichender Verfügbarkeit zeigen Biomethan und Holz Vorteile; vor allem, wenn sie in Blockheizkraftwerken statt in Kesseln eingesetzt werden.
- Der komplette Ersatz von Ölheizungen und der überwiegende Ersatz von Gasheizungen ist nicht nur aus Klimaschutzgründen sinnvoll.
- Abwasser-Wasser-Wärmepumpen und Sole-Wasser-Wärmepumpen erweisen sich als besser als Luft-Wasser-Wärmepumpen.
- Solarthermie ist in der gewählten Konfiguration anderen Technologien unterlegen.
- Wenn Windenergie möglich ist, ist sie gegenüber Aufdach- und Flachdach-Photovoltaikanlagen (PV) überlegen.
- PV-Anlagen auf Freiflächen oder Flachdächern sind vorteilhafter als Aufdachanlagen und
- Lithium-Ionen- besser als Vanadium-Redox-Flow-Batterien.

2.2.5 Diskussion

Die Aussagekraft von Modellergebnissen ist stark von den Eingangsdaten abhängig. Durch die teilweise ins Modell implementierten Tools wie pvgis, windpowerlib, demandlib und oemof thermal können standortspezifische Daten für die Fallbeispiele gut ermittelt werden. Beim Einbezug von Bestandsquartieren zeigte sich, dass die Ermittlung der Daten zu den aktuellen Wärmeerzeugern relativ aufwendig sein kann, wenn nicht wie im vorliegenden Fall bereits Daten für ein Klimakonzept erhoben worden sind. Hier könnte zukünftig von der Bestandsanalyse der kommunalen Wärmeplanung profitiert werden. Andererseits zeigte sich, dass die fossil betriebenen Bestandsanlagen nur zu einem geringen Umfang im multi-kriteriell optimierten System genutzt wurden, was den Aufwand für die Erhebung unverhältnismäßig erscheinen lässt.

Die Kosten und Umweltwirkungen für energetische Sanierungen der Bestandsgebäude blieben für die Optimierung bislang unberücksichtigt. Die Kosten und Materialaufwände für die Sanierung in Verbindung mit den zu erwartenden Änderungen für die Wärmebedarfskurve konnten im Rahmen des Projekts nicht ermittelt werden. Um den abnehmenden Wärmebedarf durch Wärmedämmung über den gesamten Optimierungszeitraum abzubilden, wurde bei den Bestandsquartieren bei den Zeitreihen deshalb ein Faktor verwendet. Hier ist zu berücksichtigen, dass für die Änderung des Lastprofils somit Linearität angenommen wird, was nicht der Realität entspricht. Hier müssten neue Lastprofile erstellt werden. Für das Neubauquartier in Konstanz konnten die Aufwände für den Mehrbedarf an Dämmung ex-post zu den Ergebnis-

sen addiert werden, so dass ein Vergleich zweier Dämmstandards möglich war. Für die Wärmelastprofile konnte für die verschiedenen Dämmstandards auf Daten aus dem Tool nPro zurückgegriffen werden.

In Bezug auf den Ausbau und Einsatz der verschiedenen Energietechnologien zeigte die Anwendung auf die Fallbeispiele plausible Ergebnisse, die aufgrund der eng gefassten Systemgrenze jedoch nicht in allen Fällen absolut realistisch sind. Die Systeme, die einen relativ hohen Anteil an Elektrowärme nutzen, sind solche, die Überschussstrom aus Windenergieanlagen dafür einsetzen. Realistisch wäre, dass der Windstrom in benachbarten Systemen zur Deckung der Stromnachfrage verwendet wird, solange das regenerative Stromangebot noch nicht flächendeckend die Nachfrage decken kann. Hier zeigt sich, dass die Vorteilhaftigkeit des Exports unberücksichtigt bleibt. Dies kann durch eine Leistungsobergrenze für Elektrowärme vermieden werden. BHKWs zeigen sich vorteilhaft, da sie vom Modell sehr flexibel eingesetzt werden können. Bei der Modellierung der Betriebsweise des BHKWs bleiben technische Restriktionen unberücksichtigt, die eine derart flexible Fahrweise verhindern würden. Auch die Umweltwirkungen sind für eine kontinuierlichere Fahrweise modelliert.

Die Minimierung des Treibhauspotenzials bedeutet nicht automatisch Treibhausgasneutralität. Durch die Berücksichtigung der Herstellung der Anlagen unter Verwendung fossiler Energien, kommen einerseits dadurch Treibhausgase ins System. Andererseits kann es sein, dass der Bezug von noch nicht vollständig dekarbonisiertem Netzstrom demgegenüber Vorteile bietet. Erst wenn auch die Anlagen treibhausgasneutral produziert werden, kann insgesamt Treibhausgasneutralität erreicht werden. Dazu müssten entsprechende prospektive Datensätze ins Modell implementiert werden. Das Kostenoptimum zeigt relative Nachteile beim Klimaschutz, aber durch die Fokussierung auf erneuerbare Energien sind auch kostenoptimale Lösungen relativ klimafreundlich, wie der Vergleich mit dem Business-as-usual-Szenario zeigt.

2.2.6 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind plausibel und zeigen eine Bandbreite möglicher Systemkonfigurationen auf. Das Modell bestätigt übergeordnete und aus anderen Modellen bekannte Ergebnisse, was für die Plausibilität der getroffenen Annahmen und der gewählten Modellierung spricht.

Beim Ergebnisvergleich für verschiedene Optimierungsziele fallen die Systemkonfigurationen und auch die Höhe der installierten Leistungen je nach Optimierungsziel bei Verfügbarkeit verschiedener Technologien sehr unterschiedlich aus. Die resultierende Systemkonfiguration bei Minimierung von Kosten ist deutlich anders als bei Minimierung von Treibhauspotenzial. Letzteres ist kostenintensiver, aber internalisiert dafür die Kosten der Klimavorsorge/Vermeidungskosten. 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 multi-kriteriellen Optimierung, in der alle Aspekte Eingang finden, vermieden werden.

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.

Bei der Optimierung für das Fallbeispiel Konstanz trat der sog. Penny Switching Effect auf: bei Optimierung von Kosten bzw. Treibhauspotenzial wurde u.a. Fassaden-PV eingesetzt, wohingegen bei multi-kriterieller Optimierung von Kosten und Umweltwirkungen zusammen auf diese komplett verzichtet wurde. Hier zeigt sich, dass durch kleine Änderungen komplett andere Entscheidungen getroffen werden können.

Die Fallbeispiele unterschieden sich bezüglich der Fragestellungen und Adressaten, Datenverfügbarkeit und –bedarf, Potenziale, Strom- und Wärmebedarfe etc. Es zeigte sich, dass das Modell geeignet ist, um die verschiedenen Fragestellungen in den Fallbeispielen beantworten zu können.

2.3 ABLEITUNG KLIMA- UND UMWELTSCHONENDER ENERGIEVERSORGUNGSKONZEPTE

2.3.1 Durchführung Stakeholder-Dialoge

Für Konstanz wurden Zwischenergebnisse regelmäßig mit Vertreter:innen der Stadt diskutiert, wo das Thema auf großes Interesse stieß. Darüber hinaus gab es einen Austausch mit dem Planungsbüro, das eine Machbarkeitsstudie für das Quartier durchführt. Die Machbarkeitsstudie, in der die Erkenntnisse des Projekts berücksichtigt werden, wird in den Stakeholder-Dialog gehen. Da sich das betrachtete Quartier in der frühen Planungsphase befand, war es aus Sicht der Stadt Konstanz während der Projektlaufzeit zu früh für einen Stakeholderdialog während der Projektlaufzeit. Aus diesem Grund wurde das Konzept auf der Homepage der Stadt veröffentlicht mit der Möglichkeit der Kommentierung: <https://www.konstanz.de/stadt+gestalten/bauen+wohnen/stadtplanung/doebele/klimaschutz+und+energie>.

In Wiernsheim wurden die Ergebnisse in einem Stakeholderdialog etwa 40 interessierten Bürger:innen, dem Bürgermeister und weiteren Gemeindevertreter:innen in einer zweistündigen Veranstaltung vor Ort vorgestellt und intensiv diskutiert (Zeitungsartikel dazu im Anhang A 7). Obwohl auch hier das Interesse groß war, wurde klar, dass das Thema Energiesystemmodellierung für Laien schwierig zu fassen ist.

Für Gussenstadt fand die Ergebnispräsentation vor dem Aufsichtsrat der dortigen Bürgerenergiegenossenschaft statt, die die Ergebnisse in ihrer weiteren Planung für die Wärmeversorgung berücksichtigen werden.

Aus dem Abschlussworkshop resultierten die folgenden Hinweise:

- Weitere Indikatoren: Flächeneffizienz(/-flexibilität)
- Transformationspläne von Wärmenetzen gem. kommunaler Wärmeplanung: Tool könnte dahingehend weiterentwickelt werden, Transformationspläne zu erstellen
- Höhere Gewichtung der Wassernutzung
- Wasserstoff: Tool sollte flächendeckend eingesetzt werden, da dadurch unsinnige Planungen aufgrund persönlicher Präferenzen vermieden werden können

2.3.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Für alle Quartiere wird empfohlen, die Systemkonfiguration, die sich aus der multi-kriteriellen Optimierung der Gesamtkosten und Umweltwirkungen ergeben hat, als Grundlage für die weiteren Planungen heranzuziehen. Mit dieser Konfiguration lassen sich Verlagerungen von Umweltwirkungen bei meistens moderaten Kostensteigerungen im Vergleich zur Kostenminimierung vermeiden.

Vor dem Hintergrund der geschilderten Unsicherheiten werden allerdings keine Detailempfehlungen gegeben, sondern aus der Gesamtschau der Ergebnisse Hinweise für die weitere Planung abgeleitet. Die abgeleiteten Energiekonzepte verstehen 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. für die Bestandsquartiere keine Empfehlungen in Bezug auf einen Heizungstausch für Einzelgebäude gegeben werden.

Quartier Konstanz

Für das hier untersuchte Quartier wird empfohlen, in Bezug auf die stromseitigen Anlagen Flachdach-Photovoltaik-Anlagen mit einem Lithium-Ionen-Speicher kombiniert zu errichten. Der Speicher sollte über die Zeit weiter ausgebaut werden.

In Bezug auf den Wärmestandard ist es aus Kostensicht kaum relevant, ob nach EH40 oder EH55 gedämmt wird, da die Mehrkosten des Energiesystems über 20 Jahre bei EH40 auf Basis der hier gemachten Annahmen nur etwa 2 % betragen, was im Bereich der Unsicherheiten insgesamt liegt. Beim EH40-Standard muss insgesamt weniger Leistung zur Wärmezeugung installiert werden, die Art der Erzeuger sind jedoch bei beiden Standards die gleichen.

Den größten Anteil zur Raumwärmeerzeugung sollten Sole-Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit Erdwärmesonden übernehmen. Eine Abwasser-Wasser-Wärmepumpe wird zusätzlich installiert. Zu einem geringen Teil werden Raumwärme und Trinkwarmwasser auch mit Luft-Wasser-Wärmepumpen erzeugt. Zur Trinkwarmwassererzeugung wird zu einem größeren Teil mit Biomethan-Kessel und Elektrowärme gearbeitet. Falls Biomethan perspektivisch nicht zur Verfügung steht, sollte die Sole-Wasser-Wärmepumpe entsprechend größer dimensioniert werden. Das gleiche gilt, falls das Abwasser nicht für die Wärmezeugung herangezogen werden kann. Für Heizwasser sollten größere Speicher als für Trinkwarmwasser installiert werden.

Quartier Wiernsheim

Für Wiernsheim wird empfohlen, im Bereich Stromerzeugung Windkraftanlagen, Freiflächen-Photovoltaik und Lithium-Ionen-Batterien bevorzugt zu betrachten. 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 Wärmezeugung 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 zur berücksichtigen. Für ein kosten- und umweltoptimales System sollten die bestehenden Ölheizungen möglichst schnell und die Gasheizungen perspektivisch durch die genannten Technologien ersetzt werden.

Quartier Gerstetten

Zur Wärmeeinspeisung bei Erweiterung des Wärmenetzes im Quartier Gerstetten (Gussenstadt) wird empfohlen zu prüfen, ob statt eines Hackschnitzel-Kessels auch ein Blockheizkraftwerk möglich wäre. Auf jeden Fall stellen Hackschnitzel und Wärmepumpe eine gute Kombination dar, wobei die begrenzte Verfügbarkeit der Hackschnitzel berücksichtigt werden sollte.

Da die Abwasser-Wasserwärmepumpe der Luft-Wasserwärmepumpe unter den getroffenen Annahmen überlegen ist, sollte deren tatsächliches Potenzial und Möglichkeiten zur Einbindung in das Wärmenetz genauer geprüft werden.

Da der Strombedarf für die Wärmeerzeugung in jedem Fall steigt, sollte die Windenergie weiter ausgebaut werden. Auch der weitere Ausbau der Wärmespeicherung erscheint sinnvoll, wobei weitere Wärmespeichertechnologien noch detaillierter untersucht werden sollten.

2.3.3 Diskussion

Die drei Fallbeispiele haben gezeigt, wie vielfältig die Ergebnisse sind. Je Optimierungsziel erhält man die installierten Leistungen, erzeugte Energie (pro Jahr und stündlich), Kosten und Umweltwirkungen. Die beiden letztgenannten lassen sich noch nach Investition und Betrieb und für jede Technologie aufteilen. Aus diesem Grund ist einerseits die Analyse der Ergebnisse teilweise aufwendig – vor allem um die Gründe für vom Modell getroffene Entscheidungen nachvollziehen zu können. Andererseits ist auch die Präsentation der Ergebnisse herausfordernd. Den Stakeholdern müssen Balkendiagramme mit unterschiedlichen Einheiten, die Unterscheidung zwischen Optimierungsziel und Indikator etc. vermittelt werden. Ergebnisse müssen so aufbereitet werden, dass sie von den Verantwortlichen und den Stakeholdern verstanden werden. Ein Vergleich der verschiedenen Optimierungsergebnisse mit einem Weiter-so-Szenario hat z.B. die Unterschiede beim Treibhauspotenzial der optimierten Systeme relativiert. Da diese fast ausschließlich auf erneuerbaren Energien beruhen, haben diese alle vergleichsweise geringe Treibhausgasemissionen.

In der Kommunikation mit Stakeholdern werden u.a. Kennzahlen wie Gestehungskosten nachgefragt. Da das Modell aber die Kostenbetrachtung nicht aus Akteurssicht vornimmt, können diese Kennzahlen nicht ermittelt werden. Für eine strategische Planung sind die Gestehungskosten jedoch nachrangig.

Die Diskussion der Ergebnisse mit Energieplaner:innen führte zu der Frage, ob das Modell auch für Einzelgebäude anwendbar sei. Prinzipiell ist das möglich, allerdings geht es bei Einzelgebäuden meistens um eine Detailplanung und weniger um strategische Planung. Für eine Detailplanung ist die Abbildung der Technologien jedoch zu grob und für Einzelgebäude ist eine strategische Planung meistens weniger relevant.

2.3.4 Bewertung der Ergebnisse

Für alle drei Fallbeispiele konnten schlüssige Energiekonzepte abgeleitet und in konkreten Planungen verwendet werden. Darüber hinaus war ein Variantenvergleich und/oder ein Vergleich für unterschiedliche Zielgrößen entscheidungsunterstützend, indem die Auswirkungen unterschiedlicher Entscheidungen sichtbar gemacht wurden. Vor allem der Vergleich mit einem Weiter-so-Szenario half bei der Entscheidung in Richtung erneuerbarer Energietechnologien.

2.4 MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG

Die folgende Tabelle zeigt Beiträge zu Konferenzen, durchgeführte Web-Seminare, Workshops, Veröffentlichungen in Form von Postern, Newsletter-Beiträgen, Webseiten und Zeitschriftenbeiträgen.

Tabelle 6 Liste der Maßnahmen zur Verbreitung

Maßnahme		Stand
Konferenzbeitrag	Operations Research 2022, Karlsruhe	Durchgeführt am 07.09.2022
Konferenzbeitrag	Oemof Forum, Stuttgart	Durchgeführt am 24.05.2023
Konferenzbeitrag	1. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung	Durchgeführt am 09.06.2023
Konferenzbeitrag	IAEE 2023, Mailand	Durchgeführt am 26.07.2023
Konferenzbeitrag	Operations Research 2023, Hamburg	Durchgeführt am 01.09.2023
Konferenzbeitrag	Life Cycle Management 2024, Turin	Geplant am 19-21.06.2024
Vortrag	Beiratssitzungen, Gemeindegtag BW, Stadtwerke PF, Bosch	Durchgeführt 2022-2024
Web-Seminar	Herbstforum Zukunft Altbau: Ressourceneffizienz	Durchgeführt am 31.03.2022
Web-Seminar	GIH: Vergleich Dämmstandards EH40 und EH55	Durchgeführt am 22.02.2023
Web-Seminar	GIH: Schritt-für-Schritt-Demonstration Tool LAEND	Durchgeführt am 27.03.2024
Workshop	1. Symposium Forschungsnetzwerke Energie	Durchgeführt am 13.06.2023
Workshop	Abschlusspräsentation Projektergebnisse	Durchgeführt am 13.03.,2024
Poster	Symposium Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz, Pforzheim	Durchgeführt am 08.12.2022
Poster	Forschungsnetzwerke Energie: Symposium Kommunale Wärmeplanung	Durchgeführt am 17./18.04.24
Newsletter-Beitrag	GIH: Ankündigung Projekt	Durchgeführt 11/2021
Newsletter-Beitrag	GIH: Ankündigung Tool LAEND	Durchgeführt 05/2022
Newsletter-Beitrag	GIH: Projektergebnisse	Durchgeführt 15.04.2024
Webseite	https://github.com/inecmod/LAEND (Programmcode)	Durchgeführt 04/2022
Webseite	https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec/sonstiges/laend	Durchgeführt 04/2022
Webseite	https://www.konstanz.de/stadt+gestalten/bauen+wohnen/stadtplanung/doebele klimaschutz+und+energie (Veröffentlichung Konzept und Kontaktdaten für Feedback)	Durchgeführt 05/2024
Webseite	https://www.wiernsheim.de/wirtschaft-leben/arbeitskreise-1/arbeitskreis-energie (Veröffentlichung Konzept)	In Umsetzung
Zeitschriftenbeitrag	Die Gemeinde	In Umsetzung
Zeitschriftenbeitrag	Procedia CIRP [37]	veröffentlicht
Zeitschriftenbeitrag	Energie Kompakt	In Umsetzung 06/2024
Zeitschriftenbeitrag	Fokus: Life Cycle Assessment	In Planung
Zeitschriftenbeitrag	Fokus: Energiesystemmodellierung	In Planung

Insbesondere durch die Web-Seminare des GIH konnte die Zielgruppe der Energieberater und Energieplaner erreicht werden. An der Veranstaltung zum Vergleich der Dämmstandards nahmen knapp 200 Interessierte teil, bei der Modellvorstellung waren etwa 50 Interessierte anwesend.

3 FAZIT

Die Berücksichtigung der Kosten und Umweltwirkungskategorien in der Zielfunktion hat zu Energiesystemen geführt, die über alle Kriterien hinweg ausgewogen sind. Dadurch konnten beispielsweise Belastungsspitzen in der Kategorie Mineralien und Metalle vermieden werden, die häufig beim Umbau zu treibhausgasneutralen Energiesystemen entstehen. Solche Lastenverlagerungen bei Einzeloptimierungen können mit dem entwickelten Ansatz quantifiziert werden. Ebenso zeigen die Ergebnisse verschiedener Optimierungsziele die Bandbreite möglicher Systemkonfigurationen einschließlich ihrer Auswirkungen. Die Kostenoptimierung zeigte im Vergleich zu Treibhauspotenzialoptimierung ein deutlich höheres Treibhauspotenzial. Da aber die kostenoptimalen Lösungen auch auf erneuerbare Energien setzen, fällt die absolute Steigerung nicht so hoch aus. Die Treibhauspotenzialoptimierung geht meistens mit höheren installierten Leistungen einher, was zu mehr Kosten und Gesamtumweltbelastungen führt. Dies zeigt, dass der Einbezug der Umweltbelastungen durch Produktion und Bau von Anlagen nicht vernachlässigt werden sollte. Multi-kriterielle Optimierung zeigt eine Kompromisslösung auf, die eine Lastenverlagerung von einer Auswirkung zur anderen verringert.

Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer umfassenden Bewertung verschiedener Energiequellen und -technologien sowie deren Wechselwirkungen im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung. Gerade in Bezug auf den Einbezug von Umweltwirkungen ist die Entscheidungsfindung auf Basis von Einzel-LCA auf Technologieebene mühsamer im Vergleich zur multi-kriteriellen Optimierung, da diese gleich die beste Kombination der Technologien unter Berücksichtigung der Standortbedingungen liefert.

Das Planungsmodell LAEND unterstützt die multi-kriterielle Entscheidungsfindung insbesondere für kommunale Entscheidungsträger:innen, indem es die Kriterien Ökonomie und Ökologie integriert berücksichtigt. Die Fallbeispiele zeigten die Anwendbarkeit für verschiedene Fragestellungen in diesem Kontext. Eine mögliche Anwendung des Modells liegt in der Szenarientwicklung bei der kommunalen Wärmeplanung und der anschließenden Quartiersplanung.

Generell müsste dafür die energetische Gebäudesanierung noch detaillierter modelliert werden, um Aussagen treffen zu können, welche Sanierungstiefe optimal wäre. Hierfür müsste der Zusammenhang zwischen Dämmmaterialien und Wärmebedarfsreduktion im Modell implementiert werden. Weiterentwicklungen im Wärmesektor wären notwendig, um das Portfolio möglicher Technologien zu erweitern. Insgesamt würden aktuellere und technologisch stärker differenzierte Ökobilanzdaten die Modellergebnisse verbessern. Die Aktualisierung der Environmental Footprint-Methode von Version 2 auf Version 3 würde zwar die grundsätzlichen Ergebnisse voraussichtlich nicht ändern, würde jedoch das Modell weiter an den Stand der Forschung anpassen.

Obwohl dies nur für ein Fallbeispiel quantifiziert wurde, zeigt sich, dass eine alleinige Fokussierung auf die Wärmeversorgung zu höheren Gesamtsystemkosten führt, weshalb die Betrachtung und Planung sektorgekoppelter Systeme sinnvoll ist. Strom- und Wärmespeicher bieten hierbei wichtige Flexibilitätsoptionen. Allerdings sollte deren Abbildung im Modell sowohl in Bezug auf die Modellierung der Technologien als auch im Hinblick auf die Ökobilanzdaten verbessert werden, um auch die Aussagekraft der Modellergebnisse zu verbessern. Darüber hinaus besteht auch in anderen Bereichen ein Bedarf an konsistenter erhobenen Ökobilanzdaten, die technologisch differenzierter sind und eine größere Bandbreite an Technologien umfassen.

Trotz Verbesserungen bei der Nutzerfreundlichkeit (Konfiguration des Modells und Ergebnisausgabe in Excel) ist das Planungsmodell immer noch ein Expertentool. Eine einfachere Installation und eine Nutzeroberfläche würden die Nutzerfreundlichkeit weiter verbessern. Allerdings bleibt das grundsätzliche Problem, dass Umwelt- und Energieplanung eine Aufgabe für Expert:innen ist.

Obwohl die Ergebnisse nicht explizit auf Robustheit geprüft wurden, kann durch den Vergleich der Ergebnisse für die verschiedenen Optimierungsziele, die ohne Mehraufwand generiert werden können, der Einfluss der Kriterien Kosten, Klima- und Umweltwirkungen deutlich gemacht werden. Dies geht in Richtung der Methode „Modelling to Generate Alternatives“ (MAG), welche zum Auffinden der stabilen Lösung angewendet wird. Diese Methode sowie eine systematische Robustheitsanalyse könnten Gegenstand weiterer Forschung sein.

4 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AZAPAGIC, Adisa; STAMFORD, Laurence; YOUNDS, Lorraine; BARTECZKO-HIBBERT, Christian: *Towards sustainable production and consumption : A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs)*. In: *Computers & Chemical Engineering* 91 (2016), S. 93–103
- [2] RAUNER, Sebastian; BUDZINSKI, Maik: *Holistic energy system modeling combining multi-objective optimization and life cycle assessment*. In: *Environmental Research Letters* 12 (2017), Nr. 12, S. 124005
- [3] VANDEPAER, Laurent; PANOS, Evangelos; BAUER, Christian; AMOR, Ben: *Energy System Pathways with Low Environmental Impacts and Limited Costs: Minimizing Climate Change Impacts Produces Environmental Cobenefits and Challenges in Toxicity and Metal Depletion Categories*. In: *Environmental science & technology* 54 (2020), Nr. 8, S. 5081–5092
- [4] ROSELT, Kersten; QUAAS, Ingo; GENSKE, Dieter; KLAWONN, Ulf; MÄNNEL, Linda; REICH, Andreas; RUFF, Ariane; SCHWARZE, Matthias: *'effort' (Energy Efficiency on-site) – A New Method for Planning and Realization of Energy-efficient Neighbourhoods Under the Aspects of Sustainability*. In: *Procedia Engineering* 118 (2015), S. 1288–1295. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815021396>
- [5] SCHÖNBERGER, Philipp; DIETRICH, Carolin; FALKE, Tobias; FISCHER, Malte; HENSEL, Peter; JANSSEN, Selma; ENERGYEFFIZIENZ GMBH; RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN: *EnEff:Stadt - Modellstadt25+/Lampertheim effizient - Innovative Konzepte zur Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen in Mittelstädten*. Gemeinsamer Schlussbericht zum Verbundvorhaben. Lampertheim, 2017
- [6] EGGERS, Jan-Bleicke: *Das kommunale Energiesystemmodell KomMod*. 2018
- [7] ILLING, Bjoern; RUBLACK, Liane: *Optimized energy generation for rural areas*. In: *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2019, S. 1–6
- [8] DORFNER, Johannes: *Open Source Modelling and Optimisation of Energy Infrastructure at Urban Scale*. Technische Universität München. 2016. URL <https://mediatum.ub.tum.de/1285570>
- [9] EICKER, Ursula; COORS, Volker; NOUVEL, Romain; BRASSEL, Kai-Holger; DUMINIL, Eric; BRUSE, Marcel: *SimStadt - Energiesimulation von Stadtquartieren : Schlussbericht*. 2016
- [10] VOLKART, Kathrin; MUTEL, Christopher L.; PANOS, Evangelos: *Integrating life cycle assessment and energy system modelling: Methodology and application to the world energy scenarios*. In: *Sustainable Production and Consumption* 16 (2018), S. 121–133
- [11] HERTWICH, Edgar G.; GIBON, Thomas; BOUMAN, Evert A.; ARVESEN, Anders; SUH, Sangwon; HEATH, Garvin A.; BERGESEN, Joseph D.; RAMIREZ, Andrea; VEGA, Mabel I.; SHI, Lei: *Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (2015), Nr. 20, S. 6277–6282
- [12] TIETZE, Ingela; LAZAR, Lukas; HOTTENROTH, Heidi; LEWERENZ, Steffen: *LAEND: A Model for Multi-Objective Investment Optimisation of Residential Quarters Considering Costs and Environmental Impacts*. In: *Energies* 13 (2020), Nr. 3, S. 614. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/614>

- [13] HILPERT, S.; KALDEMEYER, C.; KRIEN, U.; GÜNTHER, S.; WINGENBACH, C.; PLESSMANN, G.: *The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling*. In: *Energy Strategy Reviews* 22 (2018), S. 16–25. URL <https://arxiv.org/pdf/1808.08070.pdf> – Überprüfungsdatum 2021-10-05
- [14] *openLCA*. Berlin : GreenDelta GmbH, 2023. URL <http://openlca.org>
- [15] EUROPEAN COMMISSION: *European Platform on Life Cycle Assessment : EF reference package 2.0 (pilot phase)*. URL https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/EF_2.0_Complete.zip. – Aktualisierungsdatum: March 12th 2019 – Überprüfungsdatum 2021-06-07
- [16] SALA, Serenella; CERUTTI, Alessandro; PANT, Rana: *Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*. Luxembourg, 2018 (EUR 28562)
- [17] PEHNT, Martin; ET AL.: *Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien – Begleitende Analysen zur Ausgestaltung der Regelung aus dem Koalitionsvertrag 2021 : Teilbericht im Rahmen des Projektes „Gebäudeenergiegesetz und EPBD“*. 03.03.2023
- [18] BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V.: *BDEW-Strompreisanalyse Juli 2023*. URL www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse. – Aktualisierungsdatum: 07/2023 – Überprüfungsdatum 2023-09-10
- [19] DEUTSCHER BUNDESTAG (Hrsg.): *Transparenz über die Fragen der FDP und die Antworten der Bundesregierung zum Gebäudeenergiegesetz : Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU*. 16.06.2023 (Drucksache 20/7290)
- [20] BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V.: *BDEW-Gaspreisanalyse vom Juli 2023*. URL <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-gaspreisanalyse/>. – Aktualisierungsdatum: 07/2023 – Überprüfungsdatum 2023-09-10
- [21] STATISTA: *Durchschnittlicher Preis für leichtes Heizöl in Deutschland in den Monaten Juli 2010 bis August 2023*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1692/umfrage/preis-fuer-einen-liter-leichtes-heizoel-monatsdurchschnittswerte/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-09-10 – Überprüfungsdatum 2023-09-10
- [22] C.A.R.M.E.N. E.V.: *Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln*. URL <https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Hackschnitzelpreise-Jahresmittelwerte-MWh.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 12.2022 – Überprüfungsdatum 2023-09-10
- [23] SIMON LESCHE: *Scheitholzpreise*. URL https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biogene-festbrennstoffe/dateien/mb_scheitholzpreise.pdf. – Aktualisierungsdatum: Juli 2022 – Überprüfungsdatum 2023-01-31
- [24] DEUTSCHE WINDGUARD GMBH (Hrsg.): *Kurzfristanalyse zur Kostensituation der Windenergie an Land*. 2022
- [25] GREENHOUSE MEDIA GMBH: *Alle Kosten von Blockheizkraftwerken im Überblick*. URL <https://www.energie-experten.org/heizung/blockheizkraftwerk-bhkw/blockheizkraftwerk-kosten>. – Aktualisierungsdatum: 2021-06-12 – Überprüfungsdatum 2023-09-10
- [26] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME (Hrsg.): *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Freiburg, 2021
- [27] KEA-BW: *Tabellen zum Technikkatalog*. URL https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Waermewende/Wissensportal/Technikkatalog_Tabellen_v1.zip. – Aktualisierungsdatum: 2022 – Überprüfungsdatum 2023-02-08
- [28] BOSCH THERMOTECHNIK GMBH: *Kosten von Erdwärmepumpen in der Übersicht*. URL <https://www.bosch-homecomfort.com/de/de/wohngebaeude/wissen/heizungsratgeber/waermepumpe/erdwaermepumpe-kosten/> – Überprüfungsdatum 2024-04-23

- [29] BIESALSKI, Mark: *Wärmetauscher im Kanal - Möglichkeiten, Kosten und Nutzen* (IKT-Forum "Klima, Energie und Kanalisation 2012"). Gelsenkirchen, 31.01.2012. URL <https://www.ikt.de/website/klima2012/biesalski.pdf> – Überprüfungsdatum 2024-04-23
- [30] HAMBURG INSTITUT RESEARCH (Hrsg.): *Förder- und Finanzierungsleitfaden für Freiflächen-Solarthermie-Anlagen mit Wärmespeicher und Anbindung an Wärmenetze*. 2016
- [31] WERNET, Gregor; BAUER, Christian; STEUBING, Bernhard; REINHARD, Jürgen; MORENO-RUIZ, Emilia; WEIDEMA, Bo: *Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology*. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (2016), Nr. 9, S. 1218–1230
- [32] SCHREIBER, Andrea; MARX, Josefine; ZAPP, Petra: *Comparative life cycle assessment of electricity generation by different wind turbine types*. In: *Journal of Cleaner Production* 233 (2019), S. 561–572. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619320116>
- [33] KNAUSENBERGER, Kai: *Erarbeitung der Datengrundlage zur Einbindung von Kleinwindenergieanlagen in ökobilanzbasierte Energiesystemmodelle*. Pforzheim, Hochschule Pforzheim. Thesis zur Erlangung des akademischen Grades eines Master of Science. 2022. URL https://opus-hspf.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/165/file/Knausenberger_2022_Master-Thesis.pdf – Überprüfungsdatum 2024-04-23
- [34] FRISCHKNECHT, Rolf; STOLZ, Philippe; KREBS, L.; WILD-SCHOLTEN, M. J. de; SINHA, P.: *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. 2020 (Report IEA-PVPS T12-19:2020)
- [35] NAEGLER, T.; BUCHGEISTER, J.; HOTTENROTH, H.; SIMON, S.; TIETZE, I.; VIERE, T.; JUNNE, T.: *Life cycle-based environmental impacts of energy system transformation strategies for Germany: Are climate and environmental protection conflicting goals?* In: *Energy Reports* 8 (2022), S. 4763–4775
- [36] REPENNING, Julia; EMELE, Lukas; BLANCK, Ruth; BÖTTCHER, Hannes; DEHOUST, Günter; FÖRSTER, Hannah; GREINER, Benjamin; HARTHAN, Ralph; HENNEBERG, Klaus; HERMANN, Hauke; JÖRß, Wolfram; LORECK, Charlotte; LUDIG, Sylvie; MATTHES, Felix C.; SCHEFFLER, Margarethe; SCHUMACHER, Katja; WIEGMANN, Kirsten; ZELL-ZIEGLER, Carina; BRAUNGARDT, Sibylle; EICHHAMMER, Wolfgang; ELSLAND, Rainer; FLEITER, Tobias; HARTWIG, Johannes; KOCKAT, Judit; PFLUGER, Benjamin; SCHADE, Wolfgang; SCHLOMANN, Barbara; SENFUß, Frank; ZIESING, Hans-Joachim: *Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015
- [37] HOTTENROTH, Heidi; VIERE, Tobias: *Comparative life cycle assessment of photovoltaic systems: An evaluation of environmental impacts over time*. In: *Procedia CIRP* 122 (2024), S. 79–84. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827124000246>

ANHANG

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung A 1	Lastprofil Warmwasser und Raumwärme für EH55-Standard für Konstanz.	49
Abbildung A 2	Lastprofil Warmwasser und Raumwärme für EH40-Standard für Konstanz.	49
Abbildung A 3	Lastprofil Strom Konstanz	50
Abbildung A 4	Lastprofile E-Mobilität	51
Abbildung A 5	Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele	53
Abbildung A 6	Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH55 (PV = Photovoltaik)	54
Abbildung A 7	Investitionskosten über 20 Jahre für EH55-Dämmstandard	54
Abbildung A 8	Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für EH55-Standard	55
Abbildung A 9	Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele für Strom und Wärme	55
Abbildung A 10	Lastprofil Strom für Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung Wiernsheim	57
Abbildung A 11	Lastprofile E-Mobilität Wiernsheim	57
Abbildung A 12	Wärmebedarfsermittlung mit Tool hotmaps für Wiernsheim	59
Abbildung A 13	Lastprofil Wärme Wiernsheim	59
Abbildung A 14	Windpotenzialflächen rund um Wiernsheim lt. Energieatlas Baden-Württemberg	61
Abbildung A 15	Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele für Wiernsheim	63
Abbildung A 16	Wärmebedarfsermittlung über hotmaps für Teilgebiet Gussenstadt	64
Abbildung A 17	Lastprofil Wärme Gerstetten	65
Abbildung A 18	Lastprofil Strom Gerstetten	65
Abbildung A 19	Lastprofil E-Mobilität 2023 Gerstetten	66
Abbildung A 20	Ermittlung Holzpotenzial mit hotmaps	67
Abbildung A 21	Strombilanz für das Szenario mit allen Optionen (20 Jahre)	69
Abbildung A 22	Wärmebilanz für das Szenario mit allen Optionen (20 Jahre)	69
Abbildung A 23	Strombilanz für das Szenario mit Luft-Wärmepumpe, Kessel und begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit (20 Jahre)	70
Abbildung A 24	Wärmebilanz für das Szenario mit Luft-Wärmepumpe, Kessel und begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit (20 Jahre)	70

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle A 1	Spezifische Wärmebedarfe für verschiedene Wärmedämmstandards	48
Tabelle A 2	Spezifische und absolute jährliche Wärmebedarfe nach Nutzung	48
Tabelle A 3	Spezifische und absolute jährliche Strombedarfe nach Nutzung	49
Tabelle A 4	Absolute jährliche Strombedarfe für Elektromobilität nach Nutzung (für Gewerbe mit nPro-Tool ermittelt)	50
Tabelle A 5	Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042	50
Tabelle A 6	Leistungszahlen und Wirkungsgrade pro Technologie	52
Tabelle A 7	Parameter für die Modellierung der Speicher	52

Tabelle A 8	Absolute jährliche Strombedarfe für Teilort Wiernsheim nach Verbrauchsart 2020 [Quelle: Netze BW] und Zuordnung zu Profilen zur Generierung von Lastprofilen.....	56
Tabelle A 9	Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042	57
Tabelle A 10	Wärmebedarfe für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) im Teilort Wiernsheim bis 2006.....	58
Tabelle A 11	Wärmebedarfe für Einfamilienhäuser (EFH) im Teilort Wiernsheim	58
Tabelle A 12	Wärmebedarfsermittlung für Gewerbe, Handel, Dienstleistung im Teilort Wiernsheim	59
Tabelle A 13	Bestands-PV-Anlagen im Teilort Wiernsheim nach Marktstammdatenregister (Stand 01/2023).....	60
Tabelle A 14	Wärmeerzeugende Bestandsanlagen in Wohnhäusern im Teilort Wiernsheim nach Energie- und CO ₂ -Bilanz Wiernsheim	60
Tabelle A 15	Leistungszahlen Wärmepumpen.....	62
Tabelle A 16	Wirkungsgrade pro Technologie	62
Tabelle A 17	Annahmen für Photovoltaik-Anlagen.....	62
Tabelle A 18	Ermittlung des Wärmebedarfs mit Kennwerten aus hotmaps und nPro.....	64
Tabelle A 19	Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042	66
Tabelle A 20	Bestands-PV-Anlagen im Teilort Gussenstadt nach Marktstammdatenregister	66
Tabelle A 21	Leistungszahlen und Wirkungsgrade pro Technologie.....	68
Tabelle A 22	Annahmen für Photovoltaik-Anlagen.....	68

A 1 NORMIERUNGSWERTE

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

A 2 PROJEKTBEIRAT

Frick	Stephanie	RBS wave
Gómez Mejía	Adriana	Fichtner GmbH & Co. KG
Jansen	Frank	VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Dr. Kienzlen	Volker	KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg
Lehr	Nelly	Tilia GmbH
Renner	Gisela	innovative Energieberatung
Dr. Schäffler	Harald	Schäffler Sinnogy
Schwertel	Benedikt	GIH Bundesverband e.V.
Jelinek	Stefanie	AutenSys GmbH
Finkbeiner	Severin	EnBW Energie Baden-Württemberg AG

A 3 LCA DATEN

CATEGORY	Process	original	original but per capacity unit	w/o infrastructure	geographical scope adjusted	other content adjustments	Generated within the project	based on literature
Commodity sources								
	biomethane, low pressure RER MJ - RER				+			
	market for cleft timber, measured as dry mass, commodity_DE kg				+	+		
	Marketforelectricity_2022_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2023_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2024_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2025_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2026_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2027_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2028_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2029_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2030_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2031_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2032_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2033_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2034_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2035_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2036_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2037_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2038_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2039_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2040_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2041_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2042_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2043_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2044_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2045_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2046_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2047_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2048_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2049_Naegler_Sc6							
	Marketforelectricity_2050_Naegler_Sc6							
	market for biomethane, high pressure m3 - RER				+			
	market for natural gas, low pressure, commodity_RER_m3				+			
	market for light fuel oil kg	+						
	market for wood chips, measured as dry mass_commodity_kg - DE				+	+		
	market for wood pellet, measured as dry mass, commodity_kg	+						
OPERATION, ELECTRICITY								
CHP	electricity, CHP, biomethane, low pressure burned in micro gas turbine 345 kW, 100kWe, variable/kWh - CH				+			
	electricity, CHP, biomethane, low pressure burned in polymer electrolyte membrane fuel cell 2kWe, future, variable/kWh - CH				+			
	electricity, CHP, biomethane, low pressure burned in solid oxide fuel cell 266 kW, 125kWe, future, variable/kWh - CH				+			
	electricity, CHP, biomethane, low pressure burned in solid oxide fuel cell, with micro gas turbine, 327 kW, 180kWe, future, variable/kWh - CH				+			
	electricity, CHP, natural gas, burned in micro gas turbine, 345 kW, 100kWe, variable/kWh - CH				+			
	electricity, CHP, wood chips, 2000 kW, 1200 kWth, 530 kWel, variable - CH					+		
	electricity, CHP, wood chips, 2000 kW, state-of-the-art 2014, variable/kWh - CH				+			
	electricity, CHP, wood chips, wet, 6667 kW, state-of-the-art 2014, variable/kWh - DE				+			
OPERATION, HEAT								
CHP	heat, central or small-scale, CHP, biomethane, low pressure burned in micro gas turbine, 345 kW, 100kWe, variable MJ - CH				+			
	heat, central or small-scale, CHP, biomethane, low pressure burned in polymer electrolyte membrane fuel cell 2kWe, future, variable/MJ - CH				+			
	heat, central or small-scale, CHP, biomethane, low pressure burned in solid oxide fuel cell, 266 kW, 125kWe, future, variable/MJ - CH				+			

CATEGORY	Process		original	original but per capacity unit	w/o infrastructure	geographical scope adjusted	other content adjustments	Generated within the project based on literature
Commodity sources								
		heat, central or small-scale, CHP, biomethane, low pressure burned in solid oxide fuel cell, with micro gas turbine, 327 kW, 180kWe, future, variable/MJ – CH			+			
		heat, central or small-scale, CHP, natural gas, low pressure, burned in micro gas turbine, 345 kW, 100kWe - variable/MJ – CH					+	
		heat, district or industrial, CHP, wood chips, 2000 kW, 1200 kWth, 530 kWel, variable – CH			+			
		heat, district or industrial, CHP, wood chips, 2000 kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – CH			+			
		heat, district or industrial, CHP, wood chips, wet, 6667 kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
Furnace/boiler		heat, central or small scale, light fuel oil, at boiler 100kW condensing, non-modulating, variable_MJ – DE			+			
		heat, central or small scale, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating, variable_MJ – DE			+			
		heat, central or small-scale, biomethane, at boiler condensing modulating <100kW, variable_MJ – DE			+			
		heat, central or small-scale, mixed logs, at furnace 30kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, central or small-scale, natural gas, at boiler condensing modulating max 100kW, variable_MJ – DE			+			
		heat, central or small-scale, wood pellet, at furnace 25kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, central or small-scale, wood pellet, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, central or small-scale, wood pellet, at furnace 9kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, district or industrial, hardwood chips from forest, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, district or industrial, softwood chips from forest, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, district or industrial, wood chips from industry, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014, variable/MJ – DE			+			
		heat, district or industrial, wood chips, at furnace 300kWth, state-of-the-art 2014, variable_MJ			+			
Heat pump		heat, central or small-scale, air-water heat pump 10kW, variable/MJ – Europe without Switzerland			+			
		heat, central or small-scale, brine-water heat pump 10kW, variable_MJ – Europe without Switzerland			+			
INVESTMENT								
CHP		construction, CHP, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014, investment/kW – DE		+				
		construction, CHP, micro gas turbine, 345 kW, 160 kWth, 100kWe, investment kW - RER				+		
		construction, CHP, wood chips, 2000 kW, investment kW – RER				+		
		construction, CHP, solid oxide fuel cell 266 kW, 125kWe, future, investment kW – RER				+		
		construction, CHP, fuel cell, polymer electrolyte membrane, 6.25kW, 2kWe, 3.44 kWth, future, investment kW - RER				+		
		construction, CHP, fuel cell, solid oxide, with micro gas turbine, 327kW, 180kWe, 92kWth, future, investment kW - RER				+		
Heat		production, auxiliary heating unit, electric, 5kW, investment kW – RER				+		
		production, brine-water heat pump 10kW, investment kW – RER				+		
		production, furnace, logs, 30kW, investment kW – RER				+		
		production, furnace, pellets, 25kW, investment kW – RER				+		
		production, furnace, wood chips, with silo, 1000kW, investment kW – RER				+		
		production, furnace, wood chips, with silo, 300kW, investment kW – RER				+		
		production, furnace, wood pellet, 300kW, investment kW – RER				+		
		production, heat storage, 2000l_unit - RER				+		
		production, solar collector system, Cu flat plate collector, multiple dwelling, for combined system, investment_m2 – RER				+		
		production, solar collector system, Cu flat plate collector, one-family house, for combined system, investment_m2 – RER				+		
		construction, solar collector system, flat plate collector, ground-mounted_m2						+
		construction, solar collector system, tube collector, ground-mounted_m2						+
		construction, borehole heat exchanger, investment_m – DE				+	+	
		production, air-water heat pump 10kW, investment kW – Europe without Switzerland		+				
		production, heat exchanger, wastewater_m2						+

CATEGORY	Process	original	original but per capacity unit	w/o infrastructure	geographical scope adjusted	other content adjustments	Generated within the project based on literature
Commodity sources							
	production, furnace 9kW, state-of-the-art 2014, wood pellet, investment/kW – Europe without Switzerland		+				
Photovoltaics	production, PV, facade installation, 3kWp, cryst_2021_kW - DE						+
	PV, flat-roof installation, 156kWp, cryst_kW - DE						+
	PV, flat-roof installation, 3kWp, cryst_kW – DE						+
	production, PV, flat-roof installation, 156kWp, cryst_2021_kW - DE						+
	PV, slanted-roof installation, 3kWp, CIS_kW – DE						+
	PV, slanted-roof installation, 3kWp, CdTe_kW – DE						+
	production, PV, slanted-roof installation, 3kWp, cryst_2021_kW - DE						+
	construction, photovoltaic plant, 1.3MWp open ground, CdTe_kW						+
	construction, photovoltaic plant, 1.3MWp open ground, cryst-Si_kW						+
	construction, photovoltaic plant, 570kWp open ground, CdTe_kW						+
	construction, photovoltaic plant, 570kWp open ground, cryst-Si_kW						+
Battery	production, stationary battery, LFP-LTO (37.9 Wh per kg), investment_kWh – GLO						+
	production, stationary battery, VRF (19.4 Wh effective per kg), investment_kWh – GLO						+
Wind	construction, wind turbine, 3.2 MW, DDSG, DDPMSG, DFIG, onshore_kW						+
	construction, wind turbine, 6kW, onshore_kW						+
	construction, wind turbine, onshore_kW						+
	construction, wind turbine, 3.2MW, DDPMSG, onshore_kW						+
	construction, wind turbine, 3.3MW, DFIG, onshore_kW						+
	construction, wind turbine, 3MW, DDSG, onshore_kW						+
	wind turbine construction, 3.2 MW (DDPMSG), onshore, w_o maintenance						+
	maintenance, wind turbine, 3.2 MW, (DDPMSG), onshore						+
	market for maintenance, wind turbine, 3.2 MW, DDSG, DDPMSG, DFIG, onshore_unit						+
	credit Marketforelectricity_2033_Naegler_Sc6						+
	storage production, 10'000 l, investment_unit						+

A 4 EINGANGSDATEN UND DETAILERGEBNISSE QUARTIER KONSTANZ

Bedarfe

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

Wärme

Für den Wärmebedarf für den Bereich Wohnen wird von den Annahmen für das Quartier „Am Horn“ ausgegangen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Neubauquartier, welches aktuell geplant wird und für welches ein Energiekonzept bereits vorliegt. Im Energiekonzept⁹ für das genannte Quartier wurden für die Raumwärme keine spezifischen Werte des Wärmebedarfs pro Fläche angegeben. Diese wurden aus den im Konzept genannten Flächen und Wärmebedarfen zurückgerechnet. Dabei ergaben sich folgende Werte:

Tabelle A 1 Spezifische Wärmebedarfe für verschiedene Wärmedämmstandards

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

Für die gewerblichen Flächen werden die Wärmebedarfe über das Online-Tool nPro¹⁰ ermittelt, wobei im Tool nicht nach verschiedenen Dämmstandards unterschieden wird¹¹.

Tabelle A 2 Spezifische und absolute jährliche Wärmebedarfe nach Nutzung

		Wohnen EH55	Wohnen EH40	Büro	Cafe/Bäckerei/ Waschsalon	Restaurant	Kita	Tiefgarage	Summe
Nutzfläche	m ²	15428	15428	552	340	160	225	3000*	
Gebäudetyp nPro		Wohnen	Wohnen	Büro	Supermarkt	Restaurant	Kinder- garten	Park- haus	
Raumwärme	MWh	741	571	38	13	6	8	0	806
	kWh/m ²	48	37	69	38	38	36	0	
Trinkwarm- wasser	MWh	386	386	4	1	8	1	0	400
	kWh/m ²	25	25	7	3	50	4	0	
* Schätzung									

Für die Energiesystemmodellierung werden Zeitreihen in stündlicher Auflösung mittels der o.g. Kennwerte ebenfalls mit dem Online-Tool nPro erstellt.

⁹ Ebök – Gesellschaft mbH (2021): Modellquartier „Am Horn“ Konstanz – Energiekonzept –

¹⁰ www.npro.de

¹¹ Aufgrund der geringen Außenwandflächen im Vergleich zum Bereich Wohnen kann der Mehr- bzw. Minderbedarf an Dämmung hierfür vernachlässigt werden.

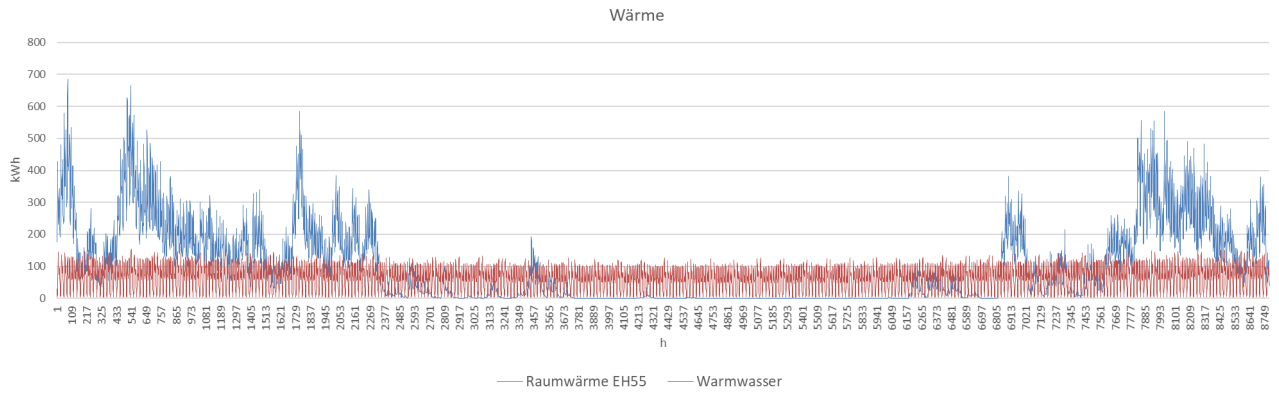


Abbildung A 1 Lastprofil Warmwasser und Raumwärme für EH55-Standard für Konstanz

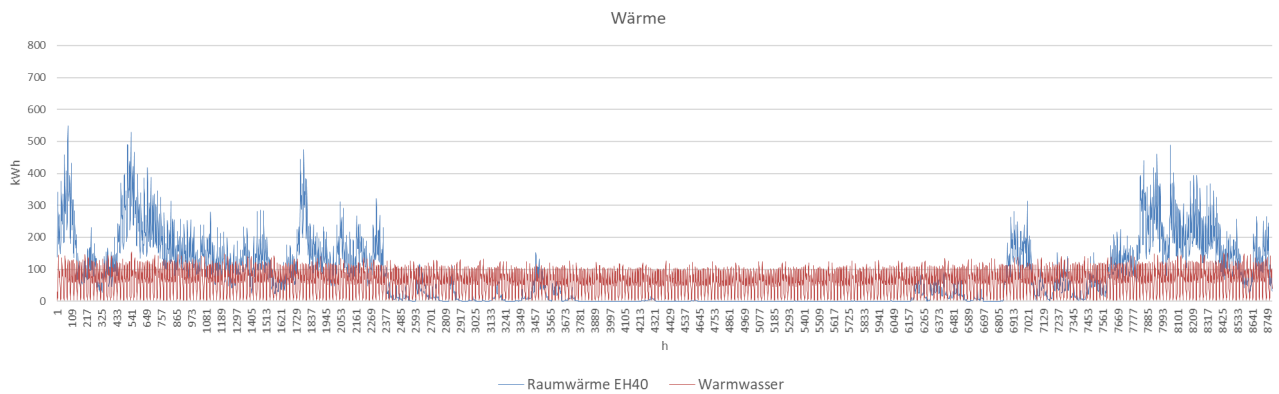


Abbildung A 2 Lastprofil Warmwasser und Raumwärme für EH40-Standard für Konstanz

Strom

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

Tabelle A 3 Spezifische und absolute jährliche Strombedarfe nach Nutzung

		Wohnen	Büro	Cafe/Bä- cke- rei/Wasch- salon	Restau- rant	Kita	Tiefga- rage	Summe
Nutzfläche	m ²	15428	552	340	160	225	3000*	
Gebäudetyp		Wohnen	Büro	Super- markt	Restau- rant	Kinder- garten	Parkhaus	
Nutzer- strom**	MWh/a	410	22	24	20	3	45	524
	kWh/m ²	27	40	71	125	13	15	

* Schätzung
 ** z.B. Beleuchtung, Elektrogeräte; ohne Heizstrom und Ladestrom für E-Mobilität

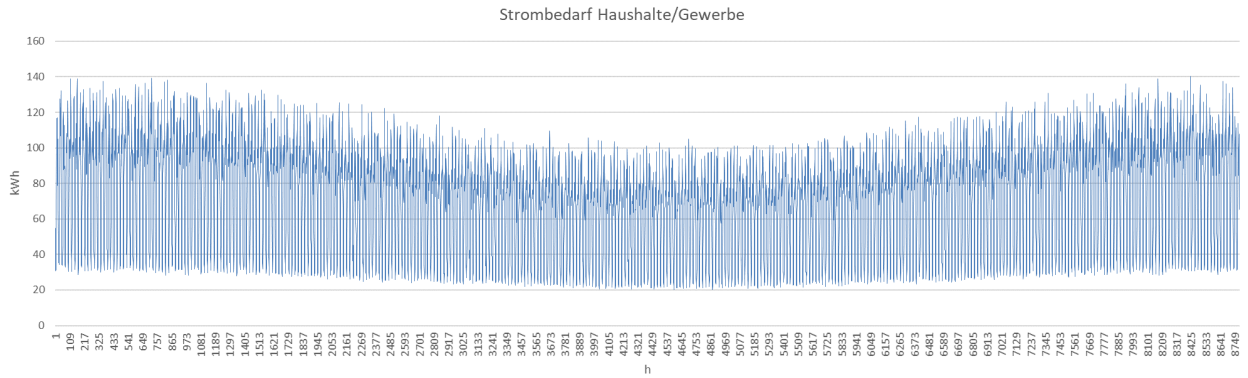


Abbildung A 3 Lastprofil Strom Konstanz

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

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

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

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

		Wohnen	Büro	Cafe/Bä- cke- rei/Wasch- salon	Restaurant	Kita	Summe
Nutzfläche	m ²	15428	552	340	160	225	
Gebäudetyp		Wohnen	Büro	Supermarkt	Restaurant	Kindergar- ten	
Elektromobili- tät	MWh/a	82	6	1	4	1	94

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

Tabelle A 5 Jährliche Strombedarfe für Elektromobilität bis 2042

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

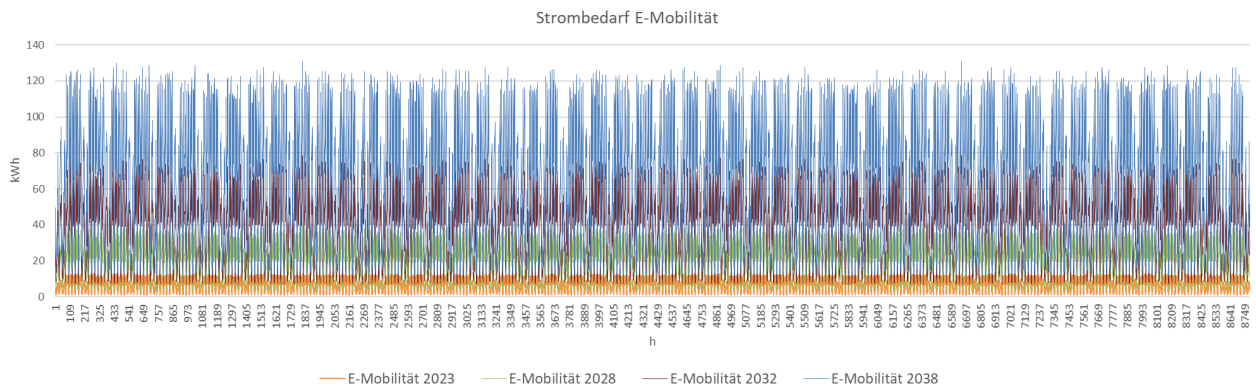


Abbildung A 4 Lastprofile E-Mobilität

Wärmedämmung

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

Potenzielle Erzeugungsanlagen und Speicher

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

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

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

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

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

Technische Parameter

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. enthält eine Übersicht der berücksichtigten Wirkungsgrade und Leistungszahlen der Technologien. Zur Berechnung der Leistungszahlen für die Wärmepumpen muss eine Eingangstemperatur angenommen werden. Für

die Sole wurde eine fixe Temperatur von 9°C und für das Abwasser von 11°C (aufgrund von Messungen am Abwassersammler; untere Temperatur) angenommen.

Tabelle A 6 Leistungszahlen und Wirkungsgrade pro Technologie

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

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

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

Wetterabhängige Daten

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

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

Der temperaturabhängige COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe wird mit oemof.thermal¹² ermittelt. Aus der Zeitreihe ergibt sich eine Jahresarbeitszahl für Warmwasser (55°C, Qualitätsfaktor: 0,4) von 2,65 und für Raumwärme (40°C, Qualitätsfaktor: 0,4) von 4,41.

Kosten EH40 im Detailvergleich

Für das EH40-Energiesystem liegen die größten Gesamtkostenunterschiede zwischen Kostenoptimierung und Optimierung des EU Env. Footprint (26 %). Die Minimierung der Klimawirkungen ist über 20 Jahre betrachtet 20 % teurer als bei minimalen Gesamtkosten. Werden Umweltwirkungen und Kosten multi-kriteriell optimiert, ergeben sich 17 % höhere Gesamtkosten.

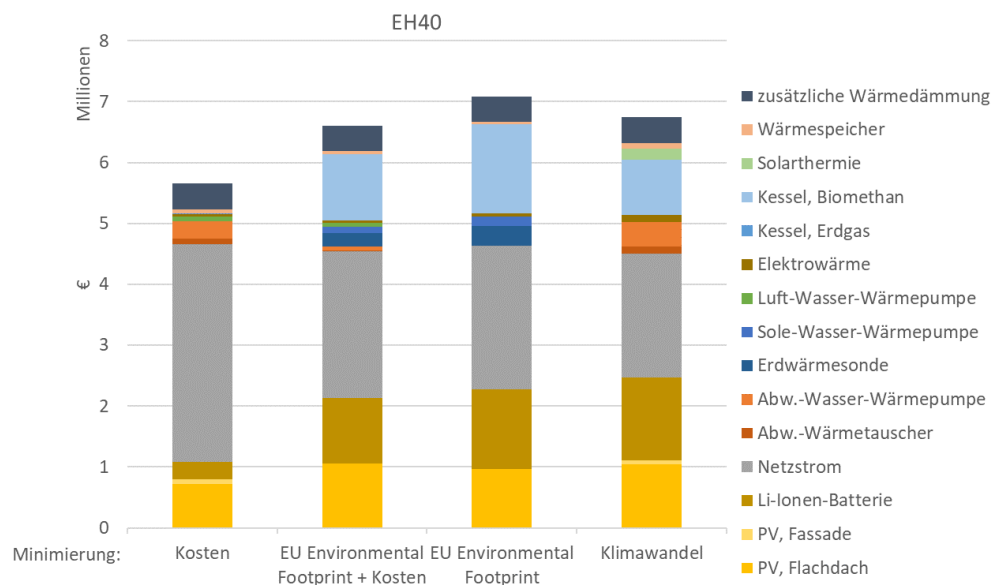


Abbildung A 5 Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele

Bezüglich der Aufteilung der Kosten in Investitionen und variable Kosten zeigt sich, dass die Investitionen bei der Kostenoptimierung deutlich unter denen bei den anderen drei Optimierungszielen liegen. Je mehr der Kostenaspekt in den Optimierungszielen abnimmt und der Klimaaspekt an Bedeutung gewinnt, desto mehr steigen die Investitionen.

Ergebnisse EH55

Im Vergleich der Dämmstandards werden beim EH55 tendenziell höhere Wärmeleistungen installiert als beim EH40-Standard (insg. 14-19 %). Beim Dämmstandard EH55 wird etwas mehr Leistung zur Stromerzeugung gebaut, da für die Wärmeerzeugung zusätzlicher Strom benötigt wird.

¹² jnnr, Caroline Möller, FranziPl, 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

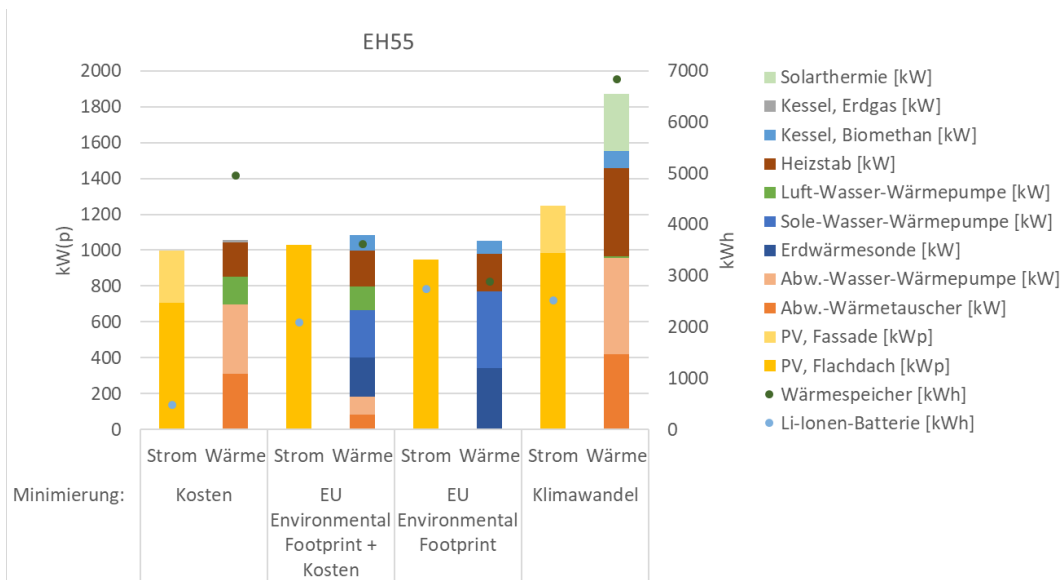


Abbildung A 6 Installierte Leistungen bzw. Speicherkapazitäten für verschiedene Optimierungsziele bei Dämmstandard EH55 (PV = Photovoltaik)

Die Gesamtkosten über 20 Jahre liegen beim Energiesystem mit EH55-Standard bei der Umweltoptimierung deutlich höher als bei der Kostenoptimierung. Wird das Treibhauspotenzial minimiert, ergibt sich eine Kostensteigerung von ca. 20 %. Bei der multi-kriteriellen Optimierung von Umweltwirkungen und Kosten liegt diese nur leicht darunter. Der größte Kostenblock fällt bei allen Optimierungszielen durch den Netzstrombezug an.

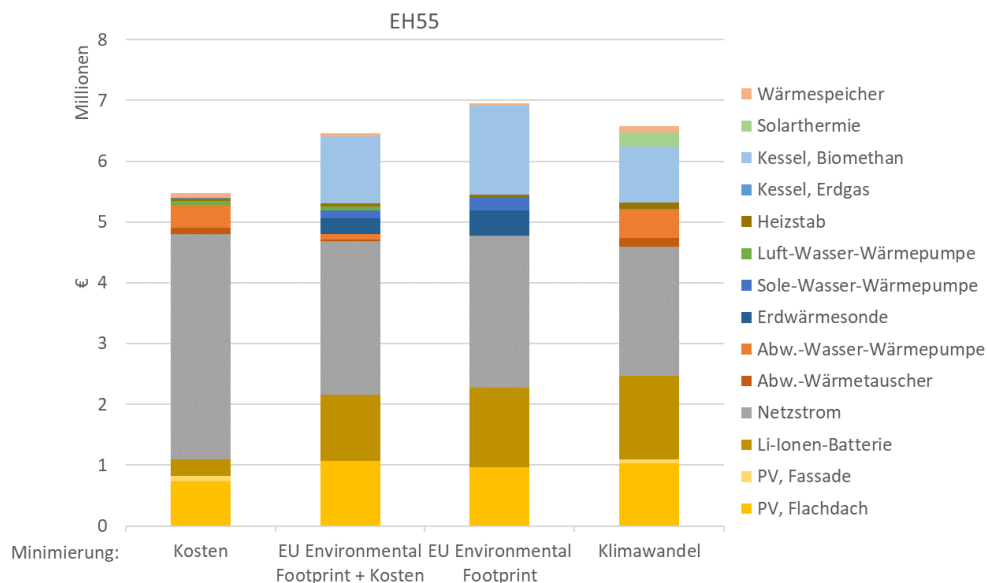


Abbildung A 7 Investitionskosten über 20 Jahre für EH55-Dämmstandard

Beim EH55-Standard sieht auch der Vergleich der Umweltwirkungen zwischen den verschiedenen Optimierungszielen (s. Abbildung A 8) den Ergebnissen für EH40 sehr ähnlich aus.

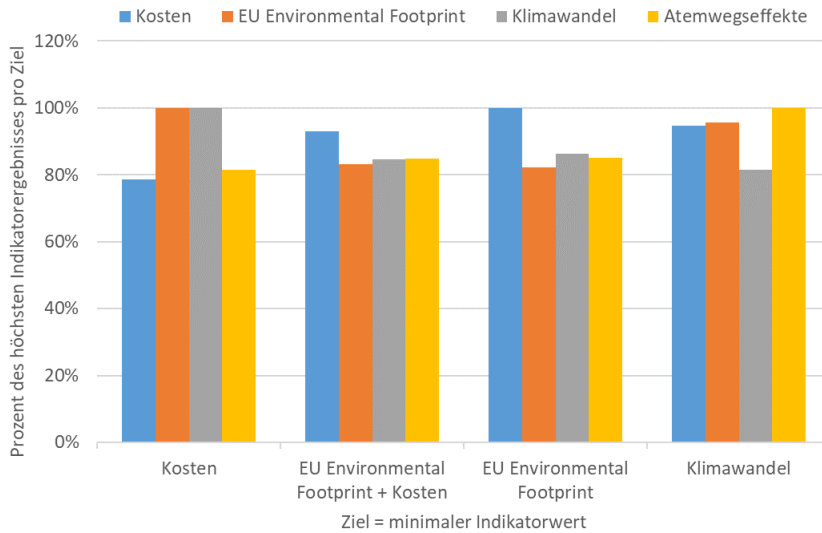


Abbildung A 8 Vergleich einzelner Indikatoren pro Optimierungsziel für EH55-Standard

Sensitivitätsanalyse: nur Wärmebedarf

Um Aussagen über den Nutzen der Sektorkopplung treffen zu können, wurde die Optimierung zusätzlich ausschließlich für die Wärmeversorgung durchgeführt, indem der Strombedarf für Haushalte, Gewerbe und E-Mobilität auf null gesetzt wurde. Es kann trotzdem in PV-Anlagen und Batterien investiert werden, um den Strombedarf der Wärmepumpen zu decken.

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

Im Vergleich zur sektorgekoppelten Optimierung steigen die Gesamtkosten über 20 Jahre um 13 bis 17 % an.

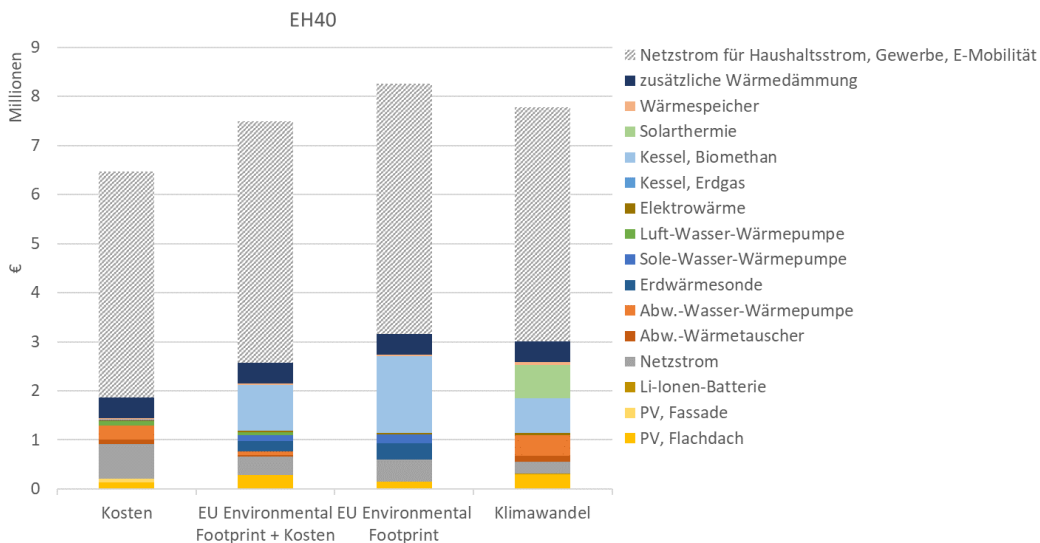


Abbildung A 9 Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele für Strom und Wärme

A 5 EINGANGSDATEN UND DETAILERGEBNISSE QUARTIER WIERNESHEIM

Bedarfe

Das Energiesystemmodell berücksichtigt jährliche Bedarfe an Strom und Wärme in stündlicher Auflösung. Aus den Jahressummen werden mit Hilfe der Tools oemof¹³ und nPro¹⁴ entsprechende Zeitreihen erstellt.

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** vor, die entsprechenden Standardlastprofilen zugeordnet wurden.

Tabelle A 8 Absolute jährliche Strombedarfe für Teilort Wiernesheim 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt ist, erstellt.

¹³ 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

¹⁴ www.npro.de

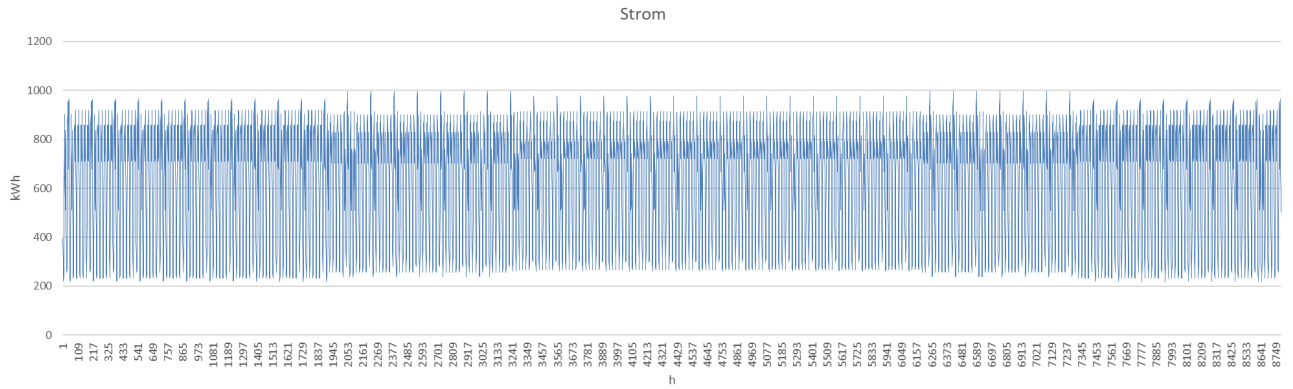


Abbildung A 10 Lastprofil Strom für Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistung Wiernsheim

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 Laden¹⁵ 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten jährlichen Strombedarfe und die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigten jährlichen Lastgänge.

Tabelle A 9 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

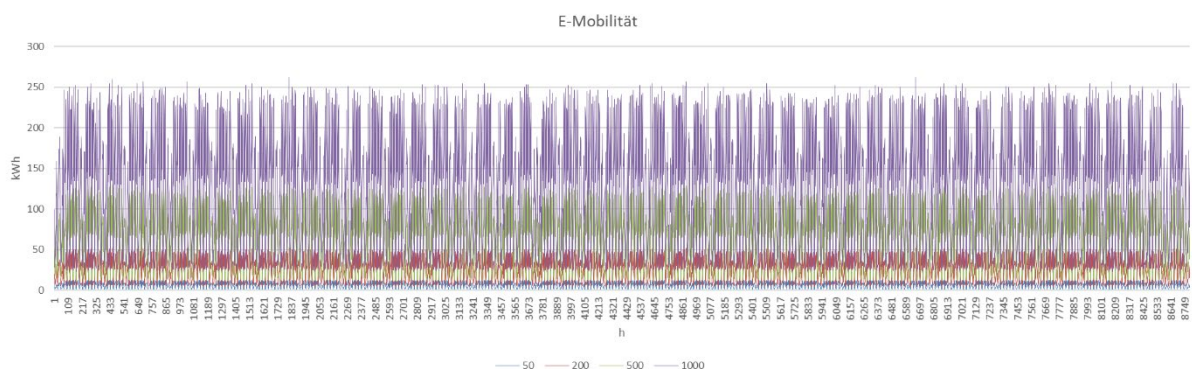


Abbildung A 11 Lastprofile E-Mobilität Wiernsheim

¹⁵ Ermittelt mit dem Tool nPro

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und

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 A 10 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

Tabelle A 11 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 hotmaps¹⁶. Es verfügt über ein Auswahlwerkzeug, um auf einer Karte einen Bereich auszuwählen. Für Wiernsheim wurde der Bereich ohne das Gewerbegebiet markiert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Das Tool liefert dann Wärmebedarfe getrennt nach Wohn- und Nicht-Wohngebieten. Diese Werte wurden ins Verhältnis gesetzt und damit der Wert für GHD errechnet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

¹⁶ <https://www.hotmaps.eu>



Abbildung A 12 Wärmebedarfsermittlung mit Tool hotmaps für Wiernsheim

Tabelle A 12 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

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.

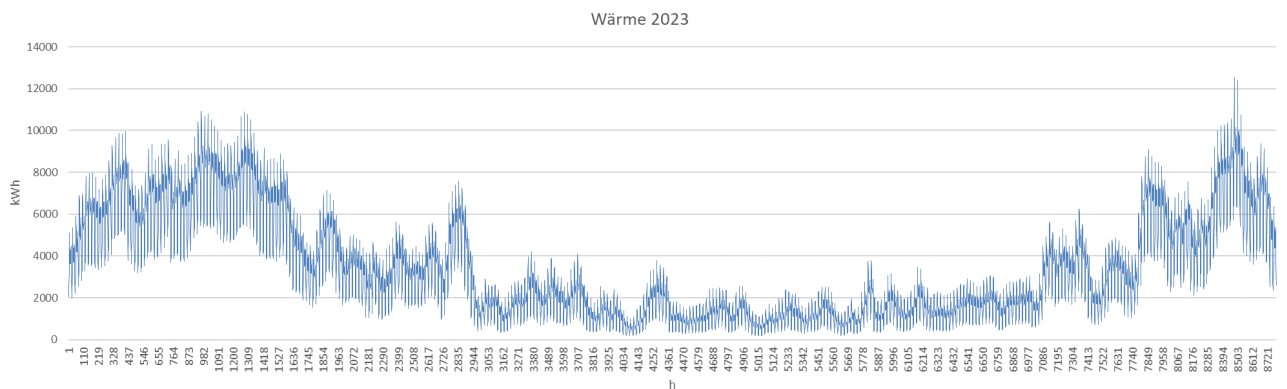


Abbildung A 13 Lastprofil Wärme Wiernsheim

Für den Wärmebedarf wird aufgrund erwarteter Maßnahmen zur energetischen Sanierung ein Absinken über die Zeit angenommen. Ausgangspunkt ist die Annahme der KEA-BW¹⁷, dass der Wärmebedarf bis 2050 um 50 % sinkt. Für die Eingangsdaten im Modell wird ein linearer Abfall bis 2038 um 1/3 angenommen.

Bestandsanlagen

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

Tabelle A 13 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			

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 A 14 Wärmeezeugende 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									

Potenzielle Erzeugungsanlagen und Speicher

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

¹⁷ KEA-BW (2022) Technikkatalog, Tabellen v1

- Windenergieanlagen
 - o Annahme: 3,2 MW pro Anlage; Typ Siemens SWT-3.2-113
 - o Potenzial (ganze Gemeinde Wiernsheim): lt. Energieatlas Baden-Württemberg¹⁸ 16 Anlagen in geeigneten Flächen, 8 Anlagen in bedingt geeigneten Flächen → 77 MW
- Verfügbar ab 2028 wegen langen Planungszeiten
- Photovoltaik: Potenzial lt. Energieatlas Baden-Württemberg¹⁹
 - 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 hotmaps²⁰ für Gesamtgemeinde)
- Biomethan-BHKW: 870 kWel (Annahme)
- Abwasser: Abwasser-Wärmetauscher (5000 kW nach ASUE²¹: 2-3 kWh/d/EW) + Abwasser-Wasser-Wärmepumpe

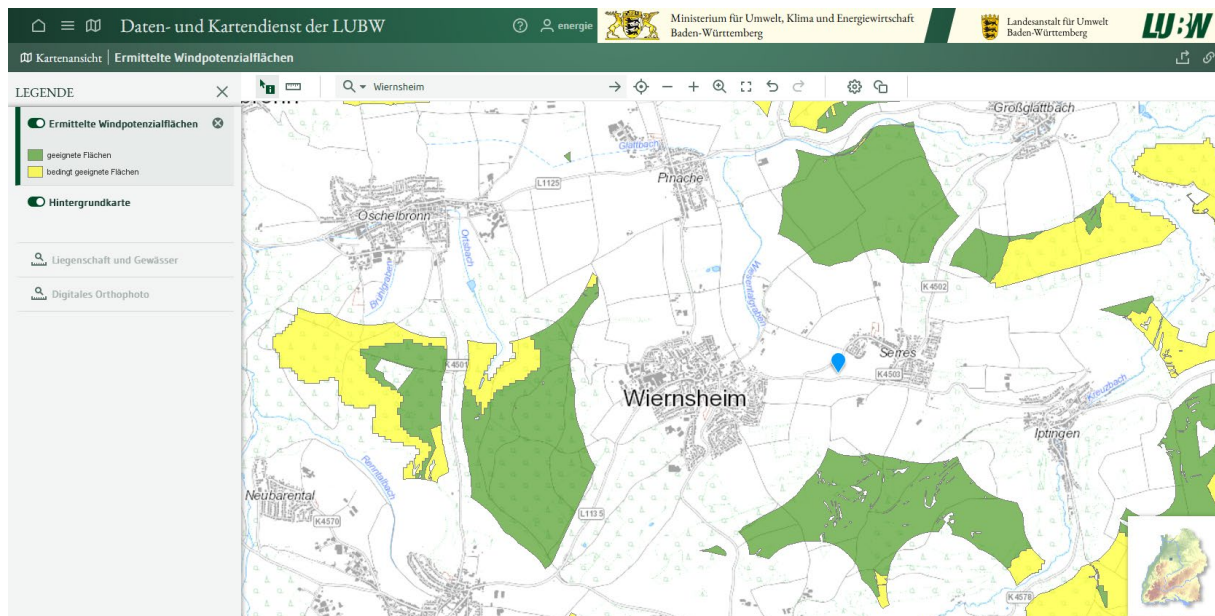


Abbildung A 14 Windpotenzialflächen rund um Wiernsheim lt. Energieatlas Baden-Württemberg

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

¹⁸ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/index.xhtml>

¹⁹ Ebd.

²⁰

²¹ ASUE (2021): Innovative Quartiersversorgung

- Lithium-Ionen-Batterie
- Vanadium-Redox-Flow-Batterie
- Zusätzlich Netzstrom

Technische Parameter

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. 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 A 15 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 A 16 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_WssnS-rcv_Srvv_Fstbrnstff_KwkHolzStatusbericht_1409.pdf
BHKW, Holzhackschnitzel, thermisch	75	
Elektrowärme	100	Annahme
Gaskessel	93	KEA-BW (2022): Technikkatalog. 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): Technikkatalog. Tabellen v1: 3.4 Dezentrale Waermeversorgung Biomassekessel automatisch beschickt v1.xlsx, 23 kW
Scheitholzofen	70	KEA-BW (2022): Technikkatalog. 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 Tabelle A 7 die Parameter für die Modellierung.

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 PVGIS²² ermittelt. Für PV wurde kristallines Silizium mit einem Systemverlust von 14 % angenommen.

Tabelle A 17 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

²² PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ mit Anpassung an typ. meteorologisches Jahr

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.thermal²³ ermittelt. Aus der Zeitreihe ergibt sich eine Jahresarbeitszahl für Wärme (60°C, Qualitätsfaktor: 0,4) von 2,62.

Kosten im Detailvergleich

Die Gesamtkosten über 20 Jahre liegen beim Kostenoptimim deutlich unter denen bei Treibhauspotenzialoptimierung und mehrkriterieller Optimierung. So liegen die Gesamtkosten der nicht allein kostenoptimierenden Energiesysteme ca. 20 bis 22,5 % über dem Kostenoptimum.

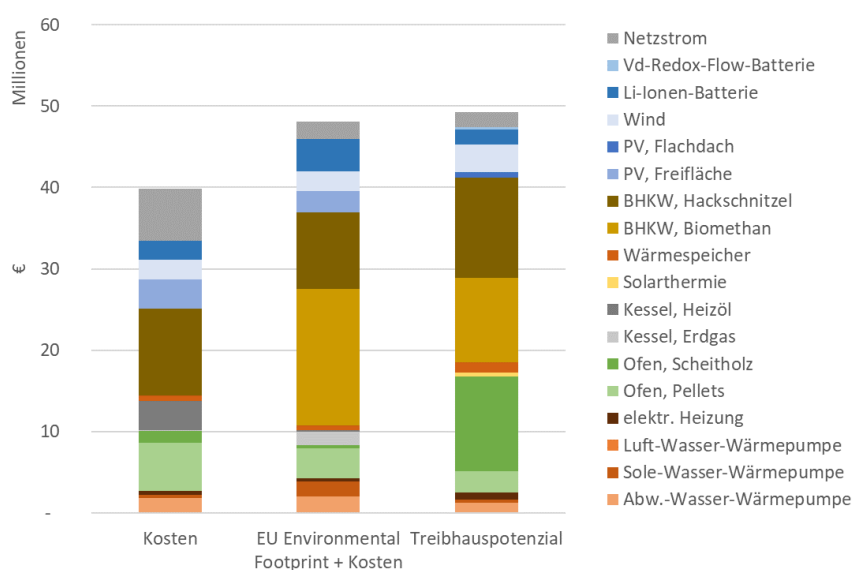


Abbildung A 15 Gesamtkosten über 20 Jahre für verschiedene Optimierungsziele für Wiernsheim

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).

²³ jnnr, Caroline Möller, FranziPl, 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

A 6 EINGANGSDATEN UND DETAILERGEBNISSE QUARTIER GERSTETTEN

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.

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 hotmaps²⁴ 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.

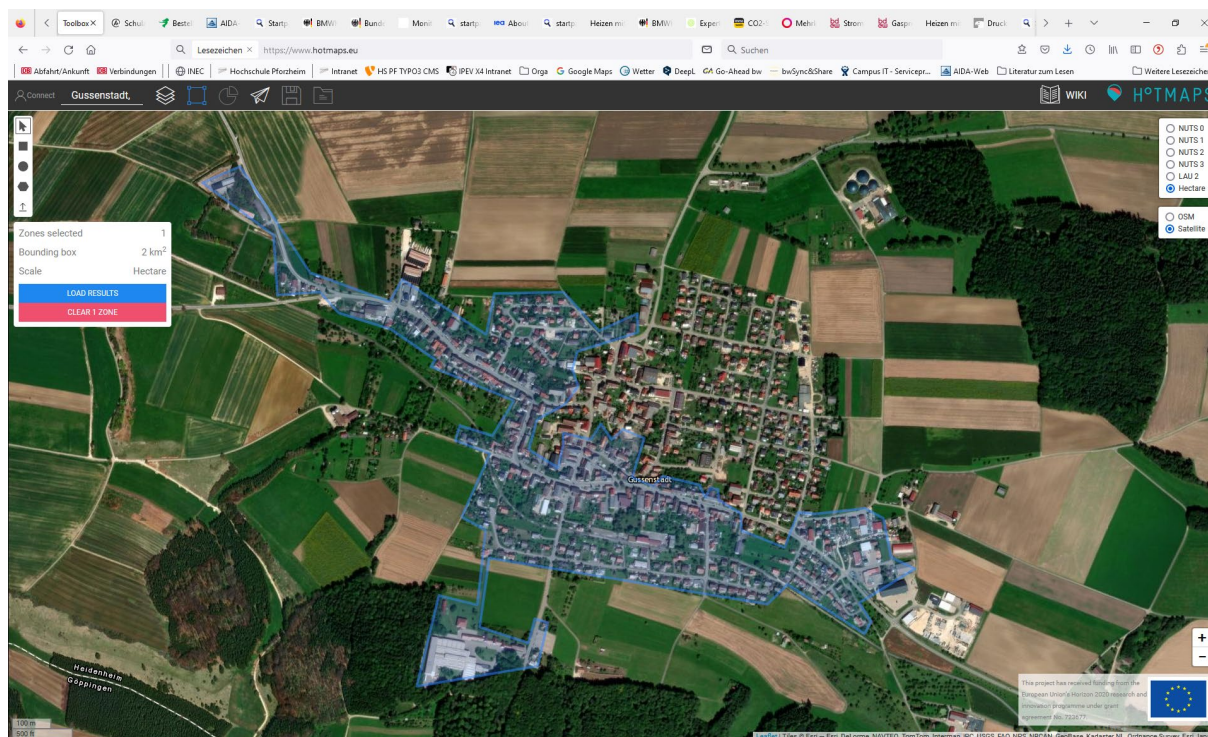


Abbildung A 16 Wärmebedarfsermittlung über hotmaps für Teilgebiet Gussenstadt

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

Tabelle A 18 Ermittlung des Wärmebedarfs mit Kennwerten aus hotmaps und nPro

	Flächen nach Baualtersklassen nach hotmaps m ²	Spez. Wärmebedarf nach nPro		Raumwärme kWh/a	Trinkwarmwasser kWh/a
		Raumwärme	Trinkwarmwasser		
		kWh/m ² /a			
Einfamilienhaus (1958-1968)	9134	187	35	1708143	319706
Einfamilienhaus (1979-1983)	10541	135	35	1423070	368944

²⁴ <https://www.hotmaps.eu>

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.

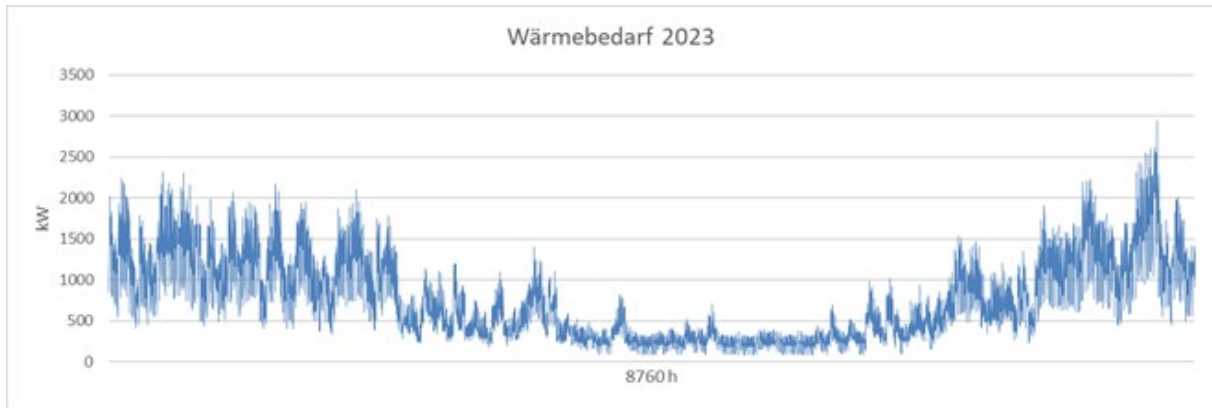


Abbildung A 17 Lastprofil Wärme Gerstetten

Für den Wärmebedarf wird ein Absinken über die Zeit angenommen. Ausgangspunkt ist die Annahme der KEA-BW²⁵, 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 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.

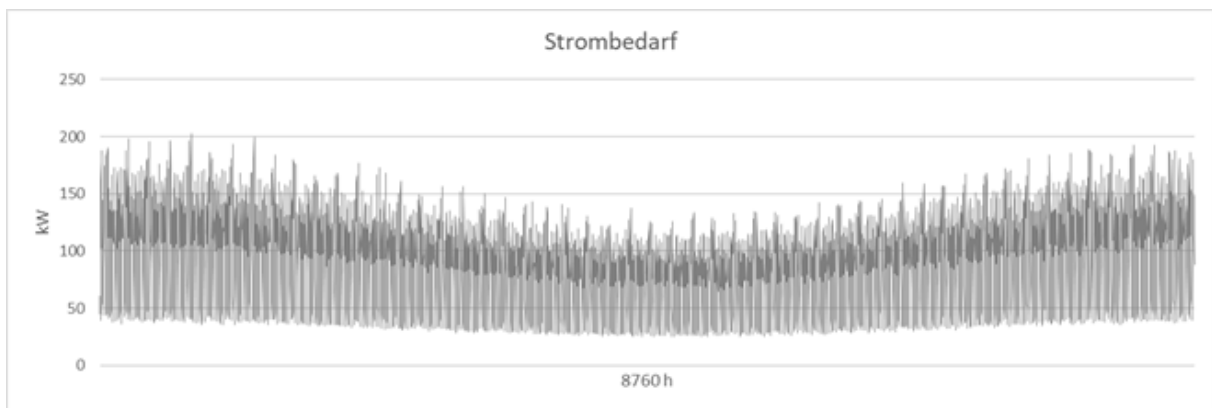


Abbildung A 18 Lastprofil Strom Gerstetten

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 Lade-

²⁵ KEA-BW (2022) Technikkatalog, Tabellen v1

punkten ausgegangen. Daraus ergeben sich die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten jährlichen Strombedarfe und das in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gezeigte Lastprofil für 2023.

Tabelle A 19 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

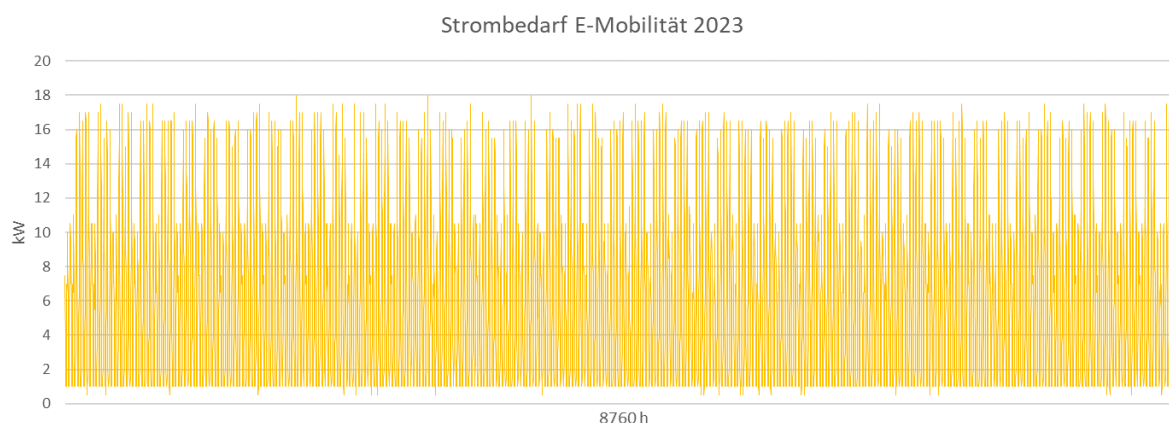


Abbildung A 19 Lastprofil E-Mobilität 2023 Gerstetten

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

Tabelle A 20 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			

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 Gerstetten): lt. Energieatlas Baden-Württemberg²⁶ 63 Anlagen in geeigneten Flächen, 42 Anlagen in bedingt geeigneten Flächen → 336 MW
- Photovoltaik: Potenzial lt. Energieatlas Baden-Württemberg²⁷
 - o Freifläche: 73 MWp
 - o Flachdach: 3,8 MWp
 - o 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

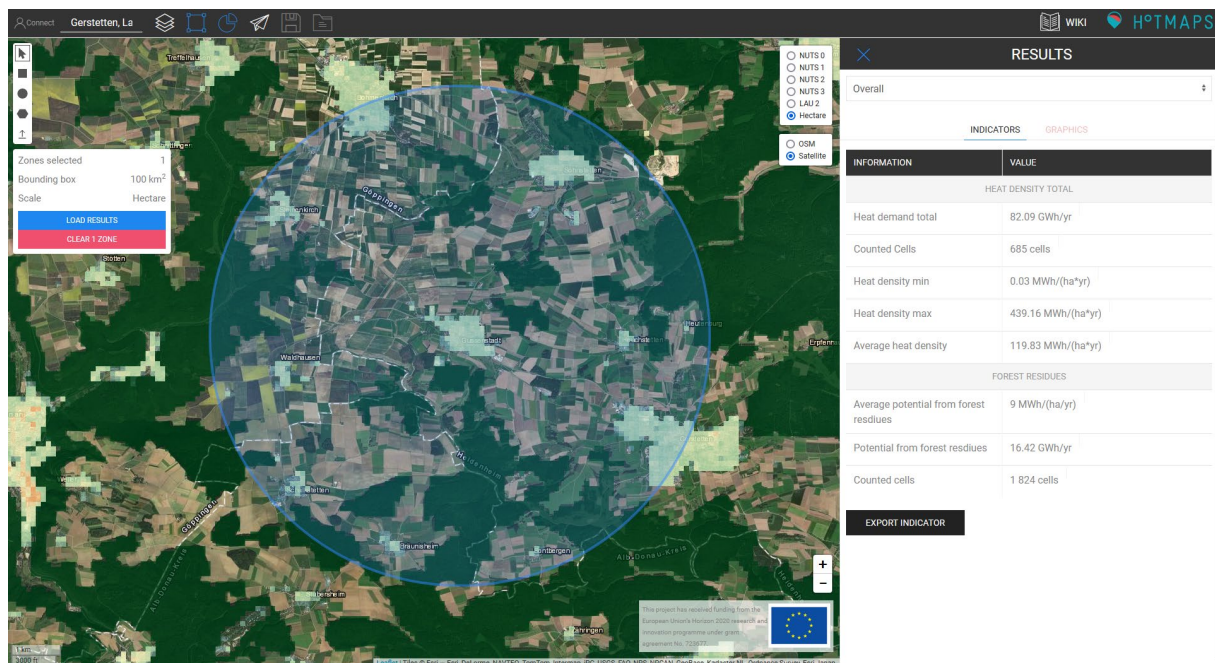


Abbildung A 20 Ermittlung Holzpotenzial mit hotmaps

- o Holzhackschnitzel-BHKW
- o Hackschnitzel-Kessel
- Abwasser: Abwasser-Wärmetauscher (5000 kW nach ASUE²⁸: 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

²⁶ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/index.xhtml>

²⁷ <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/index.xhtml>

²⁸ ASUE (2021): Innovative Quartiersversorgung

- Vanadium-Redox-Flow-Batterie
- Zusätzlich Netzstrom
- Power to Heat: Heizstab oder Elektrodenkessel
- Solarthermie, Freifläche, Röhren-/bzw. Flachkollektor

Technische Parameter

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. 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 A 21 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_WssnS-rvc_Srvc_Fstbrnnstff_KwkHolzStatusbericht_1409.pdf
BHKW, Holzhackschnitzel, thermisch	75	
Heizstab	100	
Hackschnitzel-Kessel	90	Datenblatt Agroforst zwischen 85,7 % und 92,2 %
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 Tabelle A 7 die Parameter für die Modellierung.

Wetterabhängige Daten

Für die Koordinaten latitude = 48.642°, longitude = 9.958° wurden die Wetterdaten für ein typisches meteorologisches Jahr über das Tool PVGIS²⁹ 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.

Tabelle A 22 Annahmen für Photovoltaik-Anlagen

	Neigung [°]	Azimut [°]	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° Azimut; 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.

²⁹ PVGIS: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

Das Erzeugungsprofil für Windenergie wird mit Hilfe von windpowerlib³⁰ für eine Anlage vom Typ Siemens SWT-3.2-113 mit einer Leistung von 3,2 MW und einer Nabenhöhe von 113 m erstellt.

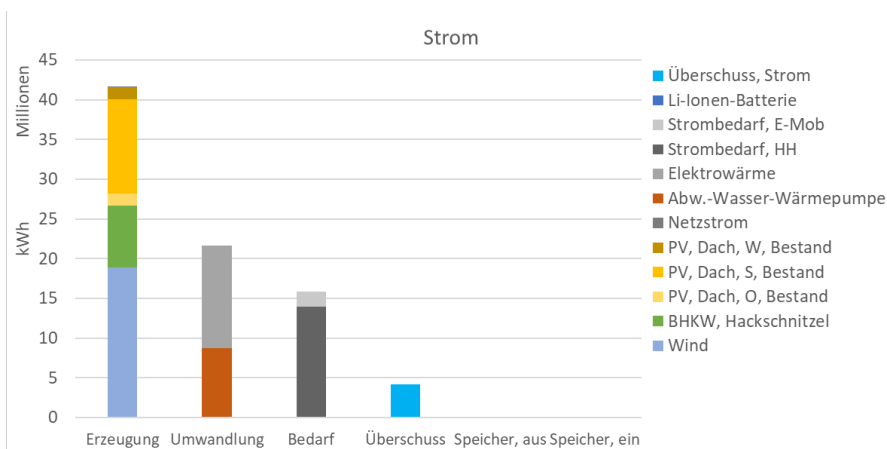
Der temperaturabhängige COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe wird mit oemof.thermal³¹ ermittelt (55°C Vorlauftemperatur, Qualitätsfaktor: 0,4).

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.

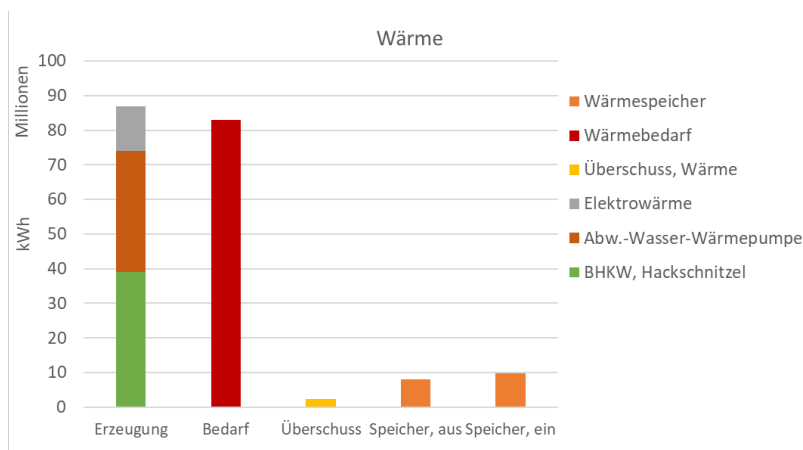
Beim unlimitierten Szenario geht gut die Hälfte des erzeugten Stroms in die Umwandlung in Wärme. Der Stromüberschuss beträgt gut 10 % der erzeugten Strommenge. Die Speichernutzung ist vernachlässigbar gering.

Abbildung A 21 Strombilanz für das Szenario mit allen 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 A 22 Wärmebilanz für das Szenario mit allen Optionen (20 Jahre)

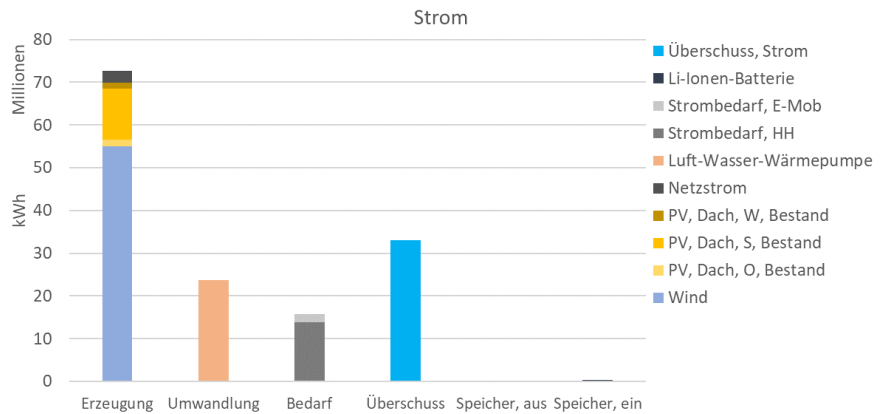


³⁰ Python-Bibliothek zur Simulation der Stromerzeugung von Windkraftanlagen

³¹ jnr, 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

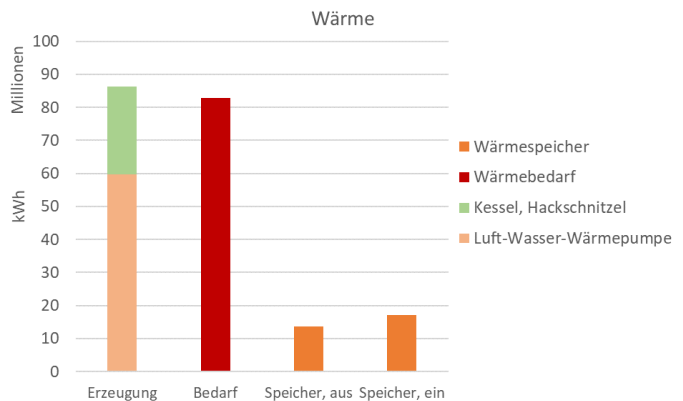
Beim stark limitierten Szenario wird deutlich mehr Strom aus Windenergie erzeugt, wobei der Überschuss ca. doppelt so hoch ist wie der Bedarf.

Abbildung A 23 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 A 24 Wärmebilanz für das Szenario mit Luft-Wärmepumpe, Kessel und begrenzter Hackschnitzelverfügbarkeit (20 Jahre)



A 7 PRESSEARTIKEL STAKEHOLDER-DIALOG

Energiestudie zeigt Potenziale auf

Zwei Forscherinnen der Hochschule Pforzheim stellen eine „Energie-Fallstudie Wiernsheim“ vor und sprechen gegenüber der Gemeinde und Hausbesitzern Empfehlungen aus. Photovoltaikanlagen könnten zur Klimawende beitragen, während Ölheizungen ersetzt werden sollten.

VON DR. DIETMAR BASTIAN

WIERNSHEIM. Ein Team um Professorin Dr. Ingela Tietze und Diplomingenieurin Heidi Hottenroth von der Hochschule Pforzheim hat eine Energiestudie speziell für die Gemeinde Wiernsheim erstellt, die die beiden Wissenschaftlerinnen am Dienstagabend in der Mensa des Bildungszentrums präsentiert haben. Moderiert hat Luis Mayer von der Regionalen Kompetenzstelle Ressourceneffizienz Nordschwarzwald KEFF+.

Es handelt sich dabei um ein Forschungsprojekt des „Instituts für Industrial Ecology“, einer Einrichtung mit sieben Professorinnen und Professoren sowie 17 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Neben Wiernsheim wurden im Projekt zwei weitere Kommunen als Fallstudien untersucht. Ausgehend von der Problem-Gemengelage Klima, Verlust an biologischer Vielfalt, Ressourcenknappheit, hohen Energiepreisen und drohenden Versorgungsengpässen hat die Hochschule Zukunftsaufgaben für Energieversorger, Kommunen und auch Gebäudeeigentümer abgeleitet. Im Projekt wurde mehr Nachhaltigkeit bei der Energiesystemplanung berücksichtigt, ebenso die Vermeidung einer Verlagerung von Klima- hin zu Umweltproblemen sowie das Zusammenspiel von Energiesystemmodellierung und Ökobilanzierung.

Forscherinnen untersuchen geeignete Flächen für 16 Windkraftanlagen.

Mit dem sperrigen Begriff Energiesystemmodellierung meint die Studie ein Energiesystem mit minimierten Kosten und dem optimierten Einsatz von Energieanlagen. Dabei wird auch die Frage nach sinnvollen Investitionen aufgeworfen und das Ganze in Beziehung zu einer vorgegebenen Strom- und Energienachfrage gesetzt.

Gemäß der Studie galt es, technische und zeitliche Parameter sowie Emissionen beim



Professor Dr. Ingela Tietze (li.) und Dipl.-Ing. Heidi Hottenroth (re.) stellen die Energiestudie für Wiernsheim vor.

Foto: Bastian

Betrieb von Anlagen einzurechnen. Inzwischen gebe es computergestützte mathematische Programme, die bei der Ökobilanzierung (Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts) helfen könnten, sagte Ingela Tietze in der Mensa des Bildungszentrums. Nicht weniger als 17 Indikatoren wurden von den Forscherinnen berücksichtigt. Auch zur Sprache kamen geeignete Flächen für 16 Windkraftanlagen im Bereich der Gesamtgemeinde sowie acht weitere Windkraftanlagen auf bedingt geeigneten Flächen.

Besonders viel Potenzial sei für PV-Anlagen auf Freiflächen, Schräg- und Flachdächern vorhanden, so die Forscherinnen. Nach erfolgter Ermittlung der Eingangsdaten, deren Überführung in ein Planungsmodell und Berechnung der Ergebnisse legten

die beiden Referentinnen eine „Fallstudie Wiernsheim“ vor, die sich nur auf den Hauptort ohne Industriegebiet bezieht und einen Zeithorizont von 20 Jahren in den Blick nimmt.

Studie berücksichtigt alle denkbaren Energieträger und Technologien.

Bei den Empfehlungen der Studie sind alle denkbaren Energie-Träger und Technologien (also Photovoltaik, Stromnetz, Erd- und Abwasserwärme, Hackschnitzel, Holz, Solarthermie, Biogas und Wind) eingerechnet; ebenso der erwartete Bedarf an Strom, Wärme und Energie für die Elektromobilität der kommenden 20 Jahre. Bilanziert wurden auch das Potenzial der Gemeinde an Wind und Photovoltaik, die Kosten für Investitionen, Fix- und variable Kosten und der Rück-

gang der Treibhausemissionen und sonstigen Umweltwirkungen beim Netzstrom.

Die Wissenschaftlerinnen fassten im Vortrag die Ergebnisse zusammen und entwarfen ein multi-kriterielles Szenario, das Investitionen in Windkraftanlagen, Freiflächen-PV, Lithium-Ionen-Batterien, Blockheizkraftwerke, Erdwärme und Abwasserwärme in Verbindung mit Wärmepumpen und Pellet-Ofen sinnvoll erscheinen lässt und Grundlage für weitere Planungen der Kommune sein kann. Bei Bestandsanlagen sollten – so die Referentinnen – Heizölkes- sel als Erstes ersetzt werden.

Eine hitzige Diskussion schloss sich an, doch das sei beim Energiethema immer so, so Professor Tietze. Die komplette Präsentation kann demnächst auf der Homepage der Gemeinde eingesehen werden.

Quelle: Dr. Dietmar Bastian, Mühlacker Tagblatt