

# Leitfaden RessourcenPlan

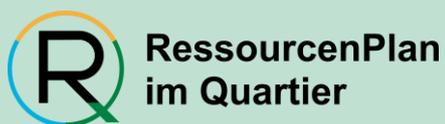


## Teil 2: Elemente des RessourcenPlans

### 2.4: Ressourcenmanagement Energie



## Ergebnisse des Projekts



Februar 2023



## Impressum

### Autoren und beteiligte Institutionen

Autoren	Institution
<b>Christian Klemm</b> <b>Janik Budde</b> <b>Gregor Becker</b> <b>Peter Vennemann</b>	FH Münster, IEP, Institut für Energie und Prozesstechnik
<b>Rosalie Arendt</b> <b>Vanessa Bach</b> <b>Matthias Finkbeiner</b>	Technische Universität Berlin, Sustainable Engineering

### Herausgeber

FH Münster  
IWARU Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt  
Corrensstraße 25  
48149 Münster

### Ansprechpartner

Peter Vennemann  
FH Münster  
IEP Institut für Energie und Prozesstechnik  
Mail: [vennemann@fh-muenster.de](mailto:vennemann@fh-muenster.de)

### Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes R2Q „RessourcenPlan im Quartier“ durchgeführt. Das Projekt wurde unter den Förderkennzeichen 033W102A-K durch das BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung RES:Z „Ressourceneffiziente Stadtquartiere“ gefördert (<https://ressourceneffiziente-stadtquartiere.de/>). Die Fördermaßnahme ist Teil der Leitinitiative Zukunftsstadt innerhalb des BMBF-Rahmenprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung – FONA<sup>34</sup>“.

### Verfügbarkeit und Verwendung

Dieses Dokument ist Teil der Publikationsreihe „Leitfaden RessourcenPlan“. Sie ist online verfügbar unter [www.fh-muenster.de/r2q-leitfaden-ressourcenplan](http://www.fh-muenster.de/r2q-leitfaden-ressourcenplan).

Bitte zitieren als:

Klemm, C., Budde, J., Becker, G., Arendt, R., Bach, V., Finkbeiner, M., Vennemann, P. (2023): *Leitfaden RessourcenPlan – Teil 2.4: Ressourcenmanagement Energie. Ergebnisse des Projekts R2Q RessourcenPlan im Quartier*. Münster: FH Münster, IWARU Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt. doi: [10.25974/fhms-15756](https://doi.org/10.25974/fhms-15756).



Dieses Dokument ist unter einer Open Access Creative Commons CC BY 4.0-Lizenz lizenziert ([Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)). Das bedeutet, dass das Dokument kostenlos heruntergeladen und gelesen werden kann. Darüber hinaus darf das Dokument wiederverwendet und zitiert werden, sofern die veröffentlichte Originalversion zitiert wird.

Münster, Februar 2023

## Hinweis: Struktur des „Leitfaden RessourcenPlan“

Der „Leitfaden RessourcenPlan“ dient der anwendergerechten Darstellung der Ergebnisse des BMBF-Projekts „RessourcenPlan im Quartier (R2Q)“. Der Leitfaden

- *definiert den RessourcenPlan* als neuen Planungsansatz für das Ressourcenmanagement im Quartier inklusive seiner Anwendungs- und Bewertungsroutinen;
- diskutiert darauf aufbauend einzelne *Elemente des Ressourcenmanagements* für die Schwerpunkte (i) Wasser, (ii) Baustoffe, (iii) Energie und (iv) Fläche und
- stellt ergänzende *Anwendungs- und Planungshilfen* bereit.

Zur übersichtlichen Lesbarkeit und Anwendbarkeit untergliedert sich der Leitfaden in mehrere Teile, die in der folgenden Grafik dargestellt werden. Die einzelnen Teile stehen unter <https://www.fh-muenster.de/r2q-leitfaden-ressourcenplan> zum Download zur Verfügung.

<b>Teil 1: Konzeption des RessourcenPlans</b>	<i>Definition RessourcenPlan Definition RessourcenPlan als Planungsinstrument inkl. Bewertungssystematik Herleitung RessourcenPlan als rechtliches Instrument Empfehlungen für Beteiligungsformate</i>	
<b>Teil 2: Elemente des RessourcenPlans</b>		
<b>2.1:</b> Ressourcenmanagement Niederschlagswasser	<i>Sektorale Betrachtungen zu (i) Werkzeugen des Ressourcenmanagements und (ii) Bewertung der Ressourceneffizienz  Aufstellung <b>sektoraler</b> RessourcenPläne</i>	<b>2.5:</b> Ressourcenmanagement Fläche <i>Integrierte, lokal-funktionale Betrachtungen zu (i) Werkzeugen des Ressourcenmanagements und (ii) Bewertung der Ressourceneffizienz  Aufstellung RessourcenPlan</i>
<b>2.2:</b> Ressourcenmanagement Schmutzwasser		
<b>2.3:</b> Ressourcenmanagement Baustoffe		
<b>2.4:</b> Ressourcenmanagement Energie		
<b>Teil 3: Anwendungs- und Planungshilfen</b>		
<b>3.1:</b> Kurzanleitung RessourcenPlan	<i>Schritt-für-Schritt-Anleitung; Kurzübersichten zu Treibern, Indikatoren, Instrumenten und Daten</i>	
<b>3.2:</b> Lernen von anderen – Booklet „Best-Practice“	<i>Best-Practice-Beispiele für Planungs- und Beteiligungsprozesse, Verwaltungsstrukturen und Quartiersgestaltung</i>	
<b>3.3:</b> Maßnahmensteckbriefe	<i>Maßnahmensteckbriefe für Maßnahmen des Quartiersmanagements für Wasser, Baustoffe und Energie</i>	
<b>3.4:</b> Stakeholder-Beratung blau-grüne Infrastrukturen	<i>Empfehlungen und Materialien für die Stakeholderberatung zum Thema blau-grüner Infrastrukturen</i>	
<b>3.5:</b> Baukonstruktionskatalog (Aufteilung in zwei Dokumente)	<i>Katalog zur Abschätzung von Materialmengen und -zusammensetzungen verschiedener Baukonstruktionen 3.5.1: Erläuterungen 3.5.2: Steckbriefkatalog</i>	

## Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i> .....	1
<b>I. WERKZEUGKASTEN</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Instrumente</b> .....	<b>3</b>
1.1 Eingabedaten .....	4
1.2 Optimierungsprozess .....	5
1.3 Ergebnisse .....	8
<b>2 Maßnahmen des Quartiersmanagements</b> .....	<b>9</b>
<b>II. BEWERTUNG</b> .....	<b>11</b>
<b>3 Systemisch-sektorale Bewertung</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1 Methodik</b> .....	<b>12</b>
3.1.1 Bewertungsmethodik .....	12
3.1.2 Vereinfachungen für die Anwendungsbeispiele .....	13
<b>3.2 Quartiere Baukau und Pantringshof</b> .....	<b>14</b>
3.2.1 Status Quo .....	15
3.2.2 CO <sub>2</sub> -Emissionsminimum .....	15
<b>4 Ökobilanzierung</b> .....	<b>17</b>
4.1 Ziel und Untersuchungsrahmen .....	17
4.2 Sachbilanz.....	18
4.3 Ergebnisse und Interpretation .....	22
4.4 Implikationen für die Energiesystemmodellierung und die Nutzung von empfohlenen Technologien in der nachhaltigen Quartiersplanung.....	25
<b>5 Transformation</b> .....	<b>26</b>
<b>III. ANHANG</b> .....	<b>31</b>
<i>Literaturverzeichnis</i> .....	32
<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	35
<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	36

# I. Werkzeugkasten

Die folgenden Kapitel (bis auf Kapitel 4: Ökobilanzierung) basieren zum Großteil auf der Masterarbeit von Janik Budde (Budde 2022).

## 1 Instrumente

Urbane Energiesysteme sind die Gesamtheit aller Prozess der Energiegewinnung, -Nutzung und -Umwandlung eines definierten räumlichen Gebiets (Jaccard 2006) mit hoher Dichte und Differenzierung von Bewohnern, Gebäuden, gewerblichen Bereichen, Infrastruktur (Rutledge et al. 2011) und Energiesektoren (z. B. Wärme, Strom, Kraftstoffe) (Rosales Carreón und Worrell 2018). Für die Optimierung dieser Energiesysteme wurde eine Methode der Energiesystemmodellierung erarbeitet. Um dabei auf existierenden Ansätzen aufzubauen, wurde zunächst ein umfangreiches Literaturreview durchgeführt. Insgesamt wurden 153 Modellierungstools auf ihre Eignung geprüft und miteinander verglichen. Auf der Grundlage der im Review erarbeiteten Anforderungen an Modellierungstools, bezüglich ihres

- Modellierungsschwerpunkts,
- Modellierungsmethode,
- mathematischen Ansatzes,
- analytischen Ansatzes,
- strukturelle und technischen Details,

haben sich 13 Tools als grundsätzlich geeignet erwiesen. Durch die Anwendung weiterer optionaler Kriterien (Anwendbarkeit nicht-finanzieller Bewertungskriterien und OpenSource Verfügbarkeit) wurden insgesamt zwei Tools als Möglichkeiten identifiziert. Aufgrund der größeren Anzahl von Funktionen und größerer Modelflexibilität wurde das „Open Energy Modelling Framework“ (oemof) (oemof developer 2022) für am besten geeignet bewertet und für die weitere Bearbeitung ausgewählt. Weitere Details und das genaue Vorgehen bei der Auswahl der Modellierungsgrundlage wurde mit der Publikation „Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches“ (Klemm und Vennemann 2021a) veröffentlicht.

Da die Anwendung des Modellierungsframework oemof Programmierkenntnisse erfordert, wurde mit dem „Spreadsheet Energy System Model Generator“ eine anwenderfreundliche Benutzerschnittstelle geschaffen (SESMG) (Klemm et al. 2022a). Durch diese Schnittstelle wird die Praxistauglichkeit der Methodik erhöht und die Integration in städtische Planungsprozesse ermöglicht. Die beispielhafte Anwendung für ein Quartier mit acht Gebäuden wurde mit der Publikation „Modellierung und Optimierung urbaner Energiesysteme im Projekt R2Q“ (Klemm und Vennemann 2021b) veröffentlicht.

Neben der Modellierung benutzerdefinierter oemof-Energiesysteme bietet der SESMG die Möglichkeit, urbane Quartiere mit über 1 000 Gebäuden zu optimieren. Der grundsätzliche Prozessablauf ist in Abbildung 1 dargestellt und entspricht der Gliederung der folgenden Unterkapitel.



**Abbildung 1. Prozessablauf des SESMG**

## 1.1 Eingabedaten

Die Bedienung des SESMG erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche. Darüber hinaus werden verschiedene Inputdaten mithilfe von Tabellenblättern (z. B. Microsoft Excel), an das Energiesystemmodell übergeben. Grundsätzlich können beim SESMG zwei Anwendungsfälle unterschieden werden. Zum einen die Modellierung kleiner Gebiete (< 10 Gebäude) und zum anderen die Modellierung ganzer Stadtquartiere ( $\geq$  10 Gebäude). Je nach Anwendungsfalls kommen unterschiedliche Eingabetabellen zum Einsatz (Budde 2022).

Der SESMG und die zugehörigen Tabellenblätter sind in der zugehörigen Dokumentation ausführlich erläutert: <https://spreadsheet-energy-system-model-generator.readthedocs.io/en/latest/> (Klemm et al. 2022a). In Tabelle 1 sind die benötigten Inputdaten für die Quartiersoptimierung beispielhaft dargestellt. Grundsätzlich können diese in drei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. In der ersten Kategorie werden gebäudespezifische Daten eingegeben, zum Beispiel der Wärmeverbrauch und das anzusetzende Lastprofil eines Gebäudes. Die zweite und dritte Kategorie bezieht sich auf Investitionsalternativen, also welche Alternativen bei der Optimierung des Energiesystems betrachtet werden. Die anschließende Optimierung entscheidet, ob eine Investition unter den ausgewählten Indikatoren sinnvoll ist. Die zweite Kategorie bezieht sich auf die Investitionsalternativen, die im Gebäude getroffen werden können. Auf Gebäudeebene können beispielsweise Flächenanalyse ergeben, dass kein Potential für Erdwärmepumpen besteht. Einschränkungen könnten beispielsweise altlasten-belastet Flächen oder bergbaulich bedingte Risiken sein. Im Rahmen der Bachelorarbeit „Wärmepumpen in Stadtquartieren - Untersuchung anhand eines Quartiers in Herne“ (Budde 2020) wurde eine Flächenanalyse für das Quartier Baukau erstellt. Für Photovoltaik (PV)-Anlagen stellt das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW) im Energieatlas NRW ein Solarkataster bereit. Daraus können gebäudespezifische Potentialflächen entnommen werden. In der dritten Kategorie werden Investitionsalternativen für das gesamte Quartier ausgewählt. Es kann beispielsweise entschieden werden, ob ein Wärmenetz installiert werden

soll und wie die Wärme bereitgestellt wird. Außerdem ist es möglich, einen lokalen Energiemarkt als Investitionsalternative zu betrachten.

**Tabelle 1. Auszug aus dem Tabellenblatt**

Eingabedaten	Eingabewerte
<b>Kategorie 1: Gebäudespezifische Daten</b>	
Gebäudenutzung	Mehrfamilienhaus
Gebäudegrundfläche	300 m <sup>2</sup>
Bewohner	6
Baujahr	1975
<b>Kategorie 2: Investitionsalternativen Gebäude</b>	
Erdwärmepumpe	Ja
Batteriespeicher	Ja
Solarthermie-Anlage	Nein
Photovoltaik-Anlage	Ja
<b>Kategorie 3: Investitionsalternativen Quartier</b>	
Wärmenetz	Ja
BHKW	Ja
Quartiersspeicher	Ja
Große-Wärmepumpe	Nein

Grundsätzlich steigt die Genauigkeit der Optimierung mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Daten. Um unzureichende Datenverfügbarkeit zu kompensieren, wurden stochastische und statistische Verfahren entwickelt, um die fehlenden Daten zu schätzen. Klemm beschreibt beispielsweise in seiner Masterarbeit (Klemm 2020) Methoden, um den Wärme- und Strombedarf zu schätzen.

## 1.2 Optimierungsprozess

Nachdem das Tabellenblatt ausgefüllt wurde, ist keine Eingabeaufforderung auf Seiten der Anwender\*innen nötig. Mithilfe der vom Nutzer bereitgestellten Systemparameter wird das Energiesystemmodell automatisch erstellt. Dabei wird das System mithilfe der mathematischen Graphentheorie abgebildet. Dabei werden die verschiedenen Systemkomponenten in die fünf Kategorien

- Busse,
- Quellen,

- Senken,
- Transformatoren und
- Speicher

unterteilt.

Quellen stellen die Bereitstellung von Energie dar. Dies kann entweder die Nutzung einer Energiequelle sein (z. B. Gasspeicher oder Solarenergie, keine Energiequelle im physikalischen Sinne) oder der vereinfachte Energieimport aus benachbarten Energiesystemen (Klemm et al. 2022a).

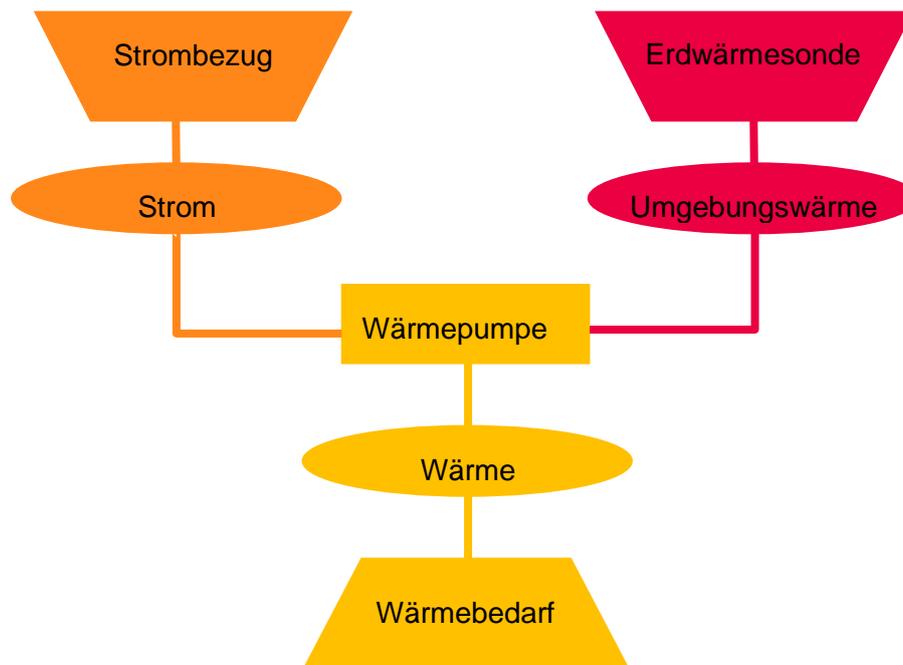
Senken bilden den Energiebedarf innerhalb des Energiesystems oder den Energieexport in benachbarte Systeme ab. Wie Quellen können auch Senken entweder einen variablen oder einen festen Energiebedarf haben. Senken mit variablem Bedarf passen ihren Verbrauch an die verfügbare Energiemenge an. Dies könnte zum Beispiel für den Verkauf von überschüssigem Strom stehen (Klemm et al. 2022a).

Transformatoren sind Komponenten mit einem oder mehreren Eingangsströmen, die in einen oder mehrere Ausgangsströme umgewandelt werden. Transformatoren können Kraftwerke, Energieumwandlungsprozesse (z. B. Elektrolyse, Wärmepumpen) sowie Transportleitungen mit Verlusten sein. Die Wirkungsgrade der Transformatoren können für jeden Zeitschritt definiert werden (z. B. der Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerks in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur) (Klemm et al. 2022a).

Speicher werden an einen Bus angeschlossen und können Energie aus diesem Bus speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgeben (Klemm et al. 2022a).

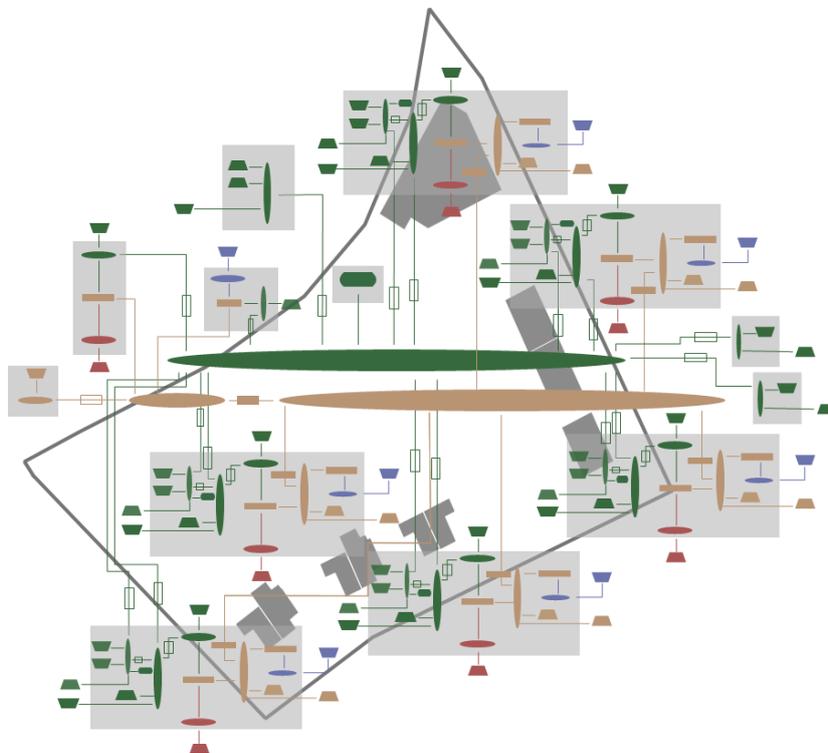
Das genutzte Modellierungsframework oemof erlaubt keine direkten Verbindungen zwischen Komponenten. Stattdessen müssen sie immer mit einem Bus verbunden sein. Der Bus wiederum kann mit anderen Komponenten verbunden werden, so dass Energie über den Bus transportiert werden kann. Busse können eine beliebige Anzahl von eingehenden und ausgehenden Strömen haben. Busse können nicht direkt miteinander verbunden werden. Sie berücksichtigen keine Umwandlungsprozesse oder Verluste (Klemm et al. 2022a).

In Abbildung 1 ist ein Energiesystem mit einer Kompressionswärmepumpe (Transformator) dargestellt. Weitere Komponenten sind der Strombezug aus dem Stromnetz, eine Erdwärmesonde (Quellen) und der Wärmebedarf eines Gebäudes (Senke).



**Abbildung 2. Modellkonzeption am Beispiel einer Erdwärmepumpe (Budde 2020)**

In Abbildung 2 ist lediglich eine Investitionsalternative dargestellt. Bei der Optimierung von Energiesystemen werden in der Regel mehrere Alternativen zur Wärmeversorgung eines Gebäudes miteinander verglichen. So werden zum Beispiel Wärmepumpen, Gasheizungen oder Solarthermie-Anlagen betrachtet. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Systemgraphen für das Energiesystem eines Testgebiets mit sechs Gebäuden.



**Abbildung 3. Optimiertes Energiesystem eines Testgebiets in Baukau (Budde 2020)**

Es ist gut zu erkennen, dass die Komplexität bereits bei 6 Gebäuden stark zunimmt. Für größere Energiesysteme wird die Modellierung schwieriger. Folgende zentrale Auswirkungen treten auf:

1. Schwierige visuelle Abbildung
2. Hohe Rechenkapazitäten nötig

Die unübersichtliche visuelle Abbildung führt nur dazu, dass die Anwender\*innen die einzelnen Komponenten des Modells schwieriger nachvollziehen können. Zu komplexe Energiesysteme führen dazu, dass hohe Rechenkapazitäten nötig sind oder dass Vereinfachungen getroffen werden müssen. Das Energiesystem eines Stadtquartiers wird nach Dateneingabe automatisch erstellt, sodass die Anwender\*innen keinen direkten Kontakt zu den oemof Komponenten haben. Hierdurch wird versucht die Fehleranfälligkeit beim Erstellungsprozess des Modells zu verhindern. Nachdem das Modell erstellt wurde, wird es an einem Solver übergeben und gelöst.

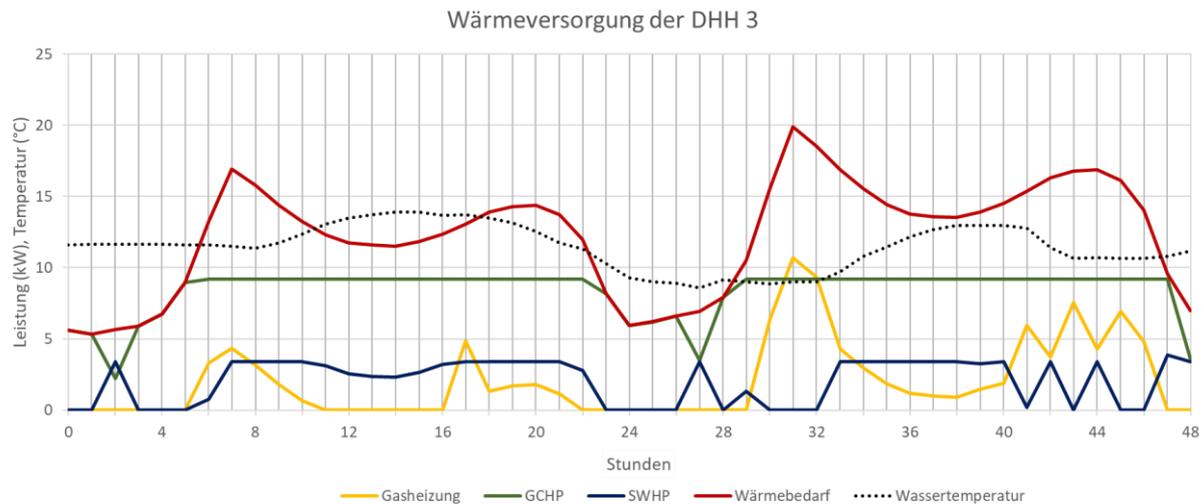
### 1.3 Ergebnisse

Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der Optimierung aufgearbeitet. Es existieren insgesamt drei Möglichkeiten, um die Ergebnisse zu nutzen (Budde 2022):

- CSV-Dateien zur Weiterverarbeitung
- Interaktive Ergebnisaufbereitung als Dashboard
- Automatisch erstellte Diagramme

Die Anwender\*innen haben die Möglichkeit die Energieflüsse an jedem Bus zu analysieren. Bei einer hohen Anzahl von Bussen kann diese Ergebnisausgabe jedoch schnell unübersichtlich werden. Deshalb werden die Ergebnisse in zwei CSV-Dateien zusammengefasst. Diese beinhalten zum einen die aufsummierten Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Energiebedarf und zum anderen die Kapazitäten aller Systemkomponenten (Budde 2022).

Die in den CSV-Dateien hinterlegten Daten werden weiterhin im interaktiven Dashboard dargestellt. Das Dashboard öffnet sich automatisch nach abgeschlossener Optimierung und stellt die oben beschriebenen Ergebnisse übersichtlich dar. Die einzelnen Leistungsverläufe der Komponenten können interaktiv ausgewählt werden. In Abbildung 4 ist beispielhaft die Wärmeversorgung einer Doppelhaushälfte dargestellt. Durch diese interaktive Ergebnisaufbereitung ist eine detaillierte, komponentenspezifische Auswertung möglich (Budde 2022).



**Abbildung 4. Wärmeversorgung einer Doppelhaushälfte im Testgebiet in Baukau (Budde 2020)**

Für größere Quartiere ist weiterhin die Auswertung mithilfe automatisch generierter Pareto-, Energiemengen- und Leistungsdiagramme möglich. Das Pareto-Diagramm zeigt die Kosten und Emissionen unterschiedlicher Szenarien. Mithilfe des Pareto-Diagramms kann ein Transformationsszenario ausgewählt werden. Energiemengen- und Leistungsdiagramme zeigen, wie sich die einzelnen Technologien je nach Szenario verändern (Budde 2022).

## 2 Maßnahmen des Quartiersmanagements

Im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche wurden verschiedene Maßnahmen mit dem Potential die Energieversorgung von Quartieren zu verbessern identifiziert. Die Ergebnisse dieser Literaturrecherche wurden in Form von Steckbriefen aufgearbeitet und sind diesem Projektbericht angefügt.

Insgesamt wurden 20 Maßnahmen für die Quartiersversorgung identifiziert, von denen 15 Maßnahmen im SESMG modelliert werden können (siehe Tabelle 2). Teilweise können die Maßnahmen in weitere Unterkategorien aufgeteilt werden. Beispielsweise kann bei Wärmepumpen zwischen dezentraler Versorgung (Gebäude) und zentraler Versorgung (Quartier) oder zwischen verschiedenen Wärmequellen unterschieden werden. Im SESMG sind die Umgebungsluft, oberflächennahe Geothermie (Erdsonden), Grundwasser (Brunnenanlagen) und Oberflächengewässer (z.B. Flüsse oder Kanäle) berücksichtigt. Somit ergibt sich aus einer Maßnahme im Maßnahmenkatalog eine Vielzahl von Investitionsalternativen im Gebäude.

Tabelle 2. Betrachtete Maßnahmen im Maßnahmenkatalog und im SESMG

Maßnahmenkatalog	SESMG	Maßnahmenkatalog	SESMG
<b>Anergienetze</b>	Ja	<b>Photovoltaikanalgen</b>	Ja
<b>Batteriespeicher</b>	Ja	<b>Power-to-Gas</b>	Ja
<b>Biomasseheizwerk</b>	Ja	<b>Power-to-Heat</b>	Ja
<b>Blockheizkraftwerk</b>	Ja	<b>Power-to-Mobility</b>	Ja
<b>Demand Response</b>	Nein	<b>Smart Grids</b>	Nein
<b>Energetische Gebäudesanierung</b>	Ja	<b>Solarthermieanlagen</b>	Ja
<b>Geothermieanlagen</b>	Ja	<b>Wärmenetze</b>	Ja
<b>Kleinstwasserkraftanlagen</b>	Nein	<b>Wärmepumpen</b>	Ja
<b>Kleinwindkraftanalgen</b>	Ja	<b>Wärmespeicher</b>	Ja
<b>Lokale Energiemärkte</b>	Ja	<b>Mieterstrommodelle</b>	Nein

Einzelne Maßnahmen wurden nicht in der Modellierung des SESMG umgesetzt (siehe Tabelle 2). Die Modellierung von Anergienetzen erfordert die bidirektionale Abbildung von Wärmenetzen, was zu einer Erhöhung von ganzzahligen Modellvariablen führt. Dies führt wiederum zu einer signifikanten Steigerung der zur Lösung des Modells benötigten Rechenressourcen. Aus diesem Grund wurde zunächst darauf verzichtet, Anergienetze in der Modellierung zu berücksichtigen. Da alle Ansätze Open-Source veröffentlicht wurden, kann dies mit dem bereits gekoppelten DHNx-Fernwärmenetz zukünftig nachträglich implementiert werden.

Für die Einbindung von Mieterstrommodellen und Demand-Response-Mechanismen sind ökonomische Top-Down Modelle nötig, welche nicht ohne weiteres mit dem Bottom-Up Ansatz sowie der volkswirtschaftlichen Optimierung von oemof/SESMG gekoppelt werden können. Die Stromversorgung durch Kleinstwasserkraftanlagen sind stark standortabhängig und haben in den Fallbeispielen Baukau und Pantringshof keine Rolle gespielt. Bei Smart Grids liegt der Fokus auf der Echtzeit-Betriebsoptimierung von Energiesystemen. Auch dafür sind andere Modellierungsmethoden nötig als die im SESMG angewendeten.

## II. Bewertung

### 3 Systemisch-sektorale Bewertung

#### 3.1 Methodik

In diesem Teil wird zuerst die Methodik allgemein beschrieben. Anschließend wird die Methodik auf konkrete Anwendungsfälle angepasst.

##### 3.1.1 Bewertungsmethodik

In Abbildung 5 ist die Bewertungsmethodik dargestellt. Die Treiber und Transformationsziele wurden bereits im Leitfaden RessourcenPlan, Teil 1, vorgestellt. Treiber sind z. B. Klimaschutzziele oder die Nachfrage nach einer kostengünstigen Energieversorgung und bilden die Grundlage für die Transformationsziele (Verringerung der Energiekosten, Treibhausgasemissionen und des Energieverbrauchs). Die Treiber- und Transformationsziele bestimmen daraufhin zum einen die Indikatoren (absolute Treibhausgasemissionen, Energiekosten und Energiebedarf) und die Maßnahmen. Die Auswahl der Indikatoren wird ausführlich in dem bereits veröffentlichten Artikel „Indicators for the optimization of sustainable urban energy systems based on energy system modeling“ (Klemm und Wiese 2022) diskutiert.

Jeder Maßnahme werden variable und periodische Kosten sowie Emissionen zugeordnet. Für den Betrieb von Wärmepumpen fallen beispielsweise Kosten für Betriebsstrom (variable Kosten) an und für die Installation fallen Investitionskosten (periodische Kosten) an. Um Kosten mit unterschiedlichen Investitionshorizonten miteinander vergleichen zu können werden alle periodischen Kosten mithilfe der Kapitalwertmethode auf ein Jahr abgezinst. Die Berechnung der Kosten und Emissionen für Wärmepumpen wurden ausführlich in der Bachelorarbeit „Wärmepumpen in Stadtquartieren - Untersuchung anhand eines Quartiers in Herne“ (Budde 2020) hergeleitet. Nach Optimierung werden alle Kosten, Emissionen und Bedarfe der einzelnen Komponenten aufsummiert, sodass die absoluten Werte für das Quartier bestimmt werden. Durch die absoluten Werte können unterschiedliche Modellierungsläufe miteinander verglichen werden. Zu Beginn wird erst der Status Quo simuliert, sodass die möglichen Veränderungen der Indikatoren betrachtet werden können. Anschließend wird das Kostenminimum berechnet. Die Investitionsalternativen werden so gewählt, dass die finanziellen Kosten der Energieversorgung minimiert werden. Das Energiemengendiagramm zeigt, durch welchen Technologiemix das Kostenminimum erreicht werden kann. Als nächstes wird das Emissionsminimum des Quartiers berechnet. Es werden die Investitionsalternativen ausgewählt, die die wenigsten Treibhausgasemissionen verursachen. Auch dafür kann der Technologiemix aus dem Energiemengendiagramm entnommen werden. Die Pareto-Kurve zeigt das Verhältnis zwi-

schen den Kosten- und Emissionsminima. Für die praktische Umsetzung sind die Punkte zwischen den beiden Minima am relevantesten. Die Punkte werden berechnet, indem die Optimierungsläufe kostenoptimiert, aber mit einer vordefinierten Emissionsgrenze, durchgeführt werden. So können zum Beispiel klimapolitische Vorgaben (z. B. Reduktion der Treibhausgasemissionen um 50 Prozent) umgesetzt werden. Wie bereits erwähnt, führen komplexe Energiesysteme dazu, dass hohe Rechenressourcen notwendig sind. Damit die Bewertungsmethodik angewandt werden kann, müssen die Energiesystemmodelle in einem lösbaren Bereich bleiben. Eine Alternative zu hohen Rechenressourcen besteht darin das Modell zu vereinfachen. Bei Vereinfachungen ist es wichtig, dass die Genauigkeit der Ergebnisse nicht leidet. Hierzu haben Klemm et al. in der Studie „Model-based run-time and memory usage optimization for a mixed-used multi-energy system model with high spatial resolution“ (Klemm et al. 2022b) Untersuchungen angestellt.

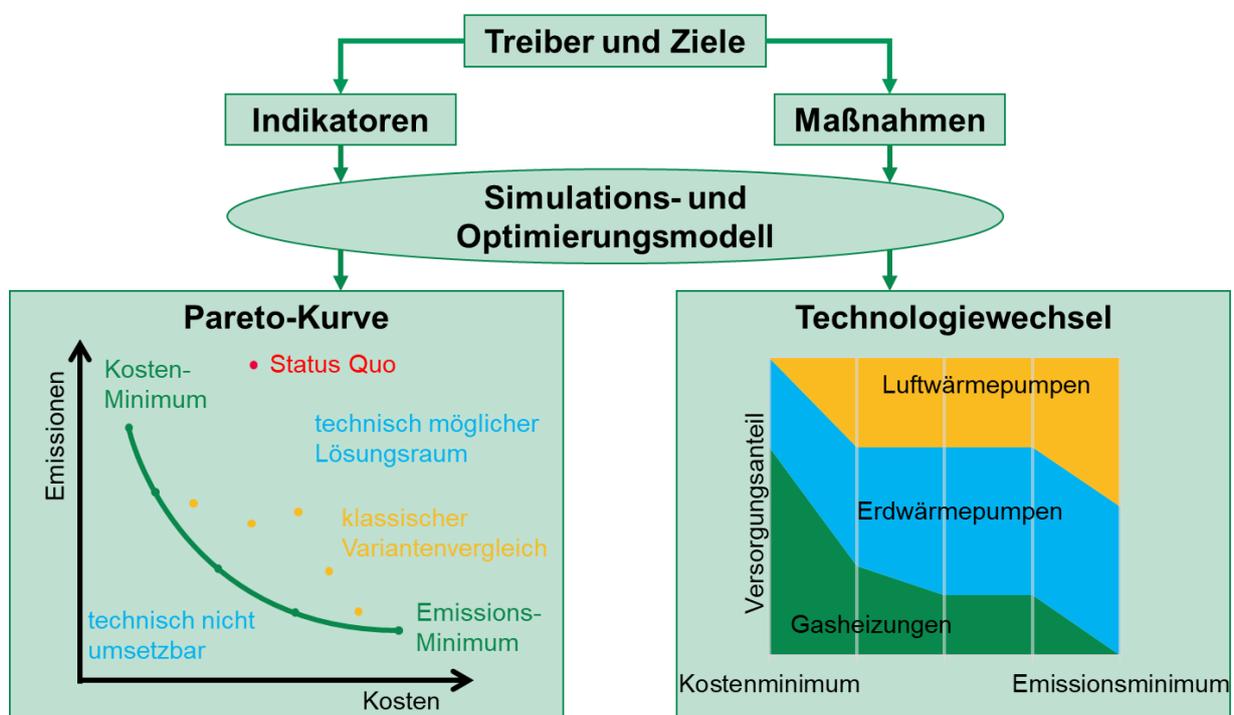


Abbildung 5. Bewertungsmethodik

### 3.1.2 Vereinfachungen für die Anwendungsbeispiele

Um diese Rechenressourcen in einen handhabbaren Bereich zu verschieben, werden Methoden zur modelbasierten Laufzeit- und Arbeitsspeicheroptimierung angewendet (Klemm et al. 2022b). Zu diesen Methoden gehören

- Zeitreihenbeschneidung (jeder 4. Tag),
- räumliches Clustering und
- technische Vorentscheidung.

Bei der Simulation wurde jeder 4. Tag betrachtet. Beim räumlichen Clustering werden Gebäude in unmittelbarer Nähe zu Siedlungen zusammengefasst. Zum Beispiel werden die Potentialflächen für eine Erdwärmepumpe für zehn Nachbarn addiert und aufgrund dieser Siedlungsfläche eine Erdwärmepumpe dimensioniert. Bei Photovoltaikanlagen werden Anlagen mit einer ähnlichen Ausrichtung innerhalb der Siedlung zusammengefasst, z. B. Süd-Anlagen, Süd-West-Anlagen usw. Eine technische Vorentscheidung war, dass das Wärmenetz und somit eine zentrale Wärmeversorgung, nicht berücksichtigt wird. Die Modellierung eines Wärmenetzes bringt viele nicht-lineare Entscheidungen mit sich. Die nicht-linearen Entscheidungen führen dazu, dass das Modell nur schwer lösbar ist. Die Linearisierung des Wärmenetzes führte zwar dazu, dass die Modelle leichter lösbar werden, die Abweichungen sind allerdings nicht vertretbar. Becker und Klemm (Becker et al. 2022) haben den im SESMG gewählten DHNx-Ansatz mit einem anderen Ansatz verglichen und eine Lösung vorgeschlagen, wie mit dem Laufzeitproblem umgegangen werden kann. Der Ansatz wird in weiteren Arbeiten überprüft und gegebenenfalls in den SESMG implementiert. Das fehlende Wärmenetz führt dazu, dass keine zentralen Komponenten wie Blockheizkraftwerke betrachtet werden können. Gerade die Vernachlässigung von Blockheizkraftwerken und zentralen Flusswasserwärmepumpen (Rhein-Herne-Kanal als Wärmequelle) führen dazu, dass die Emissionen nicht noch weiter reduziert werden können. In der Bachelorarbeit von Budde hat sich nämlich herausgestellt, dass gerade eine zentrale Wärmeversorgung zur Minimierung der Treibhausgasemissionen beitragen kann. Durch die Berücksichtigung von Blockheizkraftwerken könnte zum Beispiel erreicht werden, dass kein Stromnetzbezug mehr nötig ist. Bei der Betrachtung der Emissionsminima beider Quartiere gewinnen sogar Wasserstoffsysteme (zentrale Brennstoffzelle, Elektrolyseur, Wasserstoffspeicher) an Relevanz. Hinsichtlich monetärer Interessen sind diese Systeme aktuell aber noch zu teuer und haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse in diesem Projekt.

### 3.2 Quartiere Baukau und Pantringshof

Der SESMG wurde auf die zwei Stadtquartiere Baukau und Pantringshof in Herne angewendet. Die Stadtquartiere besitzen beide über 1 000 Gebäude (Wohngebäude, Gewerbe- und Industriegebäude, Garagen). Als erstes wurde für beide Quartier der Status Quo (Ist-Zustand) berechnet und anschließend das Emissionsminimum (Soll-Zustand). In Tabelle 3 sind die absoluten Kosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energiebedarfe für beide Szenarien dargestellt.

**Tabelle 3. Status Quo und emissionsoptimierte Simulation beider Quartiere**

Quartier	Kosten (M€ / a)	CO <sub>2</sub> -Emissionen (tCO <sub>2</sub> / a)	Endenergiebedarf (GWh)	Sekundärenergiebedarf (GWh)
<b>Status Quo (absolute Werte)</b>				
Baukau	7,19	13 335,13	13,05	14,00
Pantringshof	3,58	6 611,19	6,67	7,19
<b>Emissionsminimum (relative Veränderung)</b>				
Baukau	+ 258,21 %	- 75,12 %	- 34,58 %	- 57,25 %
Pantringshof	+ 281,40 %	- 77,11 %	- 39,95 %	- 67,91 %

### 3.2.1 Status Quo

Beim Status Quo wurde vereinfachend angenommen, dass der Strombedarf über das Stromnetz importiert und die Wärme über Gasheizungen und entsprechende Gasimporte gedeckt wird. Wie anhand der in Tabelle 3 aufgeführten Werte erkennbar ist, hat Baukau einen deutlich höheren Energiebedarf als Pantringshof. Die Differenz zwischen Sekundärenergiebedarf und Endenergiebedarf entsteht beispielsweise durch Umwandlungsverluste von beispielsweise Gasheizungen.

### 3.2.2 CO<sub>2</sub>-Emissionsminimum

Die emissionsoptimierte Simulation stellt den Soll-Zustand des Quartiers dar. Bei der Minimierung der Emissionen spielen die Kosten keine Rolle. Das Energiesystem wird nur hinsichtlich der Emissionen optimiert, sodass die Investitionsalternativen ausgewählt werden, die am wenigsten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse dargestellt.

Die Kosten im emissionsoptimierten Szenario steigen gegenüber dem Status Quo deutlich. Für Baukau um rund 260 % und für Pantringshof um 280 %. Einen wesentlichen Anteil an den gestiegenen Kosten haben die Luftwärmepumpen, die zur Deckung der Spitzenlast implementiert werden. Luftwärmepumpen zu Spitzelastdeckung sind unter monetären Gesichtspunkten wenig sinnvoll. Die Spitzenlasten treten an kalten Wintertagen auf. Die Luftwärmepumpen nutzen Strom, um Wärme zur Verfügung zu stellen. Das genaue Funktionsprinzip ist in der Bachelorarbeit von Budde erklärt (Budde 2020). Der Strom für die Luftwärmepumpen kommt entweder aus Photovoltaikanlagen (günstig) oder aus dem Stromnetzbezug (kostenintensiv). An kalten, dunklen Wintertagen ist der Anteil von Photovoltaikstrom gering, sodass der Netzstrom zum Antrieb des Verdichters der Wärmepumpe genutzt werden muss. Dadurch, dass die Außentemperaturen (Wärmequelle der Luftwärmepumpe) gering sind, leidet die Effizienz der Wärmepumpe. Hinzu kommt, dass die Gebäude der Quartiere nicht ausreichend gedämmt sind und somit die Heizungssysteme hohe Vorlauftemperaturen haben, was wiederum dazu

führt, dass die Effizienz der Wärmepumpen leidet. Letztlich führt eine schlechte Wärmedämmung zu einem hohen Wärmebedarf, sodass die Kosten für Luftwärmepumpen in diesem Fall sehr hoch sind.

Entsprechend den Modellergebnissen können CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieversorgung in Baukau um 75 % und in Pantringshof um 77 % reduziert werden. Das liegt vor allem an den großen Photovoltaik-Potentialen, an der Dämmung der Gebäude und daran, dass Gasheizungssysteme durch Wärmepumpen und Solarthermie-Anlagen ersetzt werden. Die Dämmung der Gebäude führt nicht nur dazu, dass der Wärmeverbrauch sinkt, sondern auch der Stromverbrauch. Über Wärmepumpen sind beide Sektoren gekoppelt und so wirken sich Dämmmaßnahmen auf beide Sektoren aus. Beim Emissionsminimum sind sogar Photovoltaik-Anlagen mit unwirtschaftlicher Ausrichtung (Ost, Nord-Ost, Nord-West) sinnvoll. Unter anderem wird dieser Strom für den Austausch mit den Nachbarn über einen lokalen Energiemarkt genutzt. Ziel ist es den klimaschädlichen Netzbezug zu verringern. Für Solarthermie-Anlagen ist der Trend ebenfalls erkennbar, jedoch haben Solarthermie-Anlagen einen wesentlich geringen Einfluss auf die Wärmeversorgung, als Photovoltaikanlagen auf die Stromversorgung. Außerdem ist es zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sinnvoll, Batteriespeicher moderat auszubauen, um so den Eigenverbrauch im Gebäude zu erhöhen und somit den Netzbezug zu verringern.

Der Energiebedarf sinkt im Szenario für Baukau um 35 % und in Pantringshof um 40 %. Dieses Einsparpotential lässt sich vor allem durch die hohe Altersstruktur der Gebäude in beiden Quartieren begründen. Durchschnittlich wurden die Gebäude in Baukau im Jahr 1955 gebaut und in Pantringshof im Jahr 1958. Aufgrund fehlender Daten wurde angenommen, dass keine energetischen Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Folglich sind die Dächer, Wände oder Fenster schlecht gedämmt, wodurch sich ein großes Potential zur energetischen Sanierung ergibt. Der Sekundärenergiebedarf sinkt noch stärker als der Endenergiebedarf. Das liegt vor allem an den Wärmepumpen, die aus 1 kWh Strom mehrere kWh Wärme bereitstellen. Die Veränderung der Energiebedarfe unterscheidet sich bei beiden Quartieren. Das liegt vor allem an der unterschiedlichen Bebauungsstruktur. In Pantringshof ist der Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern größer als in Baukau, wodurch mehr Einsparungen durch Dämmungen realisiert werden könnten (Budde 2022).

## 4 Ökobilanzierung

In einer weiteren Fallstudie werden verschiedene Szenarien zur Bereitstellung von Wärme und Strom ökobilanziell untersucht. Die Energieszenarien werden durch die Energiesystemmodellierung SESMG bereitgestellt (siehe Kapitel 2.1). Die ökobilanzielle Bewertung bezieht sich auf den Arbeitsstand der Energieszenarien von Ende 2020 für das Gebiet Baukau-Ost in Herne (nähere Beschreibung in Kapitel 4.1 zu finden). Die finalen Ergebnisse der Energiesystemmodellierung, die allerdings nicht ökobilanziell untersucht worden sind, schließen das ganze Quartier mit ein und somit auch weitere Technologien, die für das Gebiet Baukau-Ost nicht relevant sind. Dieses Kapitel basiert zum Großteil auf einer eingereichten Publikation, die kooperativ von der TU Berlin mit der FH Münster verfasst wurde (Quest et al. 2022).

Im Folgenden wird zuerst auf den Ziel- und Untersuchungsrahmen eingegangen, gefolgt von der Sachbilanz, anschließend folgt die Interpretation der Ergebnisse. Das Kapitel schließt mit einer Einordnung der Ergebnisse und ihren Implikationen für die nachhaltige Quartierplanung.

### 4.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel dieser Arbeit ist eine ökobilanzielle Evaluation des Technologiemix, der den Quartiersauschnitt von Baukau-Ost in Herne, in dem 48 Personen leben, mit Strom und Wärme versorgt. Die zu evaluierenden Technologien werden von der Energiesystemmodellierung geliefert, die nach CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Kosten optimiert sind (siehe Kapitel 2).

Es werden drei Szenarien evaluiert:

- Aktuelle Energieversorgung (IST-Szenario)
- CO<sub>2</sub>-optimiertes Szenario
- Kostenoptimiertes Szenario

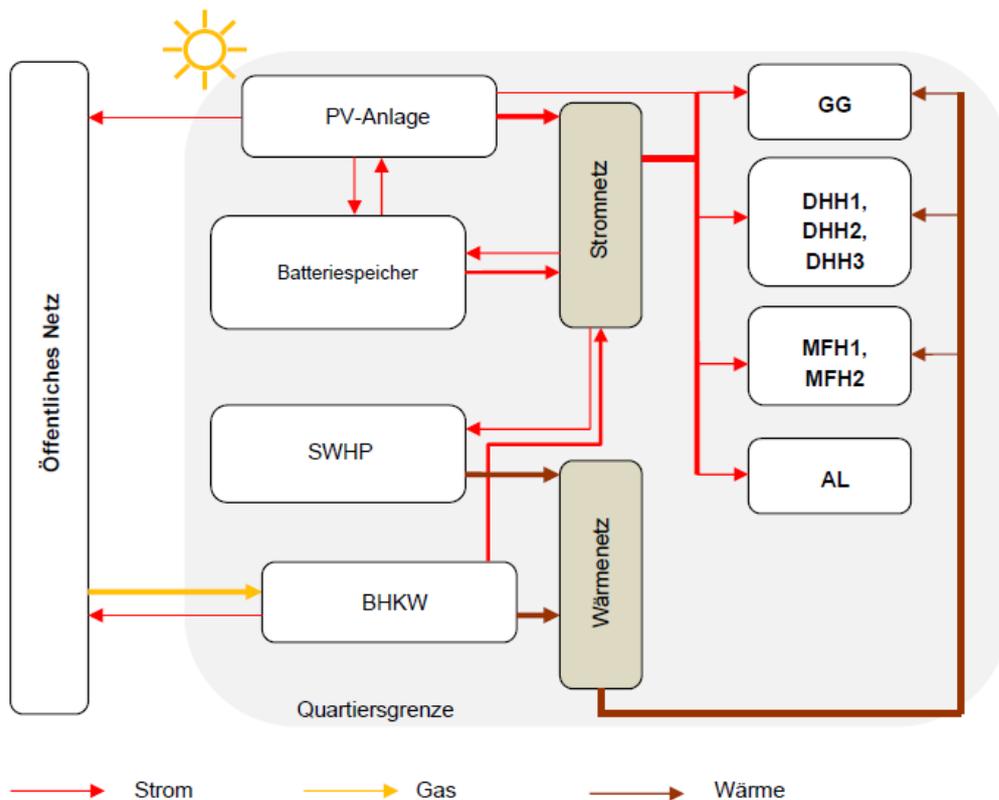
Die Modellierung in GaBi (Sphera Solutions Inc. 2021) ermöglicht die Evaluierung von Umweltauswirkungen, die über CO<sub>2</sub>-Emissionen hinausgehen. Zudem können die in SESMG berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen mit denen aus GaBi verglichen werden. Das Einbeziehen von zusätzlichen Umweltauswirkungen kann beeinflussen, welcher Technologiemix als optimal empfohlen werden kann.

Für die Modellierung wurde eine integrierte-LCA durchgeführt. Diese nutzt als Eingangsparameter für die Ökobilanz Daten, die aus einer anderen Methode/Software stammen (Guinée et al. 2018). Technologien, die in allen Szenarien vorkommen (z.B. die Heizkörper in den einzelnen Gebäuden), werden nicht modelliert, da sie keinen Einfluss auf den Vergleich haben. Es wird der gesamte Lebensweg der Technologien untersucht.

Die Funktion der betrachteten Technologien entspricht der Energie- und Wärmebereitstellung für das untersuchte Gebiet. Somit ist die funktionelle Einheit der Energie- und Wärmebedarf



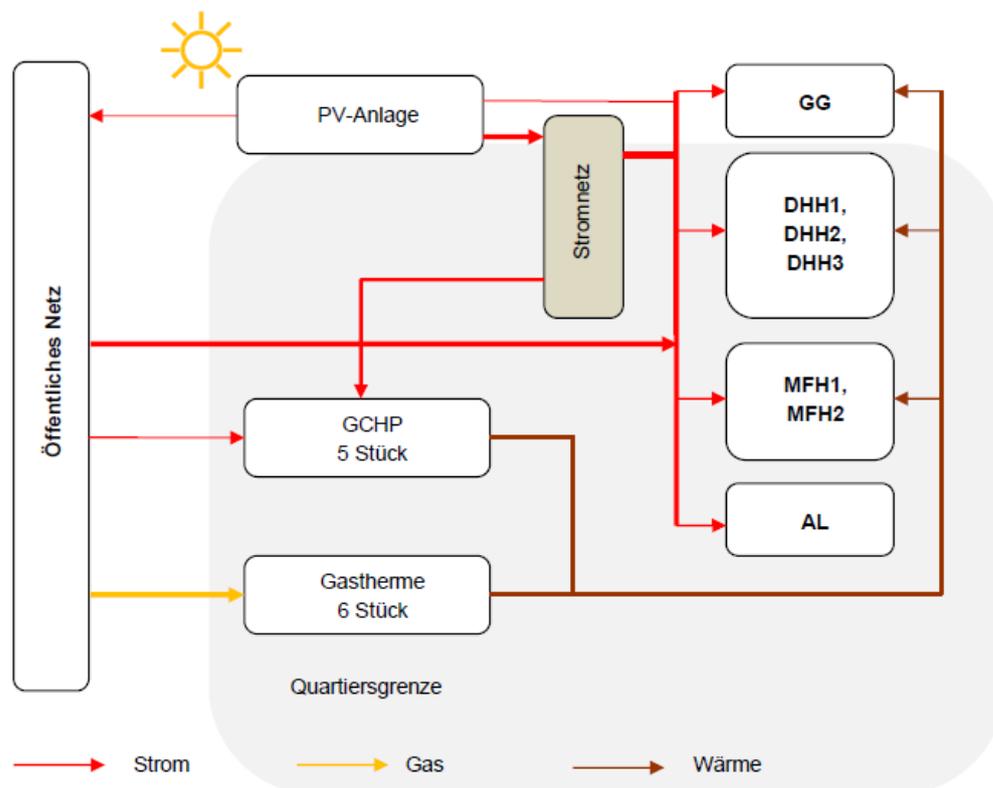
Das IST-Szenario zeichnet sich durch die Strom- und Gasversorgung über das öffentliche Netz aus. Die relevanten Technologien zur Strom- und Wärmebereitstellung für die beiden optimierten Szenarien (Szenario 2 und 3) werden in Abbildung 7 und Abbildung 8 gezeigt.



**Abbildung 7.** Überblick über das CO<sub>2</sub>-minimierte Szenario. Die Richtungen der Pfeile stehen für die Strömungsrichtung. DHH = Doppelhaushälfte, GG = Geschäftsgebäude, MFH = Mehrfamilienhaus, AL= Ampeln und Laternen. Die bereits im Quartier vorhandenen Gasthermen werden zurückgebaut.

Beim CO<sub>2</sub>-minimierten Szenario (Abbildung 7) wird der Energie- und Wärmebedarf über lokale Wärme- und Stromnetze abgedeckt. Da mehr Strom produziert als verbraucht wird, kann Strom in das öffentliche Netz eingespeist werden. Wärme wird durch eine Oberflächenwasserwärmepumpe (SWHP) und durch ein Blockheizkraftwerk (BHKW) bereitgestellt, welches Gas aus dem öffentlichen Netz bezieht.

In Abbildung 8 ist das kostenminimierte Szenario dargestellt. Die einzelnen Gebäude werden jeweils von einer Gastherme und von einer GCHP versorgt. Im Vergleich zu dem CO<sub>2</sub>-optimierten Szenario gibt es kein Wärmenez im Quartier.



**Abbildung 8. Überblick über das kostenminimierte Szenario. Die Richtungen der Pfeile stehen für die Strömungsrichtung. DHH= Doppelhaushälfte, GG= Geschäftsgebäude, MFH = Mehrfamilienhaus, AL = Ampeln und Laternen.**

Das kostenminimierte Szenario zeichnet sich durch ein lokales Stromnetz aus, besitzt aber kein lokales Wärmenetz. Zudem wird weiterhin Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen. Wärme wird ebenfalls über die Gastherme gewonnen, aber zusätzlich noch über eine erdgekoppelte Wärmepumpe (GCHP). In Tabelle 4 sind die bereitgestellten und genutzten Wärme- und Energiemengen der Szenarien aufgeführt.

**Tabelle 4. Wärme und Energieverbrauch der Szenarien**

Szenario	Wärmebereitstellung [kWh/Jahr]	Strom, der für Wärme genutzt wird [kWh/Jahr]	Strombereitstellung (total) [kWh/Jahr]
IST-Szenario	629 432	0	132 210
Kostenoptimiert	629 432	128 568	260 778
CO <sub>2</sub> -optimiert	629 432	104 530	236 740

In Tabelle 5 ist eine Übersicht zur Nutzungsdauer der Technologien sowie entsprechende Literaturquellen, die als Grundlage der Modellierung der verschiedenen Lebenszyklusphasen dienen, dargestellt.

**Tabelle 5. Übersicht zur Nutzungsdauer der Technologien sowie entsprechende Literaturquellen, die als Grundlage der Modellierung der verschiedenen Lebenszyklusphasen dienen nach Quest (2021)**

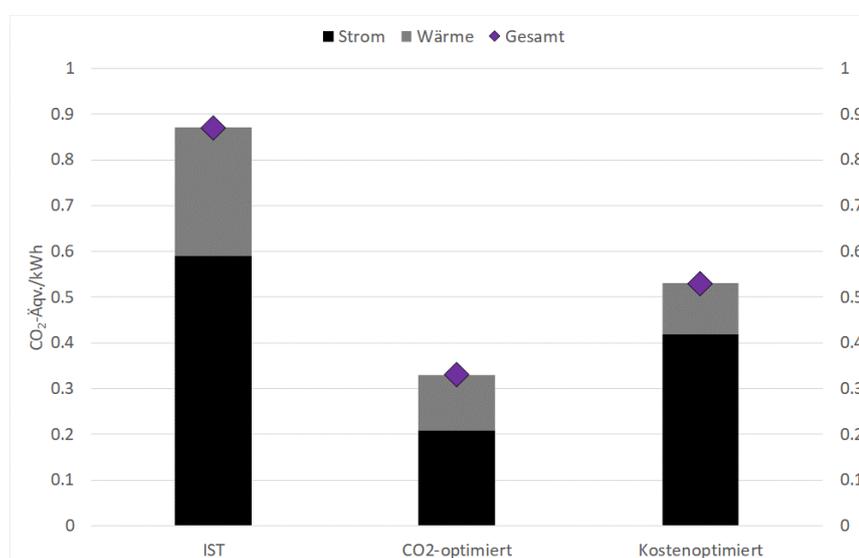
Technologie	Nutzungsdauer	Lebenszyklusphase	Quellen zur Modellierung der Lebenszyklusphase
<b>Batteriespeicher</b>	19 Jahre (Le Varlet et al. 2020)	Produktion	Li-Fe-Phosphat (Le Varlet et al. 2020)
		EoL	Batteriespeicher (Vandepaer et al. 2019)
<b>PV-Modul 153 W/m<sup>2</sup> (IST-Szenario), 190 W/m<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub> Szenario)</b>	PV Modul- 30 Jahre (Fthenakis und Raugei 2017; Muteri et al. 2020) Inverter: 15 Jahre	Produktion	Glass des PV-Moduls (Fu et al. 2015)
			PV-Module (Hong et al. 2016)
			Inverter (Ecoinvent 2020)
		EoL	PV-Systeme (Ardente et al. 2019; Deng et al. 2019)
<b>Blockheizkraftwerk</b>	60000 Stunden	Produktion	CHP (Sphera Solutions Inc. 2021)
		Nutzungsphase	Gas (Sphera Solutions Inc. 2021)
		EoL	CHP (Kelly et al. 2014)
<b>Lokales Wärmenetz</b>	50 Jahre	Produktion	Wärmeleitung
			Graben (Sphera Solutions Inc. 2021)
		EoL	Wärmeleitung
<b>Gasboiler</b>	15 Jahre	Produktion	Gasboiler (Sphera Solutions Inc. 2021)
		Nutzungsphase	Gas (Sphera Solutions Inc. 2021)
		EoL	95 % Recycling (Sphera Solutions Inc. 2021)
<b>Wärmepumpen</b>	20 Jahre (Greening und Azapagic 2012)	Produktion	Wärmepumpen (Greening und Azapagic 2012)
		Nutzungsphase	Kühlmittel, Strom, Instandhaltung (Greening und Azapagic 2012)
		EoL	Wärmepumpen (Greening und Azapagic 2012)

### 4.3 Ergebnisse und Interpretation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanz erläutert. Zunächst wird auf die Wirkungskategorie Klimawandel für das ganze Quartier eingegangen, gefolgt von den Emissionen pro bereitgestellte Kilowattstunde und Emissionen pro Kopf und Jahr. Anschließend werden zusätzlich die Ergebnisse für andere Wirkungskategorien vorgestellt.

Für das IST-Szenario berechnet die Energiemodellierung SESMG jährliche Emissionen von 199 tCO<sub>2äq</sub> pro Jahr für das gesamte Quartier. Die Ökobilanz, modelliert mit GaBi, liefert einen um 24 % höheren Wert, nämlich rund 247 tCO<sub>2äq</sub>. Diese Tendenz setzt sich für die anderen Szenarien fort: Für das kostenoptimierte Szenario berechnet SESMG 130 tCO<sub>2äq</sub> pro Jahr, GaBi dagegen 170 tCO<sub>2äq</sub> pro Jahr. Am geringsten ist der Unterschied beim CO<sub>2</sub>-optimierten Szenario, bei dem die Abweichung nur 20 tCO<sub>2äq</sub> beträgt. Die Energiesystemmodellierung berücksichtigt weniger Infrastruktur und sollte zusammen mit den Emissionsfaktoren des Netzstroms, die in SESMG verwendet werden, weiter evaluiert werden.

Für einen weiteren Vergleich der Szenarien wurden die spezifischen CO<sub>2äq</sub> pro bereitgestellte Kilowattstunde berechnet. Wie in Abbildung 9 zu sehen, können die Emissionen pro bereitgestellte Kilowattstunde in den optimierten Szenarien deutlich gesenkt werden.

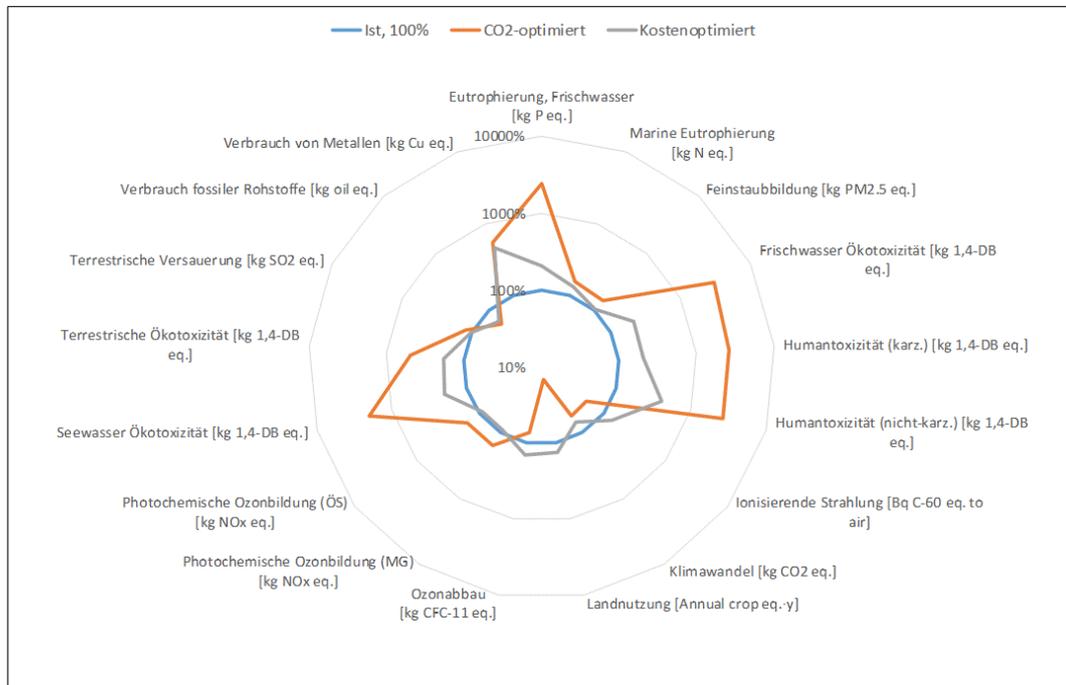


**Abbildung 9. CO<sub>2äq</sub>-Emissionen der verschiedenen Szenarien pro bereitgestellte Kilowattstunde, basierend auf der Modellierung in GaBi**

Für die Wärmeversorgung wird in GaBi für das kostenoptimierte Szenario eine geringere Umweltauswirkung quantifiziert als für das CO<sub>2</sub>-optimierte Szenario. Die Wärmeversorgung des kostenoptimierten Szenarios ist also der des CO<sub>2</sub>-optimierten Szenarios vorzuziehen.

Für den totalen Verbrauch pro Kopf und Jahr ergeben sich für das IST-Szenario spezifische CO<sub>2äq</sub>-Emissionen von 3,23 tCO<sub>2äq</sub> pro Kopf und Jahr; Im CO<sub>2</sub>-optimierten Szenario von 1,64

tCO<sub>2äq</sub> pro Kopf und Jahr und im kostenminimierten Szenario von 1,83 tCO<sub>2äq</sub> pro Kopf und Jahr.



**Abbildung 10. Abweichung der optimierten Szenarien prozentual vom IST-Szenario (100%) in logarithmischer Darstellung für alle ReCiPe-Wirkungskategorien.**

Betrachtet man weitere Wirkungskategorien, wird klar, dass es Zielkonflikte zwischen den verschiedenen Wirkungskategorien gibt. Das CO<sub>2</sub>-minimierte Szenario zeigt hinsichtlich Toxizität und Eutrophierung höhere Auswirkungen, gleichzeitig aber, neben geringeren CO<sub>2äq</sub>-Emissionen, auch eine niedrigere Landnutzung. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 10 mithilfe eines Spinnennetzdiagramms dargestellt, das in logarithmischer Skala die prozentuale Abweichung der Wirkungskategorien von dem IST-Szenario abbildet. Bei der Interpretation dieser Abbildung sollten folgende drei Aspekte berücksichtigt werden:

- (1) Die Ergebnisse der Ökobilanz sind relativ, da sie auf eine funktionelle Einheit bezogen sind (hier: Energie- und Wärmebedarf im Quartier für ein Jahr). Sie lassen somit keine absoluten Aussagen zu, z.B. ob eine Technologie insgesamt nachhaltig ist. Zu dem Thema der so genannten "absolute sustainability" (absolute Nachhaltigkeit) wird derzeit verstärkt geforscht, allerdings gibt es noch keine implementierbaren Lösungen, sodass der Aspekt in der vorliegenden Studie nicht betrachtet wurde.
- (2) Da die ReCiPe-Methode angewendet wurde, sind gesetzliche Grenzwerte nicht berücksichtigt.
- (3) Die Ergebnisse sind midpoint-Werte, sprich: die betrachteten Auswirkungen auf die Umwelt und menschlichen Gesundheit liegen in der Mitte der Ursache-Wirkungskette (z.B. für die Kategorie Klimawandel wird der Wirkungspunkt in der Mitte der Ursache

der Wirkungskette als Anstieg des Strahlungsantriebs gewählt). Daneben können auch Ergebnisse auf Endpunkt-Ebene bereitgestellt werden, sprich: Auswirkungen auf die Umwelt und menschliche Gesundheit, die am Ende der untersuchten Ursache-Wirkungskette liegen (z.B. für die Kategorie Klimawandel ist der Wirkungsendpunkt unter anderem das Sterben von Korallen und der damit einhergehende Verlust von Biodiversität). Somit kann über mehrere Kategorien hinweg der Einfluss auf Menschen (Einheit disability-adjusted life years (DALY)) und die belebte Umwelt (Einheit species years (species yr.)) über einen Single-Score-Indikator dargestellt werden. Es ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten ReCiPe-Endpunkt Werte. Dabei stehen niedrige Werte für geringe Auswirkungen auf die Umwelt und menschliche Gesundheit.

**Tabelle 6. ReCiPe-Endpunkt Werte in den verschiedenen Szenarien.**

Szenario	Ecosystem (Species yr.)	Human Health (DALY)
<b>IST-Szenario</b>	0,0010	0,2605
<b>Kostenoptimiert</b>	0,0015	0,1929
<b>CO<sub>2</sub>-optimiert</b>	0,0032	0,2127
<b>CO<sub>2</sub>-optimiert mit reduzierter Batteriespeicherkapazität</b>	0,0020	0,1817

Die hohen Toxizitätsauswirkungen sind hauptsächlich auf den Inverter und die enthaltenen Leiterplatten des Batteriespeichers im kostenoptimierten Szenario zurückzuführen. Generell sind Toxizitätsauswirkungen in der Ökobilanz noch nicht so zuverlässig quantifizierbar wie z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen und nur ein Unterschied von einigen Größenordnungen sollte als relevant eingestuft werden (Rosenbaum et al. 2008). Allerdings zeigt sich, dass mit geringeren Dimensionierungen von Batteriespeichern im CO<sub>2</sub>-optimierten-Szenario eine reduzierte Umweltauswirkung in vielen Wirkungskategorien erreicht werden kann.

#### 4.4 Implikationen für die Energiesystemmodellierung und die Nutzung von empfohlenen Technologien in der nachhaltigen Quartiersplanung

Die ökobilanzielle Betrachtung ergänzt die Energiesystemmodellierung um Einblicke in zusätzliche Umweltauswirkungen. Es zeigt sich, dass die Energiesystemmodellierung mit der Einschätzung von sinkenden Treibhausgasemissionen zwar passende Ergebnisse liefert, die Emissionen allerdings unterschätzt werden. Hinsichtlich Umweltauswirkungen wie Toxizität und Eutrophierung sollte geprüft werden, ob die Dimensionierung von Batteriespeichern bei gleicher Funktionalität reduziert werden kann. Sie sollten in der nachhaltigen Quartiersplanung sparsamer eingesetzt werden, als dies SESMG zunächst empfiehlt.

## 5 Transformation

Das CO<sub>2</sub>-Emissionsminimum (Soll-Zustand) stellt nicht die praktische Umsetzung dar. Der Algorithmus erreicht zwar den Punkt mit den niedrigsten Emissionen, aber dafür steigen die Kosten sehr stark an. Beispielsweise werden Solarthermieranlagen entlang der Pareto-Kurve erst kurz vor dem Emissionsminimum ausgelegt, wenn finanzielle Aspekte keine Rolle mehr spielen. Das liegt zum einen daran, dass Solarthermieranlagen in Flächenkonkurrenz zu Photovoltaikanlagen stehen und die Photovoltaikanlagen insbesondere wirtschaftlich rentabler sind als Solarthermieranlagen. Zum anderen stehen Solarthermieranlagen in Konkurrenz mit Wärmepumpen und anderen Technologien zur Wärmeversorgung, die aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen besser geeignet sind. Erst wenn die wirtschaftlichen Kriterien vollständig ausgeklammert werden, ersetzen Solarthermieranlagen ökologisch weniger sinnvollere Technologien (elektrische Heizungen, Gasheizungen). Der Anteil an der Wärmeversorgung bleibt für Solarthermieranlagen trotzdem vernachlässigbar gering. In der Praxis wird ein Punkt zwischen dem Kosten- und Emissionsminimum gesucht. Daher wurden für jedes Stadtquartier sechs Simulationsläufe durchgeführt (Abbildung 11). Für beide Stadtquartiere in Herne wurden fünf Optimierungsläufe (grüne Punkte) durchgeführt und der Status Quo (schwarzer Punkt) simuliert. Werden die Optimierungspunkte verbunden entsteht eine Kurve, zuerst mit einer hohen hin zu einer niedrigen Steigung, die nahezu flach verläuft. An dem Punkt, wo sich die Kurve sichtbar krümmt, befindet sich der empfehlenswerten Punkt einer Entscheidung. Der optimale Punkt wird hier auch Transformationsszenario genannt. Für die Beiden Stadtquartiere ist das der vierte Optimierungspunkt, in Abbildung 11 in Rot dargestellt. Ab diesem Punkt steigen die Kosten – und vermutlich die Werte mehrerer Wirkungskategorien der LCA – stark an, sobald die Emissionen weiter gesenkte werden sollen. Alternativ könnte auch Punkt 3 gewählt werden. Beeindruckend ist, dass sich an diesem Punkt die Kosten und Emissionen verringern. Das heißt, eine Kosten- und Emissionsminderungen stehen nicht im Widerspruch zueinander (Budde 2022).

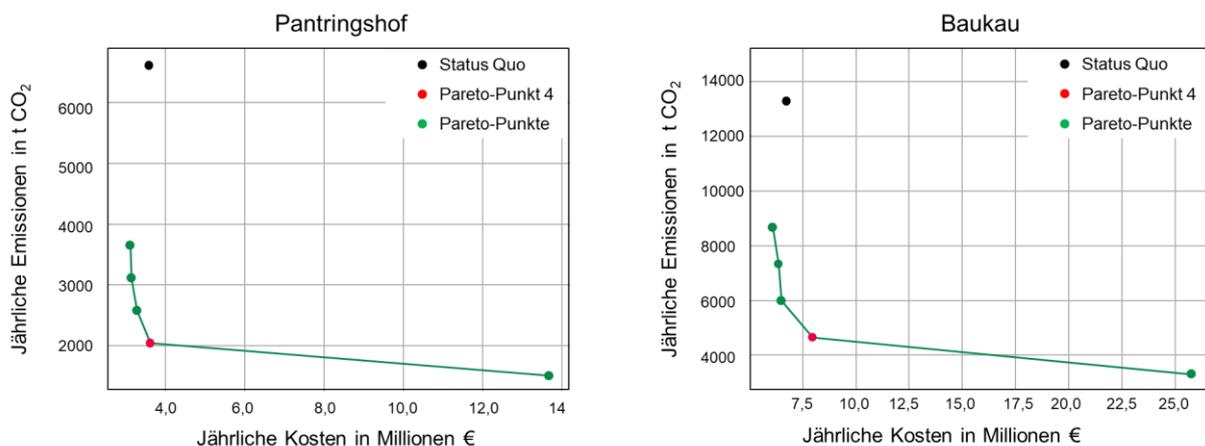


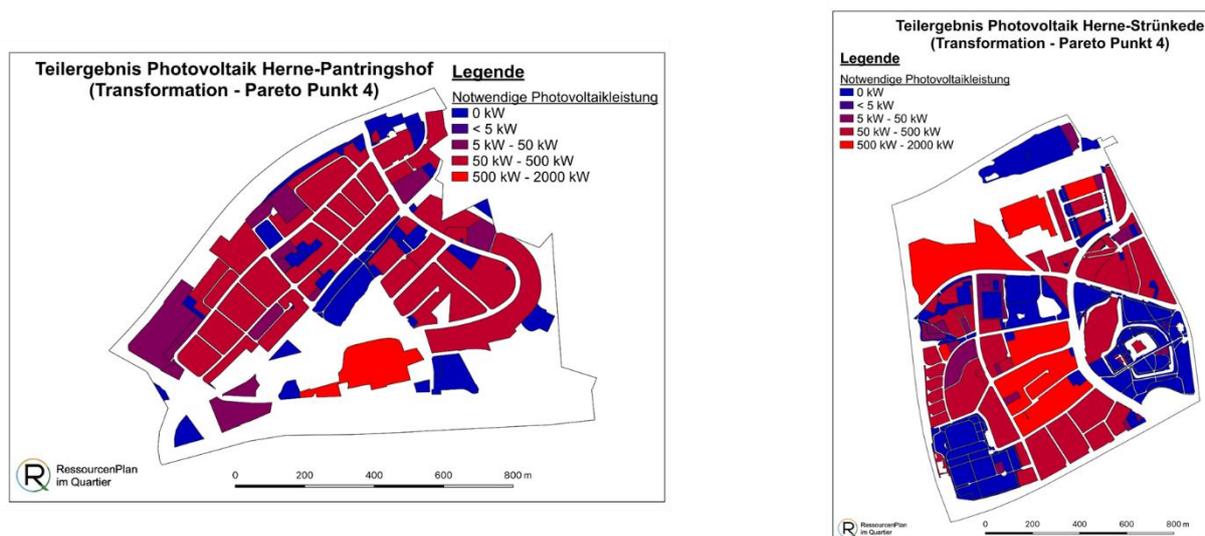
Abbildung 11. Pareto-Kurven beider Quartiere

Tabelle 7 zeigt die relativen Veränderungen gegenüber dem Status Quo beider Transformationsszenarien.

**Tabelle 7. Relative Veränderung vom Transformationsszenario (Optimierungspunkt 4) gegenüber dem Status Quo**

Quartier	Kosten (M€ / a)	CO <sub>2</sub> -Emissionen (tCO <sub>2</sub> / a)	Endenergiebedarf (GWh)	Sekundärenergiebedarf (GWh)
<b>Transformationsszenario (relative Veränderung)</b>				
Baukau	10,57 %	- 65,06 %	- 30,26 %	- 57,76 %
Pantringshof	0,80 %	- 69,01 %	- 35,50 %	- 63,13 %

Für Baukau steigen die Kosten gegenüber den Status Quo um 11 % und für Pantringshof nur um knapp 1 %. Der geringe Anstieg der Kosten ist im Verhältnis zur Reduzierung der Emissionen vertretbar. Die PV-Anlagen haben einen großen Anteil daran, dass die Kosten nur gering ansteigen. Ungefähr 3,00 GWh Strom könnte für Baukau und 1,25 GWh für Pantringshof durch die Photovoltaikanlagen bereitgestellt werden. In Abbildung 12. Photovoltaikanlagenpotential in den Siedlungen der Quartiere sind die Photovoltaik-Potentiale siedlungsspezifisch dargestellt.



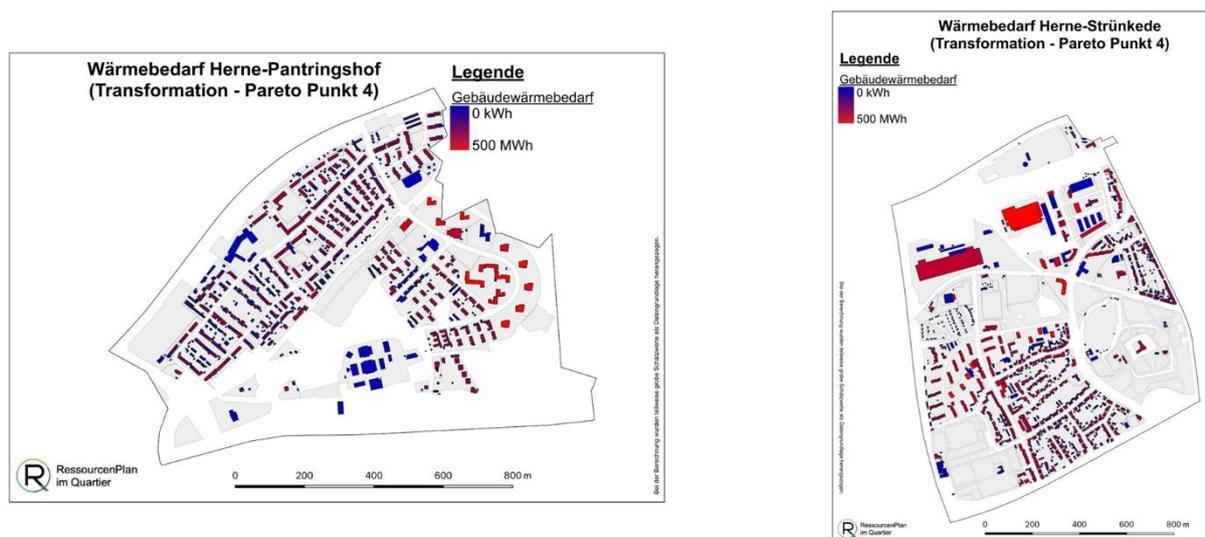
**Abbildung 12. Photovoltaikanlagenpotential in den Siedlungen der Quartiere**

Aufgrund der zeitlichen Unterschiede zwischen Produktion und Verbrauch wird viel PV-Strom exportiert und vergütet. Hierdurch werden die Gesamtsystemkosten verringert. Der Strom wird nur zu kleinen Anteilen in Batteriespeichern zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt genutzt. In der Bachelorarbeit von Budde stellte sich heraus, dass es sinnvoller ist, den PV-Strom für Wärmepumpen zu nutzen. Eine weitere Alternative, die dem Batteriespeicher vorgezogen wird, ist der direkte Verbrauch des Stroms durch Nachbarn. Der Strom wird hierbei über einen lokalen Energiemarkt zur Verfügung gestellt. Batteriespeicher führen zwar dazu, dass mehr Strom im Gebäude verbraucht wird. Allerdings überwiegen die Speicherverluste

gegenüber den Transportverlusten der Verteilungsnetze. Erst wenn das Emissionsminimum erreicht werden soll, ist es sinnvoll Batteriespeicher auszubauen, um den klimaschädlichen Netzbezug weiter zu verringern.

Der gesamte Strombedarf liegt in Baukau bei circa 4,0 GWh und in Pantringshof bei 1,7 GWh Strom. In Baukau stammt 45 % des Strombedarfs von Wärmepumpen und in Pantringshof sogar 59 %. Der restliche Bedarf wird von den Haushalten und Unternehmen benötigt, z. B. für Beleuchtung oder elektrische Geräte benötigt. Der Wärmebedarf liegt bei 6,9 GWh für Baukau und bei 3,6 GWh für Pantringshof.

In Abbildung 13 ist der Wärmebedarf der Quartiere dargestellt. Durch die gebäudescharfe Darstellung ist gut zu erkennen, wie hoch der Wärmebedarf pro Gebäude ist. Die gebäudespezifischen Wärmebedarfe sind abhängig vom Gebäudetyp oder von der Anzahl der Bewohner\*innen. Ob die Gebäude einen zu hohen Wärmebedarf haben, kann erst beurteilt werden, wenn Daten zu durchgeführten Dämmmaßnahmen vorliegen. Im Fallbeispiel lagen keine Daten vor, sodass die U-Werte anhand des Baujahrs und mithilfe von statistischen Daten bestimmt wurden.



**Abbildung 13. Gebäudescharfer Wärmebedarf der beiden Quartiere**

Abbildung 14 zeigt die energetischen Maßnahmen für das Transformationsszenario. Aufgrund des durchschnittlich hohen Gebäudealters und den damit einhergehenden hohen U-Werten, ist eine Dämmung der Außenwand in der Regel eine sinnvolle Investitionsalternative. Eine Dämmung von Fenstern und Dächern vermindert darüber hinaus weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen.

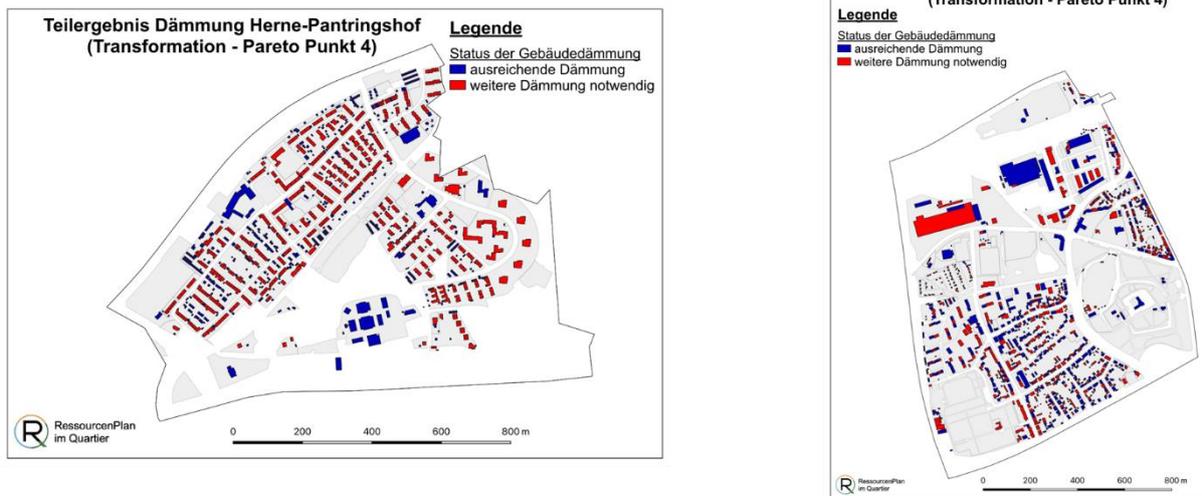


Abbildung 14. Gebäudescharfe energetische Maßnahmen in den Quartieren

Das Wärmemengendiagramm in Abbildung 15 zeigt, wie sich die Wärmeversorgung beider Quartiere zusammensetzt. Deutlich zu erkennen ist, dass Solarthermie-Anlagen und elektrische Heizungen keinen großen Einfluss auf die Wärmeversorgung haben. Elektrische Heizungen sind unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur eine Alternative, um Spitzenlasten zu decken, nicht jedoch hinsichtlich ökologischer Gesichtspunkte. Das Transformationsszenario (Pareto-Punkt 4) ist durch den fetten Strich gekennzeichnet. Um das Transformationsszenario zu erreichen, ist es zum einen wichtig die Gebäude zu dämmen und zum anderen Gasheizungs-Systeme durch Wärmepumpen zu ersetzen. Gasheizungs-Systeme sind bei der Berücksichtigung absoluter monetärer Minima rentabel. Mit zunehmenden Emissionsreduktion sollten diese jedoch durch Wärmepumpen ersetzt werden. Erdwärmepumpen sind – soweit möglich – Luftwärmepumpen vorzuziehen. Erdwärmepumpen sind allerdings durch die verfügbare Grundstücksfläche begrenzt (Budde 2022).

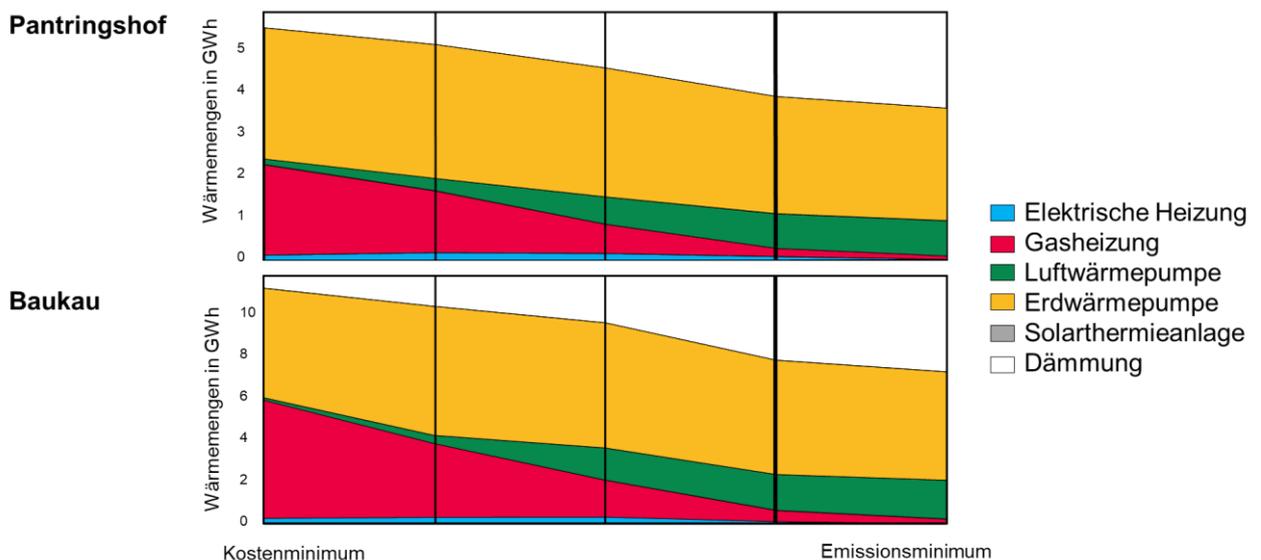


Abbildung 15. Energiemengendiagramm beider Quartiere

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Methodik erfolgreich auf die beiden Testgebiete angewandt wurde. Zwar wurden Komponenten der zentralen Wärmeversorgung aufgrund von Laufzeitproblemen vernachlässigt, jedoch sind die Ergebnisse auf Quartiere übertragbar, in denen ein Wärmenetz durch eine Vorstudie ausgeschlossen werden kann. Voraussetzung für die Übertragbarkeit ist eine vergleichbare Quartiersstruktur. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Modellierung und Optimierung ganzer Stadtquartiere aufwändig sind. Einzelne Gebäude können zwar mithilfe der Dokumentation erstellt werden, für ganze Stadtquartiere wird jedoch weitaus mehr Expertise erfordert. Allein die Datenakquise beansprucht schnellere mehrere Wochen (Budde 2022).

# III. Anhang

## Literaturverzeichnis

- Ardente, F., Latunussa, C.E.L., Blengini, G.A. (2019): „Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling“. In: *Waste Management*. 91 , S. 156–167, doi: 10.1016/j.wasman.2019.04.059.
- Becker, G., Klemm, C., Vennemann, P. (2022): „Open Source District Heating Modeling Tools-A Comparative Study“. In: *Energies*. 15 (21), S. 8277, doi: 10.3390/en15218277.
- Budde, J. (2022): „Leitfaden zur Modellierung von Energiesystemen“. (Masterarbeit (unveröffentlicht)) Steinfurt: FH Münster.
- Budde, J. (2020): „Wärmepumpen in Stadtquartieren. Untersuchung anhand eines Quartiers in Herne“. (Bachelorarbeit (unveröffentlicht)) Steinfurt: FH Münster.
- Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z., Chong, C.M. (2019): „A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 109 , S. 532–550, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.020.
- Ecoinvent (2020): „Ecoinvent database“. Abgerufen von [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- Fthenakis, V., Raugei, M. (2017): „Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems“. In: Pearsall, N. (Hrsg.) *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modeling, Measurement and Assessment*. Woodhead Publishing S. 209–232, doi: 10.1016/B978-1-78242-336-2.00007-0.
- Fu, Y., Liu, X., Yuan, Z. (2015): „Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China“. In: *Journal of Cleaner Production*. 86 , S. 180–190, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.057.
- Greening, B., Azapagic, A. (2012): „Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK“. In: *Energy*. 39 (1), S. 205–217, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.028.
- Guinée, J.B., Cucurachi, S., Henriksson, P.J.G., Heijungs, R. (2018): „Digesting the alphabet soup of LCA“. *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi: 10.1007/s11367-018-1478-0.
- Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., Xu, C. (2016): „Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China“. In: *Solar Energy*. 133 , S. 283–293, doi: 10.1016/j.solener.2016.04.013.
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R. (2017): „ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level“. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- Jaccard, M. (2006): *Sustainable fossil fuels: The unusual suspect in the quest for clean and enduring energy*. Reprinted. Cambridge: Cambridge Univ. Press doi: 10.1017/CBO9780511754104.
- Kelly, K.A., McManus, M.C., Hammond, G.P. (2014): „An energy and carbon life cycle assessment of industrial CHP (combined heat and power) in the context of a low carbon UK“. In: *Energy*. 77 , S. 812–821, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.051.

- Klemm, C. (2020): „*Modelling and Optimization of Multi-Energy Systems in Mixed-Use Districts: An Exemplary Application*“. (Masterarbeit (unveröffentlicht)) Steinfurt: FH Münster.
- Klemm, C., Budde, J., Becker, G., Vennemann, P. (2022a): „*The Spreadsheet Energy System Model Generator*“. Abgerufen 27.04.2022 von <https://spreadsheet-energy-system-model-generator.readthedocs.io/en/latest/>.
- Klemm, C., Vennemann, P. (2021a): „*Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches*“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 135 , S. 110206, doi: 10.1016/j.rser.2020.110206.
- Klemm, C., Vennemann, P. (2021b): „*Modellierung und Optimierung urbaner Energiesysteme im Projekt R2Q*“. In: Nordhausen S. 177–188.
- Klemm, C., Wiese, F. (2022): „*Indicators for the optimization of sustainable urban energy systems based on energy system modeling*“. In: *Energy Sustainability and Society*. 12 (3), doi: 10.1186/s13705-021-00323-3.
- Klemm, C., Wiese, F., Vennemann, P. (2022b): (Preprint) *Model-based run-time and memory optimization for a mixed-use multi-energy system model with high spatial resolution*.
- Le Varlet, T., Schmidt, O., Gambhir, A., Few, S., Staffell, I. (2020): „*Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage*“. In: *Journal of Energy Storage*. 28 , S. 101230, doi: 10.1016/j.est.2020.101230.
- Loiseau, E., Aissani, L., Le Féon, S., Laurent, F., Cerceau, J., Sala, S., Roux, P. (2018): „*Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda*“. In: *Journal of Cleaner Production*. 176 (1), S. 474–485, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.169.
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., Parisi, M.L. (2020): „*Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels*“. In: *Energies*. 13 (1), S. 252, doi: 10.3390/en13010252.
- oemof developer (2022): „*oemof: open energy modelling framework*“. Abgerufen von <https://oemof.org/>.
- Quest, G. (2021): „*Ökobilanzfallstudie von Energieversorgungszenarien auf Quartiersebene in der Stadt Herne*“. (Masterarbeit (unveröffentlicht)) Berlin: Technische Universität Berlin.
- Quest, G., Arendt, R., Klemm, C., Bach, V., Budde, J., Vennemann, P., Finkbeiner, M. (2022): „*Integrated life cycle assessment (LCA) of power and heat supply for a neighborhood: a case study of Herne, Germany*“. In: *Energies*. 15 (16), S. 5900, doi: 10.3390/en15165900.
- Rosales Carreón, J., Worrell, E. (2018): „*Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism*“. In: *Resources, Conservation and Recycling*. 132 , S. 258–266, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.004>.
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., Van De Meent, D., Hauschild, M.Z. (2008): „*USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and*

*freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment*“. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*. 13 , S. 532–546, doi: 10.1007/s11367-008-0038-4.

Rutledge, K., Ramroop, T., Boudreau, D., McDaniel, M., Teng, S., Sprout, E., Costa, H., Hall, H., Hunt, J., National Geographic Society (Hrsg.) (2011): „*Urban area: An urban area is the region surrounding a city*“.

Sphera Solutions Inc. (2021): „*GaBi Datenbank*“.

Vandepaer, L., Cloutier, J., Bauer, C., Amor, B. (2019): „*Integrating Batteries in the Future Swiss Electricity Supply System: A Consequential Environmental Assessment*“. In: *Journal of Industrial Ecology*. 23 (3), S. 709–725, doi: 10.1111/jiec.12774.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Prozessablauf des SESMG .....	4
Abbildung 2.	Modellkonzeption am Beispiel einer Erdwärmepumpe (Budde 2020).....	7
Abbildung 3.	Optimiertes Energiesystem eines Testgebiets in Baukau (Budde 2020) .....	7
Abbildung 4.	Wärmeversorgung einer Doppelhaushälfte im Testgebiet in Baukau (Budde 2020) ....	9
Abbildung 5.	Bewertungsmethodik .....	13
Abbildung 6.	Überblick über den IST-Szenario. Die Richtungen der Pfeile stehen für die Strömungsrichtung. DHH = Doppelhaushälfte, GG = Geschäftsgebäude, MFH = Mehrfamilienhaus, AL = Ampeln und Laternen .....	18
Abbildung 7.	Überblick über das CO <sub>2</sub> -minimierte Szenario. Die Richtungen der Pfeile stehen für die Strömungsrichtung. DHH = Doppelhaushälfte, GG = Geschäftsgebäude, MFH = Mehrfamilienhaus, AL= Ampeln und Laternen. Die bereits im Quartier vorhandenen Gasthermen werden zurückgebaut.....	19
Abbildung 8.	Überblick über das kostenminimierte Szenario. Die Richtungen der Pfeile stehen für die Strömungsrichtung. DHH= Doppelhaushälfte, GG= Geschäftsgebäude, MFH = Mehrfamilienhaus, AL = Ampeln und Laternen. ....	20
Abbildung 9.	CO <sub>2</sub> äq-Emissionen der verschiedenen Szenarien pro bereitgestellte Kilowattstunde, basierend auf der Modellierung in GaBi .....	22
Abbildung 10.	Abweichung der optimierten Szenarien prozentual vom IST-Szenario (100%) in logarithmischer Darstellung für alle ReCiPe-Wirkungskategorien.....	23
Abbildung 11.	Pareto-Kurven beider Quartiere.....	26
Abbildung 12.	Photovoltaikanlagenpotential in den Siedlungen der Quartiere .....	27
Abbildung 13.	Gebäudescharfer Wärmebedarf der beiden Quartiere .....	28
Abbildung 14.	Gebäudescharfe energetische Maßnahmen in den Quartieren .....	29
Abbildung 15.	Energiemengendiagramm beider Quartiere .....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.	Auszug aus dem Tabellenblatt .....	5
Tabelle 2.	Betrachtete Maßnahmen im Maßnahmenkatalog und im SESMG .....	10
Tabelle 3.	Status Quo und emissionsoptimierte Simulation beider Quartiere .....	15
Tabelle 4.	Wärme und Energieverbrauch der Szenarien .....	20
Tabelle 5.	Übersicht zur Nutzungsdauer der Technologien sowie entsprechende Literaturquellen, die als Grundlage der Modellierung der verschiedenen Lebenszyklusphasen dienen nach Quest (2021) .....	21
Tabelle 6.	ReCiPe-Endpunkt Werte in den verschiedenen Szenarien.....	24
Tabelle 7.	Relative Veränderung vom Transformationsszenario (Optimierungspunkt 4) gegenüber dem Status Quo.....	27