



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Fachbereich
Energie · Gebäude · Umwelt

Energiesystemmodellierung auf Basis energetischer Stadtraumtypen

Bachelorarbeit

31. Januar 2025
Tim Mikku Steinort
tim.steinort@fh-muenster.de

Erstprüfer: Prof. Dr. Peter Vennemann
Zweitprüfer: Jan N. Tockloth M.Eng.

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen einer Bachelorarbeit und ist unter der DOI: <https://doi.org/10.25974/fhms-18709> in leicht angepasster Form verfügbar.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | IV |
| Tabellenverzeichnis | V |
| Abkürzungsverzeichnis | VI |
| Zusammenfassung | 1 |
| Abstract | 2 |
| 1. Einleitung | 3 |
| 2. Methodik | 4 |
| 2.1. Modellierungsansatz in FutureBEEing | 4 |
| 2.2. Literaturrecherche zur energetischen Leitplanung | 6 |
| 3. Grundlagen | 7 |
| 3.1. Energetische Quartiersplanung | 7 |
| 3.1.1. Definition von Quartieren | 7 |
| 3.1.2. Entwicklung und Planung von Quartieren | 7 |
| 3.1.3. Analytischer Ansatz zur Modellierung von Quartieren | 9 |
| 3.2. Energiesystemmodellierung mit dem SESMG | 10 |
| 3.3. Forschungsprojekt FutureBEEing | 11 |
| 3.3.1. Nachhaltige Quartierstransformation | 11 |
| 3.3.2. Anforderung an das FutureBEEing-Tool | 12 |
| 3.4. Abgrenzung energetischer Leitplanung zur Energiesystemmodellierung . . | 13 |
| 4. Ansätze der energetischen Leitplanung von Quartieren | 14 |
| 4.1. Einteilung nach Roth | 14 |
| 4.2. UrbanReNet | 15 |
| 4.3. D-ECA und MODER | 18 |
| 4.4. TABULA und EPISCOPE | 19 |
| 4.5. SimStadt | 21 |
| 5. Analyse bestehender Ansätze | 22 |
| 5.1. Konzept zur Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG | 22 |
| 5.2. Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte | 23 |
| 5.2.1. Einteilung nach Roth | 23 |
| 5.2.2. UrbanReNet | 24 |
| 5.2.3. D-ECA und MODER | 24 |
| 5.2.4. TABULA und Episcopo | 25 |
| 5.2.5. SimStadt | 26 |
| 5.2.6. SESMG | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3. Bewertung der Untersuchungsschwerpunkte | 28 |
| 6. Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG | 29 |
| 6.1. Hybrider Modellierungsansatz | 29 |
| 6.2. Eingangparameter in UrbanReNet | 30 |
| 6.3. Vereinfachtes Konzept zur Bedarfsermittlung | 33 |
| 6.4. Eingangparameter im SESMG | 34 |
| 6.4.1. Abgrenzung quartierspezifischer Parameter | 34 |
| 6.4.2. Auswahl relevanter Eingangparameter | 35 |
| 6.4.3. Kategorisierung relevanter Eingangparameter | 37 |
| 6.4.4. Bedarfsabhängige Parameter | 38 |
| 6.4.5. Potentialabhängige Parameter | 40 |
| 7. Diskussion und Fazit | 42 |
| 7.1. Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG | 42 |
| 7.2. Anwendung der Ergebnisse | 44 |
| 7.3. Kritische Bewertung der Ergebnisse | 45 |
| 8. Ausblick | 46 |
| Danksagung | 47 |
| Literaturverzeichnis | 54 |
| A. Energetische Stadtraumtypen aus UrbanReNet | 55 |
| Eidesstattliche Erklärung | 61 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 2.1. Modellierungsansatz von Quartieren zur überschlägigen Betrachtung einer Strom- und Wärmeversorgung. | 4 |
| 3.1. Prinzip des Top-down-Ansatzes und Bottom-up-Ansatzes. | 9 |
| 3.2. Prinzip des Hybrid-Ansatzes. | 10 |
| 3.3. Planungsphasen der Quartierstransformation. | 13 |
| 5.1. Konzept zur Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG. | 22 |
| 5.2. Untersuchungsschwerpunkte von UrbanReNet. | 24 |
| 5.3. Untersuchungsschwerpunkte von D-ECA und MODER. | 25 |
| 5.4. Untersuchungsschwerpunkte von TABULA und EPISCOPE. | 26 |
| 5.5. Untersuchungsschwerpunkte von SimStadt. | 26 |
| 5.6. Untersuchungsschwerpunkte des SESMG. | 27 |
| 6.1. Hybrider Modellierungsansatz zur Entwicklung energetischer Stadtraumtypen. | 29 |
| 6.2. Ablaufschema zur Spezifizierung energetischer Stadtraumtypen im Softwaretool von UrbanReNet. | 30 |
| 6.3. Kostenaufteilung nach einem vereinfachten Bedarfskonzept. | 33 |
| 6.4. Bedarfsabhängige Parameter des SESMG. | 38 |
| 6.5. Potenzialabhängige Parameter des SESMG. | 40 |
| 7.1. Ergebnismatrix der Parameter zur Einteilung energetischer Stadtraumtypen. | 43 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| 4.1. Die neun Siedlungstypen nach Roth. | 14 |
| 4.2. Einteilung energetischer Stadtraumtypen in UrbanReNet. | 16 |
| 4.3. Bibliothek der Gebäudetypen des D-ECA. | 19 |
| 4.4. Baualterklassen aus TABULA. | 20 |
| 6.1. Quartiersspezifische Eingangsparameter des SESMG. | 36 |
| A.1. Energetischer Stadtraumtypen aus UrbanReNet. | 55 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------|---|
| BAK | Baualterklassen |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| BMWK | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz |
| D-ECA | District Energy Concept Adviser |
| EnEff:Stadt | Energieeffiziente Stadt |
| EPISCOPE | Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks |
| ESM | Energiesystemmodellierung |
| EST | energetische Stadtraumtypen |
| EU | Europäische Union |
| FB | FutureBEEing |
| MODER | Mobilization of Innovative Design Tools for Refurbishing of Buildings at District Level |
| oemof | Open Energy Modelling Framework |
| PV | Photovoltaik |
| SESMG | Spreadsheet Energy System Model Generator |
| TABULA | Typology Approach for Building Stock Energy Assessment |
| THG | Treibhausgas |
| UrbanReNet | UrbanReNet - Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum |
| WBGU | Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung |

Zusammenfassung

Die Energiewende und die angestrebte Treibhausgasneutralität erfordern unter anderem eine Transformation des Gebäudesektors, welcher für 30 % der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Mit der zunehmenden Verbreitung sektorgekoppelter Technologien wird die Optimierung von Energiesystemen jedoch immer komplexer. Die Energiesystemmodellierung bietet eine Möglichkeit, Energiesysteme hinsichtlich Kosten und Treibhausgasemissionen zu optimieren. Die Anwendung wird jedoch aufgrund des Bedarfs an Rechenressourcen und langen Rechenzeiten eingeschränkt.

Das Forschungsprojekt FutureBEEing entwickelt einen integrierten Ansatz zur nachhaltigen Transformation von Wohnquartieren. Der entwickelte Modellierungsansatz zeigt eine ressourcenschonende Möglichkeit, die Ergebnisqualität zur Optimierung von Quartieren vereinfacht, nach der Energiesystemmodellierung, anzuwenden. Hierfür werden energetische Stadtraumtypen definiert, die den Wohngebäudebestand Deutschlands in typische Siedlungsräume einteilen. Durch die Erstellung einer Datenbank ist die Optimierung der Energiesysteme der energetischen Stadtraumtypen nur einmalig notwendig. Die detaillierten Ergebnisse werden anschließend auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Eine Optimierung eines jeden Untersuchungsgebiets entfällt somit.

Der Modellierungsansatz aus FutureBEEing basiert auf einem Hybrid-Ansatz, der Elemente aus Bottom-up- und Top-down-Ansätzen kombiniert. Auf Grundlage der definierten Anforderungen aus FutureBEEing an den Modellierungsansatz werden Forschungsprojekte zur energetischen Leitplanung und der Spreadsheet Energy System Model Generator untersucht und eingeordnet. Die Untersuchung zeigt, dass die energetischen Stadtraumtypen aus dem Projekt UrbanReNet für eine Implementierung in den Spreadsheet Energy System Model Generator geeignet sind. Die Einteilung der energetischen Stadtraumtypen erfolgt basierend auf einer Untersuchung der Eingangsparameter des Spreadsheet Energy System Model Generator. Diese Untersuchung ermöglicht eine Einteilung der Parameter in modellbildende, potenzialabhängige und bedarfsabhängige Parameter. Ein Konzept zur vereinfachten Bedarfsermittlung und festgestellte Korrelationen zwischen den Parametern reduzieren die Anzahl relevanter Parameter zur Einteilung energetischer Stadtraumtypen.

Für die Anwendung des Modellierungsansatzes in FutureBEEing sind basierend auf den energetischen Stadtraumtypen aus UrbanReNet die Parameter Bewohnerzahl, Gebäudegröße, Sanierungsstufe, Dachausrichtung und Standort für die weitere Einteilung energetischer Stadtraumtypen relevant. Zukünftige Untersuchungen zu den Ausprägungsstufen dieser Parameter sowie eine Validierung der Ergebnisse sind erforderlich, um den Modellierungsansatz weiterzuentwickeln und eine Anwendung in FutureBEEing zu ermöglichen.

Schlagerworte: *Energetische Stadtraumtypen, Energiesystemmodellierung, Spreadsheet Energy System Model Generator, Nachhaltige Stadtentwicklung, Quartierstransformation*

Abstract

The energy transition and the goal of achieving green house gas neutrality demand urgent action. In Germany, the building sector accounts for 30 % of national green house gas emissions. Energy system modeling provides a method for optimizing energy systems in terms of costs and green house gas emissions. However, with the increasing adoption of sector-coupled technologies, optimizing energy systems is becoming increasingly complex. This leads to higher demands on computing resources for developing optimal electricity and heating supply concepts using energy system modeling.

The research project FutureBEEing develops an integrated approach for the sustainable transformation of residential urban districts. The modeling approach presented in this thesis offers a resource-efficient method for designing optimal supply concepts for urban districts in FutureBEEing. To achieve this, typical urban districts are defined to represent Germany's residential building stock in typical urban districts. By creating a typical urban district database, the optimization of energy systems for these typical urban districts using energy system modeling is only necessary once. A direct optimization of an investigated district is not required, as the modeling approach is based on the results of the predefined typical urban districts.

This thesis defines and explains the concept of energy district planning and presents analytical approaches to the modeling of districts. The modeling approach from FutureBEEing is based on a hybrid approach that combines elements of bottom-up and top-down approaches. Based on the defined requirements from FutureBEEing for the modeling approach, research projects on energy district planning and the Spreadsheet Energy System Model Generator are analyzed and categorized. The analysis shows that the typical urban districts from the UrbanReNet project are suitable for implementation in the Spreadsheet Energy System Model Generator. The classification of typical urban districts is based on an analysis of the input parameters of the Spreadsheet Energy System Model Generator. This investigation leads to the categorization of parameters into model-building, potential-dependent, and demand-dependent parameters. A simplified demand concept and identified correlations between parameters reduce the number of relevant parameters required for classifying typical urban districts. For applying the modeling approach in FutureBEEing, parameters such as the number of residents, building size, renovation stage, roof orientation, and location are relevant for classifying typical urban districts.

The parameters developed in this thesis form the basis for creating a typical urban districts database based on the modeling approach from FutureBEEing. Future studies on the parameter specifications and validation of the results are necessary to further develop the modeling approach and enable its application in FutureBEEing.

Keywords: *Energy transition, Urban districts, Energy system modeling, Spreadsheet Energy System Model Generator, Sustainable transformation*

1. Einleitung

In Deutschland ist der Gebäudesektor für 30 % der nationalen Treibhausgas (THG)-Emissionen verantwortlich [1]. Die Bundesregierung hat das Ziel formuliert, bis zum Jahr 2045 Netto-THG-Neutralität zu erreichen [2]. Eine nachhaltige Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden ist ein zentraler Baustein zur Erreichung dieses Ziels [3].

Das Forschungsprojekt FutureBEEing (FB) entwickelt einen integrierten Ansatz zur nachhaltigen Transformation von Wohnquartieren in Deutschland und den Niederlanden. Dieser Ansatz vereint Aspekte wie Klimaanpassung, den Umstieg auf erneuerbare Energien sowie die Verbesserung der Lebensqualität im Wohnsektor. Geplant ist die Entwicklung eines Softwaretools, das eine schnelle Bereitstellung nachhaltiger Transformationsszenarien ermöglicht. Diese Transformationsszenarien beinhalten unter anderem eine nachhaltige Strom- und Wärmeversorgung von Quartieren [4]. Die Energiesystemmodellierung (ESM) bietet eine Methode zur optimalen Gestaltung der Strom- und Wärmeversorgung von Quartieren. Die Methode ist besonders bei komplexen Energiesystemen mit hohen Anforderungen an Rechenzeit und Rechenressourcen verbunden [5]. Daher ist für die Erstellung möglicher Transformationsszenarien im Softwaretool von FB eine ressourcenschonende Methode notwendig.

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist ein im Rahmen von FB entwickelter Modellierungsansatz. Dieser Ansatz ermöglicht eine ressourcenschonende und schnelle Gestaltung optimaler Strom- und Wärmeversorgungskonzepte für Quartiere. Dabei wird die Methode der ESM mit vordefinierten energetische Stadtraumtypen (EST) kombiniert. Die Grundlage dafür bilden das Open-Source-Tool Spreadsheet Energy System Model Generator (SESMG) sowie Ansätze zur energetischen Leitplanung. Ziel des Modellierungsansatzes ist die Implementierung von EST in den SESMG.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Entwicklung von Parametern zur Einteilung von EST auf Basis des SESMG. EST bilden den aktuellen Gebäudebestand durch vordefinierte typische Siedlungsräume ab. Hierfür sind Parameter erforderlich, die EST beschreiben und voneinander differenzieren. Grundlage für die Untersuchung und Einteilung von EST bildet der Gebäudebestand von Nordrhein-Westfalen.

Das Ziel der Arbeit besteht darin, die relevanten Parameter für die Einteilung von EST zu identifizieren und die Anzahl dieser Parameter auf wenige, aber aussagekräftige Kriterien zu reduzieren. Die Eingangsparameter des SESMG dienen als Basis für die Entwicklung dieser Parameter. Die folgende Forschungsfrage wird in der Arbeit untersucht:

Forschungsfrage: Nach welchen Kriterien können EST eingeteilt werden, um Quartiere mithilfe der ESM nachhaltig zu transformieren?

2. Methodik

2.1. Modellierungsansatz in FutureBEEing

Im Forschungsprojekt **FB** wurde ein Modellierungsansatz entwickelt, der die Anforderungen an Rechenressourcen bei der Entwicklung optimaler Strom- und Wärmeversorgungskonzepte für Quartiere reduziert.

Der Ansatz basiert auf der Nutzung einer Datenbank, die optimierte Energiesysteme typischer **EST** enthält. Bei der Anwendung dieser Methode wird das Untersuchungsquartier nicht direkt optimiert, sondern eine Zuordnung zu den vordefinierten **EST** und deren optimierten Energiesystemen vorgenommen. **EST** sind Stadträume mit ähnlichen baustrukturellen Eigenschaften und vergleichbaren energetischen Eigenschaften in Bezug auf ihre Potenziale und Bedarfe [6].

Der Modellierungsansatz aus **FB** ist in **Abbildung 2.1** dargestellt.

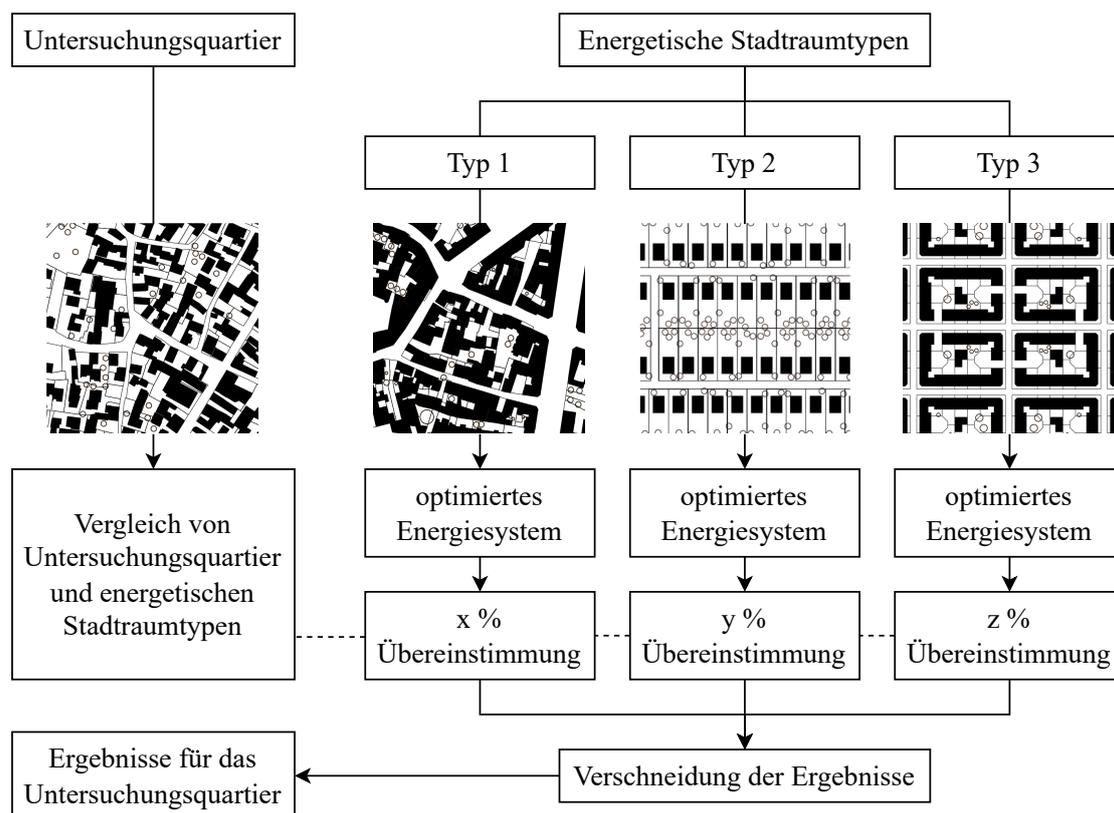


Abbildung 2.1.: Modellierungsansatz von Quartieren zur überschlägigen Betrachtung einer Strom- und Wärmeversorgung in **FB**. Eigene Darstellung nach den **EST** aus [7].

Die Entwicklung und Anwendung folgt einem mehrstufigen Verfahren. Die **EST**-Datenbank

wird vor der Anwendung des Modellierungsansatzes einmalig aufgestellt. Die Anwendung beinhaltet den Vergleich von Untersuchungsquartier und **EST**, die Verschneidung der optimierten Energiesysteme und die Ausgabe von Ergebnissen.

EST-Datenbank Im ersten Schritt wird eine **EST**-Datenbank aufgebaut, die typische **EST** und deren optimierte Energiesysteme enthält. Die optimierten Energiesysteme umfassen ein individuelles Strom- und Wärmeversorgungskonzept von jedem **EST**. Diese Optimierung erfolgt für jeden **EST** einmalig mithilfe der **ESM** (vergleiche [Kapitel 3.2](#)) und ist unabhängig von der Analyse eines konkreten Untersuchungsquartiers. Die Einteilung der **EST** erfolgt anhand von Parametern, die in [Kapitel 6](#) entwickelt werden.

Vergleich von Untersuchungsquartier und EST Das Untersuchungsquartier wird anhand definierter Kriterien mit den **EST** aus der Datenbank verglichen und einem oder mehreren **EST** zugeordnet. Die **EST**, die die höchste prozentuale Übereinstimmung mit dem Untersuchungsquartier aufweisen, liefern die Grundlage für eine nachfolgende Verschneidung.

Verschneidung der optimierten Energiesysteme Die optimierten Energiesysteme der relevanten **EST** werden miteinander kombiniert, um ein Transformationsszenario für das Untersuchungsquartier zu erstellen. Diese Verschneidung erfolgt auf Basis der prozentualen Übereinstimmung der **EST** mit dem Untersuchungsquartier. Die Verschneidung ermöglicht es, Untersuchungsquartieren mit baustrukturellen oder energetischen Eigenschaften mehrerer **EST** ein kombiniertes Ergebnis zuzuweisen.

Ergebnisse Das Ergebnis dieser Verschneidung bildet die Grundlage für die Planung der Strom- und Wärmeversorgung eines zukünftigen Transformationsszenarios des Untersuchungsquartiers.

Annahmen und Rahmenbedingungen Der Modellierungsansatz basiert auf den folgenden Annahmen:

- Stadträume lassen sich in typische **EST** einteilen.
- Die optimierten Energiesysteme der **EST** können miteinander kombiniert werden.
- Das Ergebnis der Verschneidung stellt ein mögliches Transformationsszenario für das Untersuchungsquartier dar.
- Das Ergebnis der Verschneidung kann mit hinreichender Genauigkeit auf das Untersuchungsquartier übertragen werden.

Ziel Der Modellierungsansatz ermöglicht eine schnelle Bereitstellung von Simulationsergebnissen. Rechenzeiten entstehen lediglich einmalig bei der Erstellung der **EST**-Datenbank. Für die Anwendung sind nur geringe Rechenzeiten zur Verschneidung der Ergebnisse aus der **EST**-Datenbank erforderlich. Dadurch können die Rechenzeiten für die Untersuchung von Quartieren insgesamt deutlich reduziert werden.

2.2. Literaturrecherche zur energetischen Leitplanung

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eingangsparameter zur Einteilung von **EST** für den Modellierungsansatz in **FB** untersucht.

Die Anforderungen an den Modellierungsansatz entstammen dem Forschungsprojekt **FB**. Die Untersuchung der Eingangsparameter basiert auf einer umfassenden Literatur- und Projektrecherche, bei der bestehende Ansätze zur energetischen Leitplanung und deren Verwendbarkeit für die Entwicklung von **EST** analysiert wurden. Der Schwerpunkt liegt auf der Betrachtung von Ansätzen zur überschlägigen Bewertung und Einteilung von Quartieren anhand baustruktureller und energetischer Eigenschaften. Ziel dieser Analyse ist es, die Potenziale bestehender Ansätze zu bewerten sowie Vereinfachungen und Anwendungsmöglichkeiten für die Entwicklung von **EST** in **FB** zu identifizieren.

Die relevanten Ansätze dienen als Grundlage für die Entwicklung möglicher Eingangsparameter. Dafür werden Anforderungen an den Modellierungsansatz aus **FB** definiert, die die Entwicklung der **EST** leiten. Die Eingangsparameter des **SESMG** bilden den Ausgangspunkt für die Auswahl geeigneter Parameter. Diese werden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Einteilung von **EST** kategorisiert und bewertet. Ziel ist es, die Eingangsparameter auf wenige, aber aussagekräftige Parameter zu reduzieren und zusammenzufassen.

3. Grundlagen

3.1. Energetische Quartiersplanung

3.1.1. Definition von Quartieren

Der Begriff "Quartier" wird in der Literatur nicht einheitlich beschrieben und es gibt eine Vielzahl an Definitionen [8].

Nach Alisch [9] grenzt sich ein Quartier von administrativen Bezeichnungen wie Ortsteil, Bezirk oder Stadtteil ab. Es bezeichnet einen sozialen Raum, der unabhängig von administrativen Grenzen ein überschaubares Wohnumfeld bildet. Dabei ähnelt ein Quartier meist einem städtischen Wohnviertel, einer kleinen Gemeinde oder einem Dorf.

Das Forschungsnetzwerk Energiewendebauen beschäftigt sich in der Begleitforschung "Modul 3 Quartiere" mit der Definition des Begriffs "Quartier".

Fehlende politische Definitionen erschweren die Planung und Umsetzung von Quartierskonzepten erheblich. Eine einheitliche Begriffsdefinition könnte diese Prozesse vereinfachen. Schölzel et al. [10] schlagen in diesem Zusammenhang folgende Definition vor:

"Ein Quartier besteht aus einem Verbund von Gebäuden, welche in einem räumlichen und baustrukturellen Zusammenhang stehen [11, 12]. Diese Gebäude verfügen über eine gemeinsame energetische Infrastruktur, welche den gegenseitigen Austausch von Energie ermöglicht und die Versorgungssicherheit gewährleistet."

Diese Definition trägt zur Harmonisierung der Gesetzestexte bei und ermöglicht es, juristische Auseinandersetzungen in der Quartierskonzeptionierung zu minimieren. Dabei können individuelle Ansätze, die an lokale Gegebenheiten und die Sektorenkopplung angepasst sind, berücksichtigt werden [10].

In der [ESM](#) ist es notwendig, das Quartier als Untersuchungsgebiet anhand der Optimierungsziele und Fragestellung der jeweiligen Studie individuell abzugrenzen [13]. Es entsteht eine auf die Untersuchung angepasste, temporäre Quartiersabgrenzung. Diese individuellen Betrachtungsräume führen zu einer funktionalen Abgrenzung. Beispielsweise können zwei benachbarte Stadtgebiete, die durch eine administrative Grenze getrennt sind, durch eine funktionale Abgrenzung gemeinsam erfasst werden. Durch Betrachtung eines funktional abgegrenzten Quartiers können Synergien im Energiesystem, wie beispielsweise die Einbindung eines gemeinsamen Wärmenetzes, besser berücksichtigt werden [10].

3.1.2. Entwicklung und Planung von Quartieren

Schwerpunkte der Quartiersplanung schließen immer häufiger die Identifikation von Effizienzpotenzialen und die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen ein. Dabei rücken integrierte Ansätze, die verschiedene Faktoren der Quartiersentwicklung vereinen, zunehmend in den Vordergrund [14]. Neben der energetischen Versorgung spielen auch

funktionale und ästhetische Aspekte, wie Verkehrsinfrastruktur und architektonische Gestaltung, eine zentrale Rolle [15].

Konventionelle Quartiersplanung In Bestandsquartieren spielte die Energieversorgung in der städtebaulichen Planung lange eine untergeordnete Rolle. Entscheidungen zur energetischen Sanierung wurden meist von Gebäudeeigentümern getroffen und durch gesetzliche Vorgaben sowie lokale Versorgungsoptionen wie bestehende Fernwärmenetze beeinflusst. Finanzielle Förderprogramme bieten zusätzliche Anreize [15].

In der Planung von Neubauquartieren besteht hingegen ein größerer Gestaltungsspielraum für gebäudeübergreifende Versorgungskonzepte. Über Bebauungspläne können energetische Standards, wie erhöhte Wärmeschutzanforderungen oder Fernwärmeanschlüsse, festgelegt werden. Früher lag der Fokus der Stadtplanung vor allem auf der quantitativen Ausweitung von Wohn-, Gewerbe-, Freizeit- und Verkehrsflächen [15].

Veränderung in der Nutzungsstruktur von Quartieren Der Schwerpunkt der Quartiersentwicklung hat sich zu einer qualitativen Aufwertung städtischer Quartiere mit nachhaltigen Energie- und Klimazielen verlagert. Besonders ökologische Aspekte nehmen an Bedeutung zu [14, 15].

Neben den Zielen verändert sich auch die baustrukturelle Zusammensetzung von Quartieren. Mit wachsender Urbanisierung steigen insbesondere in Städten die Anforderungen an Wohnraum. Während in den 1990er Jahren monofunktionale Wohnquartiere dominierten, geht der Trend heute zu Nutzungsgemischten Quartieren, die neben Wohnraum auch öffentliche Grünflächen, soziale und kulturelle Einrichtungen, Einzelhandel, Gastronomie sowie Dienstleistungsangebote umfassen. Diese Entwicklung ist in großen Stadtquartieren noch ausgeprägter und führt zu einer höheren Bebauungsdichte und zunehmenden Heterogenität der Gebäudenutzung [16, 17].

Herausforderungen in der Umsetzung von Quartiersplanung Die größte Herausforderung liegt in der Umsetzung eines abgestimmten Quartierskonzeptes. Im Bereich der Energieversorgung dominieren weiterhin ökonomische Einzelinteressen von Grundstückseigentümern und Energieversorgungsunternehmen, wodurch Energieeffizienzziele oft in den Hintergrund rücken. Zusätzlich sind Informationen zu Energiebedarfen, Einsparpotenzialen, Gebäudealter und Sanierungsstand häufig schwer zugänglich oder nur mit erheblichem Aufwand verfügbar [15]. Für die Realisierung energieeffizienter Quartiere sind politische Rahmenbedingungen, rechtliche Vorgaben und ökonomische Anreize entscheidend. Während Richtlinien auf Bundes- und Länderebene vorgegeben werden, erfolgt die Umsetzung auf kommunaler Ebene. Kommunen können Förderprogramme nutzen, um integrierte Quartierskonzepte zu entwickeln [18].

Ziele energetischer Quartiersplanung Entsprechend der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung soll Deutschland bis 2045 klimaneutral werden. Dafür soll schon bis 2030 die Hälfte der Wärme- und Kälteversorgung klimaneutral erfolgen und 80% des Stroms aus THG-neutralen Energiequellen bzw. -trägern erzeugt werden. Zur Unterstützung dieser Ziele definiert das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms fünf Forschungsmissionen. Die Mission "Energiesystem" verfolgt Ziele zur Steigerung der Gesamteffizienz, zur Erhöhung der Nachhaltigkeit und zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit im Energiesystem [2, 3].

3.1.3. Analytischer Ansatz zur Modellierung von Quartieren

Zur Modellierung von Energiesystemen in Quartieren existieren verschiedene analytische Ansätze, die in drei Kategorien eingeteilt werden können [5]:

- Top-down-Ansatz
- Bottom-up-Ansatz
- Hybrid-Ansatz

Diese Ansätze decken unterschiedliche Fragestellungen ab. Die Wahl des analytischen Ansatzes hängt somit von der Zielsetzung der jeweiligen Untersuchung ab. [Abbildung 3.2](#) zeigt die unterschiedlichen Betrachtungsweisen des Top-down- und Bottom-up-Ansatzes:

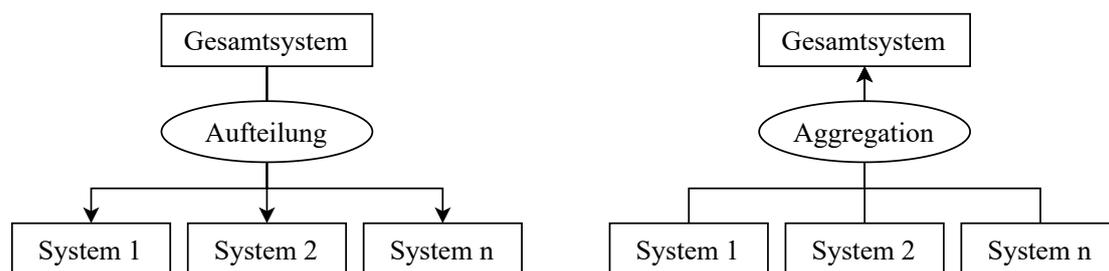


Abbildung 3.1.: Links: Prinzip des Top-down-Ansatzes. Rechts: Prinzip des Bottom-up-Ansatzes. Eigene Darstellung nach [19].

Top-down-Ansatz Der Top-down-Ansatz betrachtet das Energiesystem aus einer makroökonomischen Perspektive und umfasst die Interaktionen zwischen Energiesektor und Gesamtwirtschaft. Die Energienachfrage wird als Ganzes betrachtet und nicht in Teilsysteme differenziert. Makroökonomische Modelle im Top-down-Ansatz werden häufig genutzt, um die wirtschaftlichen Kosten und Umweltauswirkungen von energie- oder klimapolitischen Maßnahmen auf das gesamte Wirtschaftssystem zu bewerten [20].

- **Vorteil:** Der Top-down-Ansatz ermöglicht die Bewertung sektorübergreifender Wechselwirkungen und die Einbeziehung des wirtschaftlichen Gesamtsystems.
- **Nachteil:** Modelle nutzen oft historische Daten zur Prognose zukünftigen Systemverhaltens, ohne technische Details zu berücksichtigen. Dies kann die Genauigkeit der Ergebnisse beeinträchtigen [5, 21].

Bottom-up-Ansatz Der Bottom-up-Ansatz basiert auf der Modellierung einzelner Teilsysteme, die zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden. Der Ansatz ermöglicht die Betrachtung vieler Technologieoptionen und bietet einen hohen Detailgrad in der Modellierung [19].

- **Vorteil:** Modellierungen nach dem Bottom-up-Ansatz berücksichtigen eine große Anzahl verschiedener Technologien und liefern detaillierte Ergebnisse.
- **Nachteil:** Durch die fehlende makroökonomische Perspektive werden Wechselwirkungen zwischen dem Energiesektor und anderen Wirtschaftssektoren vernachlässigt [21].

Hybrid-Ansatz Der Hybrid-Ansatz kombiniert den Top-down- mit dem Bottom-up-Ansatz und vereint deren Vorteile. Dieser Ansatz ermöglicht eine umfassendere Analyse, da sowohl makroökonomische Zusammenhänge als auch technische Details berücksichtigt werden können [20]. Diese Verknüpfung stellt jedoch hohe Anforderungen an die Komplexität und Umsetzung der Modelle [5]. Die Anforderungen an ein hybrides Modell umfassen technologische Genauigkeit, mikroökonomischen Realismus und makroökonomische Vollständigkeit [20].

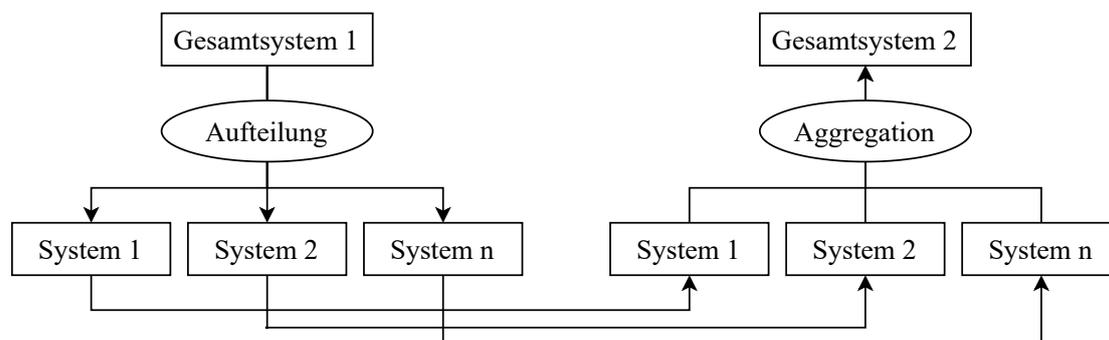


Abbildung 3.2.: Prinzip des Hybrid-Ansatzes. Eigene Darstellung nach [22].

Die Verknüpfung der Ansätze reicht von einer manuellen Übertragung von Daten, Parametern und Koeffizienten zwischen den Modellen, bis hin zu komplexen automatischen Übertragungsmöglichkeiten in Softwaretools [20, 23].

3.2. Energiesystemmodellierung mit dem SESMG

Energiesysteme werden durch den steigenden Anteil von Windkraft und Photovoltaik (PV) als volatile erneuerbare Energiequelle immer komplexer. Auch die verstärkte Kopplung von Sektoren, wie dem Elektrizitäts- und Verkehrssektor, führt zu einer Erhöhung der Gesamtdynamik und Komplexität der Energiesysteme [24]. Das Entwickeln und Vergleichen einzelner Energieversorgungsszenarien berücksichtigt nicht alle Wechselwirkungen und Synergien zwischen den verschiedenen Sektoren. Klassische Energieversorgungskonzepte werden aufgestellt und hinsichtlich Kriterien wie Kosten und Emissionen verglichen. Diese Herangehensweise ermöglicht aber keine Optimierung des Quartiers [5]. Die **ESM** ist ein Werkzeug, das die Interaktion der verschiedenen Energiesektoren berücksichtigen kann [25]. Hierbei wird ein Modell des Energiesystems erstellt und auf Basis von Parametern wie dem Energieverbrauch einzelner Gebäude optimiert. Dazu verwendet die **ESM** häufig den Bottom-up-Ansatz [5, 26].

Der **SESMG** ist ein Softwaretool zur Erstellung und Optimierung urbaner Energiesysteme. Er verfügt über eine benutzerfreundliche, browserbasierte grafische Benutzeroberfläche. Die Dateneingabe erfolgt über Kalkulationstabellen, sodass für die Anwendung keine Programmierkenntnisse erforderlich sind [27]. Die Bestandteile des Energiesystems werden mithilfe des **SESMG** zunächst als Open Energy Modelling Framework (**oemof**)-Modell definiert und anschließend durch einen Solver optimiert [28]. Bei **oemof**¹ handelt es sich um ein Open-Source-Modellierungsframework [29]. Nach Klemm [5] ist **oemof** zur

¹Eine ausführliche Beschreibung zu **oemof** findet sich hier: [29].

Analyse und Optimierung von Energieversorgungssystemen geeignet.²

Mit dem **SESMG** ist eine multikriterielle Optimierung anhand mehrerer Zielgrößen möglich. Der **SESMG** wendet die Epsilon-Constraint-Methode an. Dabei werden zunächst die Randszenarien bestimmt, beispielsweise die Minimalwerte von Kosten und Treibhausgasemissionen. Ausgehend vom Kostenminimum wird schrittweise der zulässige Wert der Treibhausgasemissionen verringert, bis das Minimum der Treibhausgasemissionen erreicht ist. Zwischen den Randszenarien ergibt sich eine Paretokurve, die semioptimale Szenarien abbildet. Die Anzahl der Paretopunkte sowie die beiden Optimierungskriterien können flexibel angepasst werden [28, 30, 31].³

Die Optimierung liefert gebäudespezifische und individuelle Ergebnisse, erfordert jedoch eine hohe Rechenkapazität und Rechenzeit. Mit zunehmender Modellkomplexität steigen diese Anforderungen an. Dabei steigt der Speicherbedarf linear und die Rechenzeit quadratisch mit zunehmender Modellkapazität an. Besonders die Anzahl der modellierten Zeitschritte und binäre Investitionsentscheidungen, wie für die Auslegung von einem Wärmenetz erforderlich, erhöhen die Komplexität [25].

Zeitliche Vereinfachungen in denen nur jeder n-te Tag modelliert wird, reduzieren die erforderlichen Rechenressourcen. Darüber hinaus können auch Vereinfachungen am Modell die erforderlichen Rechenressourcen reduzieren. Eine zweistufige Modellierung ermöglicht eine technische Vorselektion. Im ersten Schritt werden durch eine zeitliche Vereinfachung des Vormodells nicht relevante Systemkomponenten ausgeschlossen. Im anschließenden Hauptmodell werden dann ausschließlich die für das Energiesystem relevanten Komponenten berücksichtigt [25].

3.3. Forschungsprojekt FutureBEEing

3.3.1. Nachhaltige Quartierstransformation

In dem Forschungsprojekt **FB** arbeiten deutsche und niederländische Organisationen daran, die nachhaltige Transformation von Wohnquartieren zu beschleunigen. Der Fokus liegt auf einem integrierten Ansatz, der Faktoren wie Klimaanpassung, den Umstieg auf erneuerbare Energien sowie die Steigerung der Lebensqualität im Wohnsektor vereint. Dabei werden Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftsfaktoren analysiert und potenzielle Stakeholder identifiziert. Im Rahmen von **FB** werden zwei Instrumente entwickelt [4, 32]:

1. Die **FB-Menükarte** legt die Anforderungen als Grundlage für die nachhaltige Transformation von Quartieren fest.
2. Das **FB-Tool** bestimmt die besten Transformationsszenarien.

Die Grundlage bilden bestehende Softwaretools aus den Bereichen Energieplanung und Raumgestaltung, die im **FB-Tool** zu einem integrierten Ansatz unter Berücksichtigung aller relevanten Bereiche zusammengeführt werden [4, 32].

Ein Schwerpunkt liegt auf der nachhaltigen Versorgung von Strom und Wärme in Quartieren. Die **ESM** bietet einen Lösungsansatz zur optimale Gestaltung der Strom- und Wärmeversorgung [5]. Mit zunehmender Komplexität der Energiesysteme steigen die Anforderungen an Rechenkapazität und Rechenzeit zur Ermittlung optimierter Energiesysteme [25]. Zwar liefert die **ESM** gebäudespezifische Ergebnisse, jedoch ist dieser

²Weitere Information zur **ESM** mit dem **SESMG** finden sich hier: [5].

³Weitere Informationen zum Softwaretool findet sich in der Dokumentation des **SESMG** [28].

Detaillierungsgrad für die Erstellung erster Transformationsszenarien im FB-Tool nicht erforderlich. Zudem erschweren die hohen Anforderungen an Rechenzeit und Rechenkapazität eine schnelle Bereitstellung von Simulationsergebnissen. Es bedarf einer ressourcenschonenden Methode zur optimalen Gestaltung einer Strom- und Wärmeversorgung, die quartierspezifische Anforderungen und Technologien miteinbezieht. Der in [Abbildung 2.1](#) dargestellte Modellierungsansatz zeigt ein Konzept, das diesen Anforderungen entspricht.

3.3.2. Anforderung an das FutureBEEing-Tool

Das Forschungsprojekt FB definiert spezifische Anforderungen an das FB-Tool, um eine Methode zur nachhaltigen Transformation von Wohnquartieren zu entwickeln. Der in [Abbildung 2.1](#) dargestellte Modellierungsansatz zur Entwicklung einer optimierten Energieversorgung basiert auf diesen Anforderungen.

Nachhaltige Stadtentwicklung Das FB-Tool erstellt Szenarien für die nachhaltige Transformation von Wohnquartieren. Gemäß dem Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung (WBGU) umfasst die nachhaltige Stadtentwicklung fünf zentrale Handlungsfelder [\[33\]](#):

- Dekarbonisierung, Energie und Klimaschutz
- Förderung umweltfreundlicher Mobilität und Verkehr
- Baulich kompakte und funktionale Mischung urbaner Gebiete
- Anpassung an den Klimawandel
- Armutsbekämpfung und Verringerung sozioökonomischer Ungleichheiten

Die Dekarbonisierung erfordert eine Reduktion des Energieverbrauchs in Gebäuden sowie den Einsatz klimaneutraler Technologien [\[3, 16\]](#). Der Ausbau umweltfreundlicher Mobilität umfasst die Verbesserung des Schienenverkehrs und öffentlichen Personennahverkehrs sowie die Förderung der Elektromobilität. Durch Sektorkopplung können erneuerbare Energien effizienter in Verkehrs- und Wärmesektoren integriert werden [\[34\]](#).

Ergebnisqualität Laut FB-Projektantrag [\[4\]](#) strebt das FB-Tool eine schnelle Bereitstellung und Visualisierung von Simulationsergebnissen an. Diese Ergebnisse bilden die Entscheidungsgrundlage für die Wahl eines Quartiersansatz und umfassen eine Kostenübersicht verschiedener Szenarien sowie einen vorläufigen Quartiersmasterplan. Eine Ergebnissenauigkeit von 80 % ist dabei ausreichend, um erste Transformationsszenarien zu bewerten. Nach der Auswahl eines Szenarios erfolgt eine detaillierte Ausgestaltung des Transformationsprozesses und eine individuelle Optimierung vom Energiesystem des Untersuchungsquartiers [\[4\]](#).

Interdisziplinäre Quartierstransformation Das Forschungsprojekt FB verfolgt einen integrierten Quartiersansatz. Es grenzt sich in der Entwicklung eines Softwaretools von anderen Forschungsprojekten ab, die sich auf einzelne Bereiche der Quartiersentwicklung spezialisieren. In FB wird das Energiesystem auf Quartiersebene betrachtet [\[4\]](#). Im Gegensatz zur Betrachtung auf Gebäudeebene, werden energetisch ähnliche Einzelgebäude zu typischen Stadtraumtypen zusammengefasst, um zentrale Technologien wie Fernwärmenetze besser berücksichtigen zu können.

Anwendung in der Praxis Das **FB**-Tool wird als Open-Source-Lösung bereitgestellt, um eine langfristige und zugängliche Nutzung für alle Stakeholder zu gewährleisten. Einfache, frei verfügbare Datenquellen minimieren den Wartungsaufwand [4]. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Transformationsszenarien sind gezielte ökonomische und ökologische Anreize erforderlich. Kostengünstige und effiziente Lösungen für die Strom- und Wärmeversorgung sind entscheidend, um Akteure wie Grundstückseigentümer und Energieversorger einzubinden und den Transformationsprozess effektiv voranzutreiben.

3.4. Abgrenzung energetischer Leitplanung zur Energiesystemmodellierung

Die energetische Leitplanung setzt in der frühen Planungsphase von Quartieren an. In dieser Phase werden grundlegende Entscheidungen zur Auswahl eines Energieversorgungskonzepts für das Quartier getroffen. Zu diesem Zeitpunkt liegen oftmals nur wenige Detailinformationen über das Quartier vor [35]. Mithilfe vordefinierter Gebäudetypen und Kennwerte können jedoch auch in einer frühen Planungsphase Entscheidungen über Energieversorgungskonzepte getroffen werden [36]. Softwaretools zur energetischen Leitplanung sind dabei nicht für die Dimensionierung individueller Technologien gedacht. Diese erfolgt in späteren Planungsphasen [35].

Im Gegensatz dazu setzt die Methode der **ESM** in den späten Planungsphasen der Quartierstransformation an. Nach der Festlegung von Zielen und Anforderungen an das Energiesystem erfolgt die individuelle Planung und Dimensionierung verwendeter Technologien. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der detaillierten Ausgestaltung von Energieversorgungskonzepten für Quartiere [5].

Abbildung 3.3 zeigt die Einordnung der energetischen Leitplanung und der **ESM** in den Planungsablauf zur Quartierstransformation:

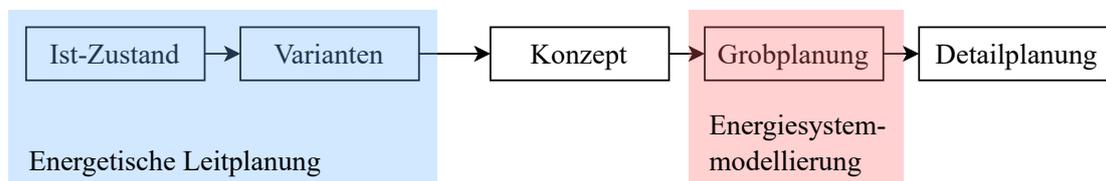


Abbildung 3.3.: Planungsphasen der Quartierstransformation. Einordnung der energetischen Leitplanung und **ESM** in die Planungsphasen. Eigene Darstellung. Planungsphasen nach [35].

Die energetische Leitplanung mit ihrem Fokus auf den frühen Planungsphasen unterscheidet sich von der **ESM**, die den Schwerpunkt auf die Grobplanung legt. Der Modellierungsansatz aus **FB** lässt sich zwischen der energetischen Leitplanung und der **ESM** einordnen. Er ermöglicht die Erstellung von Energieversorgungskonzepten für Untersuchungsquartiere durch die Nutzung vordefinierter **EST**. Diese Konzepte basieren jedoch auf der Grundlage einer individuellen Planung jedes **EST**.

Der **SESMG** arbeitet nach der Methode der **ESM**. Um ihn im Modellierungsansatz von **FB** nutzen zu können, ist eine Integration und Anpassung an die Aspekte der energetischen Leitplanung erforderlich. Daher werden in Kapitel 4 relevante Forschungsprojekte zur energetischen Leitplanung untersucht.

4. Ansätze der energetischen Leitplanung von Quartieren

Verschiedene Forschungsprojekte zur energetischen Leitplanung entwickeln Ansätze zur Einteilung und Bewertung von Quartieren auf Basis energetischer Eigenschaften. Dieses Kapitel analysiert die Ergebnisse dieser Forschungsprojekte im Hinblick auf ihre Relevanz für die Einteilung und Implementierung von EST in den SESMG. In Kapitel 5.2 werden die Untersuchungsschwerpunkte der Ansätze eingeordnet.

4.1. Einteilung nach Roth

Bereits 1979 entwickelte das Forschungsprojekt "Wechselwirkung zwischen Siedlungsstrukturen und Wärmeversorgungssystemen" eine Einteilung typischer Siedlungsstrukturen. Der Schwerpunkt lag in der Ausarbeitung effizienter Wärmeversorgungssysteme für typische Siedlungsgebiete. Dabei wurden neun Siedlungstypen ermittelt, die die Siedlungs- und Bausubstanz von Deutschland abbilden sollen [37].

Tabelle 4.1.: Die neun Siedlungstypen nach Roth [37]. Abk.: ST: Siedlungstyp.

| Siedlungstyp | Beschreibung |
|--------------|--|
| ST 1 | Ein- und Mehrfamilienhäuser niedriger Dichte |
| ST 2 | Dorfkern und Einfamilienhäuser hoher Dichte |
| ST 3 | Reihenhaussiedlung |
| ST 4 | Zeilenbebauung mittlerer Dichte |
| ST 5 | Zeilenbebauung hoher Dichte und Hochhäuser |
| ST 6 | Blockbebauungen |
| ST 7 | Citybebauung ab Mitte des 19. Jahrhunderts |
| ST 8 | Mittelalterliche Altstadt |
| ST 9 | Industrie- und Lagergebäude |

Die Zuordnung von Wärmeversorgungssystemen zu den Siedlungstypen erfolgte über ein betriebswirtschaftliches Optimierungsmodell. Für jeden Siedlungstyp erfolgte die Auswahl des Systems mit den geringsten Gesamtkosten. Dabei wurden die Kosten von Sanierungsmaßnahmen und die Kosten verschiedener Technologien zur Wärmeversorgung betrachtet [37].

Die Einteilung von Roth [37] bildet die Grundlage für zahlreiche nachfolgende Forschungsprojekte zur energetischen Einteilung von Siedlungsstrukturen.

4.2. UrbanReNet

Das Forschungsprojekt UrbanReNet - Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum ([UrbanReNet](#))⁴ der Technischen Universität Darmstadt untersucht die Möglichkeit, energetische Eigenschaften städtischer Räume systematisch abzubilden. Dazu wurden typische energetische Stadtbausteine entwickelt, die es ermöglichen, städtische Quartiere mithilfe weniger Basisdaten hinsichtlich ihrer Bedarfe und Energieerzeugungspotenziale zu analysieren [6, 39]. Das Forschungsprojekt [UrbanReNet](#) ist Teil der Forschungsinitiative Energieeffiziente Stadt ([EnEff:Stadt](#)) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie ([BMWi](#)) (heute [BMWK](#)) [6]. Das Forschungsprojekt [UrbanReNet](#) umfasst dabei vier Ziele:

1. **Untersuchung energetischer Potenziale:** Analyse energetischer Erzeugungs-, Speicher- und Vernetzungspotenziale von Bestandsgebäuden und urbaner Freiflächen innerhalb einer Stadtraumtypologie
2. **Analyse von Stadtraumtypologien:** Vergleich der energetischen Potenziale zwischen unterschiedlichen Stadtraumtypologien zur Unterstützung dezentraler Energieversorgung auf Quartiersebene
3. **Modellentwicklung:** Erstellung mathematischer Modelle und Identifikation geeigneter Verfahren zur Lösung der auftretenden Teilprobleme
4. **Softwaretool-Entwicklung:** Entwicklung eines Softwaretools zur Unterstützung eines Energieversorgungskonzepts auf Quartiersebene unter optimaler Nutzung der ermittelten Potenziale [6]

Ergebnisse

Im Rahmen der ersten Phase des Forschungsprojekts wurde ein Baukasten entwickelt, mit dem Stadträume auf Quartiersebene systematisch erfasst und energetisch bewertet werden können. Dieser Baukasten umfasst drei Bestandteile:

- 13 [EST](#)
- 22 Energetische Einzelelemente
- Drei Straßenraumtypen

[EST](#) sind Stadträume mit ähnlichen Baustrukturen und vergleichbaren energetischen Eigenschaften in Bezug auf ihre Potenziale und Bedarfe. Um ein Stadtgebiet genauer abzubilden, werden die [EST](#) durch energetische Einzelelemente wie Schulen, Krankenhäuser oder Schwimmbäder ergänzt. Verschiedene Straßenraumtypen werden anhand der Straßenfläche und ihrer Verbindungsfunktion (z. B. innerorts, regional, überregional) klassifiziert [6].

Energetische Stadtraumtypen Die 13 definierten [EST](#) lassen sich gemäß der jeweils überwiegend vorkommenden Nutzung in vier Gruppen unterteilen:

- Überwiegend Wohnnutzung ([EST](#) 1 bis 5)

⁴Weiter Informationen zu [UrbanReNet](#) finden sich hier: [38].

- Überwiegend Mischnutzung (EST 6 bis 8)
- Büro- und gewerbliche Nutzung (EST 9 bis 10)
- Freiraumtypen (EST 11 bis 13)

Tabelle 4.2 zeigt die in UrbanReNet entwickelten EST und deren Subtypen. Eine ausführliche Übersicht dieser EST mit schematischen Abbildungen und typischen Luftbildern findet sich im Anhang A.

Tabelle 4.2.: Einteilung der EST nach [6].

| Typ | Subtyp | Beschreibung |
|--------------------------------------|---------|--|
| Überwiegende Wohnnutzung | | |
| EST 1 | | Kleine, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit |
| | EST 1A | Freistehende Einfamilienhausbebauung |
| | EST 1B | Freistehende Mehrfamilienhausbebauung |
| EST 2 | | Reihenhausbebauung |
| EST 3 | | Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit |
| EST 4 | | Großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit |
| | EST 4A | Großmaßstäbliche Zeilenbebauung |
| | EST 4B | Freistehende Wohnhochhäuser |
| EST 5 | | Blockrandbebauung |
| Überwiegende Mischnutzung | | |
| EST 6 | | Dörfliche Bebauung |
| EST 7 | | Historische Altstadtbebauung |
| EST 8 | | Innenstadtbebauung |
| Büro- und gewerbliche Nutzung | | |
| EST 9 | | Geschäfts-, Büro-, und Verwaltungsgebiet |
| EST 10 | | Gewerbegebiet |
| | EST 10A | Gewerbegebiet, überwiegend Handel |
| | EST 10B | Gewerbegebiet, überwiegend Produktion |
| Freiraum | | |
| EST 11 | | Öffentliche Parkanlagen |
| EST 12 | | Friedhofsanlagen |
| EST 13 | | Kleingartenanlagen |

Jeder EST ist gekennzeichnet durch eine für ihn charakteristische Bau- und Freiraumstruktur, eine typische Dichte, Größe und Anordnung der Gebäude, Geschossigkeit und Art der Nutzung. Dabei sind die EST so definiert, dass eine Zuordnung städtischer Strukturen unabhängig von regional auftretenden Besonderheiten erfolgen kann. Die jeweiligen Untertypen der EST differenzieren sich bei EST 1 bis 4 nach dem Mischungsverhältnis aus Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie freistehenden Wohnhochhäusern und Zeilenbebauung, bei EST 10 nach der Nutzungsart. Für jeden EST wurde ein energetisches Profil bestehend aus den Bedarfen (Heizwärme, Strom und Warmwasser) und den energetischen Potentialen (Solarthermie, PV, Geothermie, Abwasserwärme und Biomasse) erstellt [6].

Energetische Einzelemente Zusammen mit den **EST** bilden energetische Einzelemente den baulichen Bestand eines Stadtausschnitts ab. Die Ergänzung der **EST** durch energetische Einzelemente ermöglicht es, Gebäudestrukturen abzubilden, die in Deutschland selten vorkommen oder sich durch stark abweichende baustrukturelle und energetische Eigenschaften von den **EST** unterscheiden. Energetische Einzelemente umfassen 26 Gruppen und 40 Typen wie beispielsweise Krankenhäuser, Schulen und Kinos sowie Freiraumelemente wie beispielsweise Parkplätze oder Brachflächen. Als Bedarfe wurden der Heizenergieverbrauch sowie der Stromverbrauch je Flächeneinheit oder Nutzereinheit erfasst. Bei den Potenzialen wurden die für **PV** und Solarthermie zur Verfügung stehende Fläche und das Produktionspotenzial von Biomasse erfasst [6].

Energetische Straßenraumtypen Eine Einteilung der energetischen Straßenraumtypen erfolgt aufgrund der Straßenfläche im Stadtausschnitt und der Verbindungsfunktion (innerorts, regional, überregional). Dabei werden der Strombedarf und das Potenzial der Stromeinsparung der Straßenbeleuchtung betrachtet [6].

Softwaretool Das Softwaretool ist in der Lage, energetische Bedarfe und Potenziale der 13 **EST** zu bilanzieren. Es besteht aus zwei Hauptkomponenten: einem Datenmodul, das als Datenbank fungiert, und einem Vernetzungsmodul. Dieses dient zur Dateneingabe über eine grafische Benutzeroberfläche, sowie einer tabellarischen und grafischen Datenausgabe [39].

Nach Aussage des Projektleiters Prof. Dr. Jörg Dettmar⁵ ist das Softwaretool heute nicht mehr verfügbar. Die Entwicklung wurde nicht über das Teststadium hinaus fortgeführt, weil dafür notwendige weitere Fördermittel fehlten. Eine Übernahme durch eine private Firma war ebenfalls nicht in Aussicht.

EST-Steckbriefe Die **EST-Steckbriefe**⁶ fassen die wesentlichen Kennwerte und Charakteristika verschiedener Stadtraumtypen zusammen. Sie basieren auf den Ergebnissen aus **UrbanReNet** in denen umfassende bau- und freiraumstrukturelle sowie energetische Daten ermittelt wurden. Jeder **EST-Steckbrief** besteht aus einer Übersicht, einem baustrukturellen, stadtklimatischen und einem energetischen Teil [6, 7].

Die Übersicht zeigt eine Kurzbeschreibung des **EST**-Typs, eine schematische Karte des typischen Gebäudelayouts im Quartier sowie eine typische Außenaufnahme, die die Gebäude des **EST** veranschaulichen. Im baustrukturellen Teil sind Kennwerte wie bauliche Dichte, Anzahl und Größe der Gebäude, typische Wohn- und Gewerbefläche aufgeführt und durch Diagramme visualisiert. Dabei sind viele der Kennwerte als relative Werte bezogen auf die Fläche angegeben. Der stadtklimatische Teil beinhaltet Kennwerte wie den Versiegelungsgrad und den Grünflächenanteil zur Einschätzung von beispielsweise Starkregenereignissen. Der energetische Teil bewertet die Stadträume hinsichtlich Potenzialen wie Solarthermie, Photovoltaik, Geothermie und Biomassenutzung sowie ihrer energetischen Bedarfe. Eine Bewertung erfolgt aufgeteilt nach diesen Kennwerten. Dazu werden beispielsweise die Jahresheizwärmebedarfe in Abhängigkeit zur Baualterklasse (**BAK**) und dem Sanierungsstand der Gebäude angegeben und die Potenziale für Solarthermie und **PV** in Abhängigkeit zur Dachausrichtung [6, 7].

⁵Informationen aus E-Mail Verkehr mit Prof. Dr. Dettmar.

⁶Eine Übersicht und Erklärung aller **EST-Steckbriefe** findet sich hier: [7].

4.3. D-ECA und MODER

D-ECA

Der "Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere", mit dem englischen Titel District Energy Concept Adviser (**D-ECA**), ist ein aus der Forschungsinitiative **EnEff:Stadt** entstandenes Potentialbewertungstool. Die Softwarelösung wurde vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (heute **BMWK**) finanziert. Das Softwaretool steht seit April 2013 kostenfrei als Download zur Verfügung [35, 36].

Der **D-ECA** wird in der frühen Planungsphase von Energiekonzepten für Stadtquartiere eingesetzt. Dabei ist das Softwaretool für die Planung von neuen Stadtquartieren und der Umgestaltung von bestehenden Quartieren nutzbar. Es grenzt sich von anderen Softwaretools zur individuellen Dimensionierung aller Komponenten und Technologien ab, indem keine Eingabe von Detailinformation notwendig ist. Dazu sind im Softwaretool vordefinierte Gebäudetypen und voreingestellte Kennwerte hinterlegt. Die Anwendung ist in vier Bereiche aufgeteilt, die den Ablauf einer typischen Anwendung darstellen.

1. **Schnellprüfung:** Der Energieverbrauchsvergleich mit dem nationalen Durchschnitt
2. **Info-Bibliothek:** Beispiele für energieeffiziente Stadtquartiere
3. **Info-Bibliothek:** Energieeffiziente Strategien und Technologien
4. **Effizienzberechnung:** Umfassende energetische Bewertung von Stadtquartieren

Schnellprüfung In der Schnellprüfung wird der tatsächliche Energieverbrauch im Verhältnis zur gesamten Wohnfläche des Quartiers erfasst. Dazu sind Angaben zur gesamten Wohnfläche, zum Energieverbrauch (beispielsweise die jährliche Gas- oder Heizölmenge) sowie zur lokal erzeugten Energie (beispielsweise **PV**-Strom) notwendig. Das Softwaretool differenziert zwischen Strom und Heizenergie für Raumwärme oder Warmwasser. Der ermittelte Quartierswert wird anschließend mit einem Vergleichswert basierend auf dem deutschen Durchschnittsenergieverbrauch verglichen, um eine schnelle Einschätzung der Energieeffizienz des Quartiers zu ermöglichen.

Info-Bibliothek Die Info-Bibliothek enthält eine Sammlung von nationalen und internationalen Fallbeispielen zu laufenden oder abgeschlossenen Projekten. Es werden verwendete Technologien zur Energieeinsparung, der gemessene Energieverbrauch sowie Kosten und andere Projekterfahrungen dargestellt. Dazu werden abhängig vom Anwendungsfeld verschiedene Strategien und Technologien vorgestellt und erläutert. Die Technologien sind beispielsweise **PV**, Fern- und Nahwärmenetze oder die Nutzung von Abwärme.

Effizienzberechnung Mithilfe der Effizienzberechnung kann ein Quartier erfasst und verschiedene Energiekonzepte miteinander verglichen werden. Dazu können im Bearbeitungsfeld verschiedene Gebäudetypen hinzugefügt und in einem Ergebnisfeld die energetischen Auswirkungen erfasst werden. Eine Bibliothek enthält dazu verschiedene Gebäudetypen und ihre energetischen Eigenschaften. Die nutzbaren Gebäudetypen sind in **Tabelle 4.3** dargestellt.

Die verwendeten Gebäudetypen können durch den Anwendenden angepasst werden. Dazu können beispielsweise Gebäudeinformationen zu Baujahr und Dämmstandards, die Art

Tabelle 4.3.: Bibliothek der Gebäudetypen des D-ECA nach [36].

| Wohngebäude | Nichtwohngebäude |
|------------------------|------------------------|
| Einfamilienhaus | Schule |
| großes Einfamilienhaus | Sporthalle |
| Reihenhaus | Kindergarten |
| Mehrfamilienhausblock | Büro (Lochfassade) |
| Hochhaus | Büro (Ganzglasfassade) |
| | Werkstatt |
| | Verkaufsstätten |
| | Hotel |

der Heizung und Warmwasserbereitung sowie PV-Anlagen angepasst werden.⁷ Die Ausgabe besteht aus einem Sofortergebnis und einer detaillierten tabellarischen Darstellung. Die zentralen Ergebnisse umfassen:

- jährlicher Endenergiebedarf
- jährlicher nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf
- jährliche THG-Emissionen
- Anteil der erneuerbaren Energie

Diese Werte können als Gesamtergebnis oder bezogen auf die Wohnfläche ausgegeben werden [35, 36].

MODER

Das von der Europäischen Union (EU) geförderte Forschungsprojekt Mobilization of Innovative Design Tools for Refurbishing of Buildings at District Level (MODER) entwickelt den D-ECA weiter. Das erweiterte Softwaretool enthält eine Kostendatenbank, die die Investitionskosten geplanter Sanierungsmaßnahmen sowie die Energiekosten vor und nach der Sanierung ermittelt. Im Rahmen des EU-Projekts wurden nationale Gebäudetypen und Nutzerprofile ergänzt, wodurch das Softwaretool für weitere europäische Länder anwendbar ist. Die hinterlegte Datenbank wurde um weitere Technologien ergänzt (z. B. elektrischer Nachtspeicherofen, Abluftwärmepumpe oder zentraler Stromspeicher) [40]. Das Softwaretool steht seit 2018 als erweiterte Version des D-ECA kostenlos zur Verfügung.⁸

4.4. TABULA und EPISCOPE

Mit den von der EU geförderten Projekten Typology Approach for Building Stock Energy Assessment (TABULA) und Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks (EPISCOPE) wurde ein einheitliches, europaweit abgestimmtes Konzept zur Klassifizierung und Einteilung von Gebäudetypologien entwickelt. Die TABULA-Datenbank zeigt

⁷Eine Übersicht aller anzupassenden Werte findet sich in der Toolbeschreibung hier: [36].

⁸Die Softwaretools D-ECA und MODER können hier heruntergeladen werden: [41].

typische Gebäude und deren energetische Eigenschaften in Abhängigkeit von Gebäudealter und -größe [42]. So kann anhand einzelner exemplarischer Gebäude die Auswirkung von Sanierungsmaßnahmen veranschaulicht werden. Die **TABULA**-Datenbank bildet eine Grundlage für Bottom-up-Modelle zur Auswertung von Energieverbräuchen im Wohngebäudesektor. Das Forschungsprojekt **EPISCOPE** erweiterte die **TABULA**-Datenbank um den Gebäudebestand zusätzlicher Länder [43]. Insgesamt wurden in den Projekte **TABULA** (2009-2012) und **EPISCOPE** (2013-2016) Gebäudedaten aus 20 verschiedenen Ländern erarbeitet. Die Gebäudetypologien sind als Web-Tools⁹ und für umfangreichere Berechnungen in Form einer Kalkulationstabelle¹⁰ verfügbar [46–48].

Deutsche Wohngebäudetypologie nach **TABULA** und **EPISCOPE**

Basis-Typen Die deutsche Wohngebäudetypologie bildet den bestehenden Gebäudebestand sowie dessen energierelevante Merkmale systematisch ab. Wohngebäude werden hierfür in Baualters- und Größenklassen unterteilt, um typische baustrukturelle und energetische Eigenschaften darzustellen. Das Baualter korreliert dabei mit energierelevanten Faktoren wie Fenstergrößen, Wärmedämmung und den eingesetzten Materialien, da diese maßgeblich durch die Bauweise und die zum Baujahr verfügbaren Technologien bestimmt werden. Die Gebäudegröße beeinflusst insbesondere die Fläche der Außenhülle, die für die Ermittlung des Wärmeverlustes entscheidend ist [43].

Die **TABULA**-Datenbank teilt den Gebäudebestand in elf **BAK** ein [43]:

Tabelle 4.4.: **BAK** aus **TABULA** nach [43]

| BAK | Zeitraum | Charakterisierung |
|------------|-----------------|---|
| A | bis 1859 | Vorindustrielle Phase: handwerkliche Bautechniken, Beheizung durch Feuerstellen und Öfen, keine Wasserleitungen |
| B | 1860 bis 1918 | Gründerzeit: Stadtwachstum, beginnende Industrialisierung, standardisierte Mauerwerksbauten, Beheizung über Öfen |
| C | 1919 bis 1948 | Industrialisierung: Einsatz günstiger Materialien nach Normen, Beheizung über Öfen oder erste Kohlezentralheizungen |
| D | 1949 bis 1957 | Nachkriegszeit: einfache Bauweise, soziale Wohnungsnormen, Einsatz von Zentralheizungen, in DDR Fernwärme |
| E | 1958 bis 1968 | Geschosswohnungsbau: erste Hochhaussiedlungen und Plattenbau, Standardmäßig Zentralheizungen oder Fernwärme |
| F | 1969 bis 1978 | Industrielle Bauweisen: Sandwich-Konstruktionen, Fertighäuser, verbesserter Wärmeschutz nach 1. Ölkrise |
| G | 1979 bis 1983 | 1. Wärmeschutzverordnung: kleinere Luftkammern in Wänden, Außendämmung bei Mauerwerksbauten |
| H | 1984 bis 1994 | 2. Wärmeschutzverordnung, erste Niedrigenergiehäuser |
| I | 1995 bis 2001 | 3. Wärmeschutzverordnung |
| J | 2002 bis 2009 | Energieeinsparverordnung EnEV 2002, Förderung für KfW-Energiesparhäuser |
| K | ab 2010 | Neue Anforderungen der EnEV aus Herbst 2009: Niedrigenergiehäuser als Regel-Standard |

⁹Der Download des Online-Werkzeugs zur Visualisierung und Berechnung findet sich hier: [44].

¹⁰Der Download der **TABULA**-Kalkulationstabelle findet sich hier: [45].

Die Gebäude sind hinsichtlich ihrer Größe in der [TABULA](#)-Datenbank in fünf Gruppen eingeteilt:

1. Einfamilienhaus
2. Reihenhaus
3. Mehrfamilienhaus
4. großes Mehrfamilienhaus
5. Hochhaus

Durch die Einteilung von Gebäuden in Größengruppe und [BAK](#) ergibt sich eine Matrix. Diese stellt eine Übersicht von Gebäudetypen, die eine Zuordnung jedes Gebäudetyps in Deutschland ermöglicht, dar [43].

Sub-Typen Neben dieser Matrix aus Basistypen gibt es energierelevante Merkmale, die auf bestimmte Gebäude eines Basistyps zutreffen können. Diese Untergruppen sind in der [TABULA](#)-Datenbank als Sub-Typen erfasst, wobei auch regionale Typologien in diese offene Liste integriert werden können. Beispiele für Sub-Typen sind die in den 1970er Jahren weit verbreiteten Fertighäuser mit verbessertem Wärmeschutz im Außenbereich sowie Fachwerkhäuser [43].

4.5. SimStadt

SimStadt ist eine Simulationsplattform zur Planung und Bewertung von Quartieren anhand energetischer Eigenschaften. Die Datenbasis in SimStadt bilden 3D-Gebäudedaten. Das Ziel ist die Vereinfachung der Planung von erneuerbaren Energiesystemen [49, 50]. Die Forschungsprojekte SimStadt (2012-2015) und SimStadt 2.0 (2017-2020) der Hochschule für Technik Stuttgart wurden vom [BMW](#)i (heute [BMW](#)K) gefördert und sind Teil der Forschungsinitiative [EnEff:Stadt](#) [51].

Die Datengrundlage der Simulationsplattform¹¹ bilden 3D-Gebäudedaten nach dem Open-Gis-Format CityGML¹². Diese enthalten Gebäudegeometrien und Eigenschaften wie die Gebäudenutzungsart oder das Baujahr [54, 55]. In SimStadt werden die 3D-Gebäudedaten mit Wetterdaten sowie einer bauphysikalischen und einer Nutzungsbibliothek verknüpft. Die bauphysikalische Bibliothek basiert auf der Gebäudetypologie aus [TABULA](#) (vergleiche [Kapitel 4.4](#)) und umfasst in Abhängigkeit von Gebäudetyp und [BAK](#) spezifische Wand-, Dach- und Fenstereigenschaften [43, 51]. Die Nutzungsbibliothek enthält Informationen wie Heizsolltemperaturen oder typische Bewohnerzahlen, die den einzelnen Gebäuden zugeordnet werden. Die Anwendung von SimStadt umfasst die Verknüpfung der 3D-Gebäudedaten mit den Daten aus den Bibliotheken und einer Simulation der energetischen Eigenschaften. Dabei können beispielsweise der Heizwärmebedarf der Gebäude oder [PV](#)-Potenziale bestimmt werden. Die Simulationsergebnisse können in 2D oder 3D visualisiert und Detailergebnisse im Tabellenformat exportiert werden [50].

¹¹Der Download des Softwaretools und die SimStadt-Dokumentation findet sich hier: [52].

¹²Nähere Informationen zu CityGML finden sich hier: [53].

5. Analyse bestehender Ansätze

5.1. Konzept zur Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG

In Kapitel 3.3.2 wurden die Anforderungen an das FB-Tool definiert, die den Rahmen für die Entwicklung des in Abbildung 2.1 dargestellten Modellierungsansatzes bilden. Inwiefern diese Untersuchung in die Entwicklung des Modellierungsansatzes aus FB einzuordnen ist, wird im Folgenden untersucht.

Einordnung der Forschungsfrage Die Implementierung von EST in den SESMG erfordert eine systematische Einteilung in typische Siedlungstypen. Hierzu werden die in Deutschland und anschließend die in den Niederlanden vorkommenden Siedlungsstrukturen von Gebäuden zu EST zusammengefasst. Diese EST werden durch Parameter und deren Ausprägungsstufen beschrieben. Abbildung 5.1 zeigt ein Konzept zur Implementierung von EST im SESMG. Dieses dient als Grundlage für die Erstellung einer EST-Datenbank im Rahmen des Modellierungsansatzes aus Abbildung 2.1.

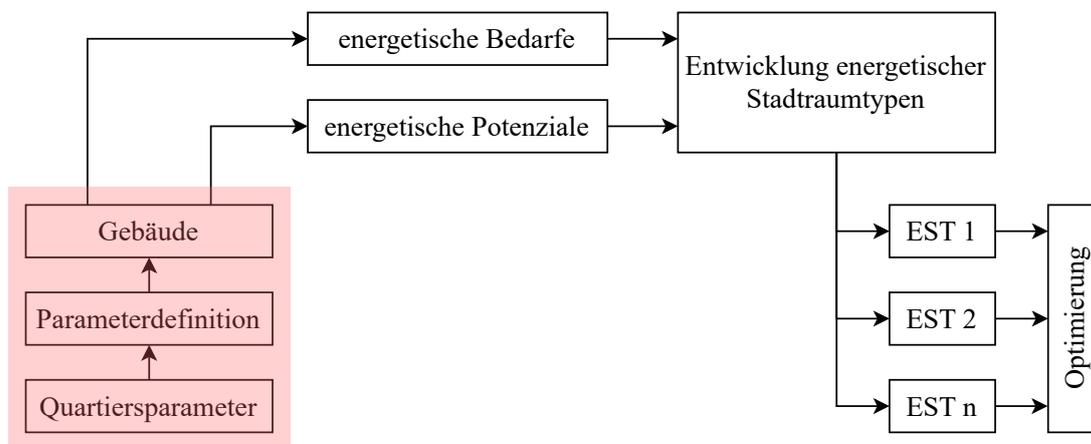


Abbildung 5.1.: Konzept zur Implementierung der EST in den SESMG. Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist in rot hervorgehoben. Abk.: EST: Energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

Ausgangspunkt des Konzepts sind Quartiersparameter nach denen Quartiere in FB untersucht werden. Die Parameterdefinition umfasst die für eine Einteilung von EST relevanten Eingangsparameter. Diese werden auf Grundlage der Anforderungen an FB und der Eingangsparameter des SESMG in Kapitel 6 entwickelt. Aus den in der Parameterdefinition definierten EST ergeben sich die für jeden EST spezifischen Gebäudestrukturen. Auf Grundlage der Gebäudestruktur lassen sich die energetische Bedarfe und Potenziale der Gebäude ermitteln. Zusammengefasst bilden diese die energetischen Eigenschaften der

EST ab. Als Ergebnis entsteht nach der Entwicklung der EST eine auf FB und den SESMG abgestimmte EST-Datenbank. Diese umfasst die EST die die vorkommenden Siedlungsstrukturen abbilden. Die Energiesysteme der EST können nach der Methode der ESM mit dem SESMG optimiert werden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Entwicklung von Parametern zur Einteilung von EST. Dazu werden sowohl die Anforderungen an die Quartiersparameter aus FB als auch die Eingangsparameter des SESMG zur Modellierung von Gebäuden berücksichtigt. Eine Einordnung dieses Schwerpunkts in das Konzept zur Implementierung von EST in den SESMG ist in [Abbildung 5.1](#) dargestellt.

Anforderungen an die Entwicklung energetischer Stadtraumtypen Die schnelle Bereitstellung von Simulationsergebnissen ist ein zentraler Bestandteil bei der Entwicklung von EST. Ausgehend von dieser Anforderung aus FB werden die Eingangsparameter für den in [Abbildung 2.1](#) dargestellten Modellierungsansatz entwickelt. Die Anzahl der Eingangsparameter beeinflusst dabei die Anzahl der notwendigen EST.

Werden viele Eingangsparameter berücksichtigt, muss eine größere Anzahl an EST definiert werden, da für jede Kombination der Parameter ein EST erstellt werden muss. Eine große Anzahl verschiedener EST ermöglicht eine höhere Übereinstimmung zwischen dem Untersuchungsquartier und einem EST. Dies führt zu einer höheren Ergebnisgenauigkeit des Untersuchungsquartiers. Eine Einteilung anhand weniger Eingangsparameter verringert die Anzahl der EST. Da jeder EST eine Optimierung nach der Methode der ESM erfordert, ist eine geringe Anzahl an EST vorteilhaft. Ziel ist es, wenige, aber aussagekräftige Eingangsparameter zu definieren. Mögliche Eingangsparameter werden in [Kapitel 6](#) erarbeitet.

5.2. Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte

Die in [Kapitel 4](#) untersuchten Forschungsprojekte liefern Ergebnisse zur energetischen Leitplanung. Inwiefern die Untersuchungsschwerpunkte in die Entwicklung von EST zur Implementierung in den SESMG eingeordnet werden können wird im folgenden untersucht. Dazu werden die Ergebnisse anhand des Konzepts aus [Abbildung 5.1](#) eingeordnet.

5.2.1. Einteilung nach Roth

Nach der Einteilung von Roth wird der Gebäudebestand aus 1980 durch neun typische Siedlungsräume abgebildet. Die Einteilung erfolgt anhand der im Quartier überwiegend vorkommenden Gebäudestruktur. Die Untersuchung beschränkt sich auf die Einteilung in Siedlungstypen und die Bewertung anhand der Wirtschaftlichkeit verschiedener Wärmeversorgungs-konzepte. Die energetischen Potenziale, Strom- oder Kältebedarfe der Siedlungstypen werden nicht untersucht [\[37\]](#). Da die Untersuchung aus dem Jahr 1980 stammt, bildet die Einteilung nach Roth den Gebäudebestand von Westdeutschland ab. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit orientiert sich an den Heiz- und Sanierungskosten aus Zeit vor 1980 [\[37\]](#).

Die Einteilung der Siedlungstypen nach Roth dient als Grundlage für die Entwicklung der EST in [UrbanReNet](#). [UrbanReNet](#) greift die Ergebnisse von Roth auf, erweitert und aktualisiert sie. Aus diesem Grund wird die Einteilung nach Roth in dieser Arbeit nicht weiter untersucht, sondern auf die Ergebnisse von [UrbanReNet](#) verwiesen [\[6, 37\]](#).

5.2.2. UrbanReNet

Im Projekt [UrbanReNet](#) entwickelte [EST](#) liefern Informationen zu energetischen Potenzialen und Bedarfen städtischer Räume. Die Einteilung in [Tabelle 4.2](#) bietet in Kombination mit energetischen Einzelementen und Straßenraumtypen eine Möglichkeit, städtische Strukturen in Deutschland zu kategorisieren. Das im Rahmen von [UrbanReNet](#) entwickelte Softwaretool ist nicht mehr verfügbar. Diese Arbeit untersucht daher lediglich die Entwicklung und die methodischen Ansätze des Softwaretools. Eine Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte aus [UrbanReNet](#) in den Entwicklungsprozess der [EST](#) ist in [Abbildung 5.2](#) dargestellt.

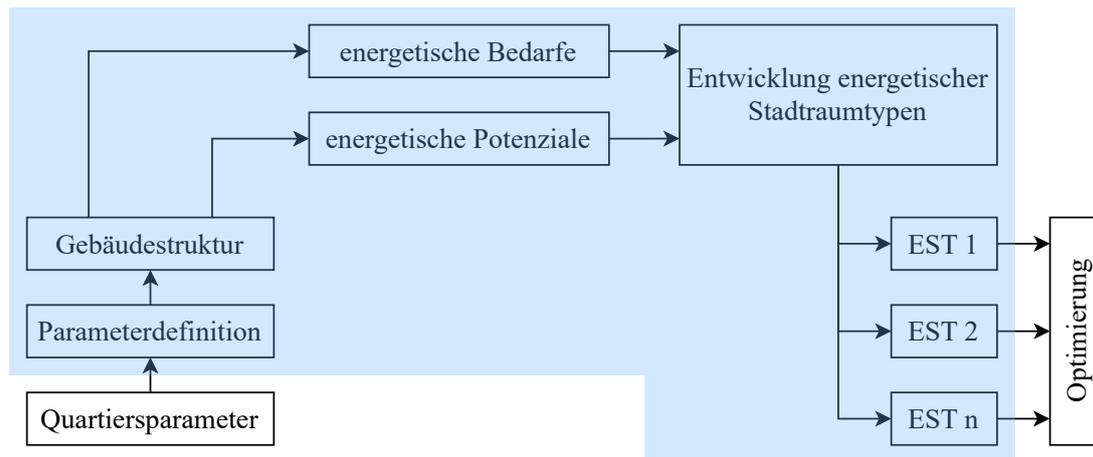


Abbildung 5.2.: Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von [UrbanReNet](#) in das Konzept zur Implementierung der [EST](#) in den [SESMG](#). Untersuchungsschwerpunkte in blau hervorgehoben. Abk.: EST: Energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

Der quartiersspezifische Ansatz von [UrbanReNet](#) analysiert [EST](#) auf Gebietsebene, wobei Einzelgebäude nicht betrachtet werden [39]. Konzepte zur Strom- und Wärmeversorgung werden in [UrbanReNet](#) nicht entwickelt. Dennoch bieten die [EST](#) einen ersten Ansatzpunkt zur Ermittlung von [THG](#)-Emissionen und zur Abschätzung von Einsparpotenzialen.

Der Ansatz der Analyse städtischer Strukturen ermöglicht es, die energetischen Eigenschaften eines Stadtgebiets mit vergleichsweise geringem Aufwand zu erfassen. Durch die Verwendung typisierter Stadtbausteine können große Stadtbereiche systematisch und schnell analysiert werden [7].

5.2.3. D-ECA und MODER

Die Softwaretools [D-ECA](#) und [MODER](#) unterstützen Entscheidungen zur Energieeffizienz und Optimierung geplanter Stadtquartiere. Die Softwaretools ermöglichen die Modellierung und Bewertung der Energieeffizienz eines Quartiers. Ähnlich wie bei [UrbanReNet](#) werden dabei ausschließlich energetische Bedarfe und Potenziale erfasst [36]. Konzepte zur Umsetzung einer Strom- und Wärmeversorgung werden nicht entwickelt, ebenso erfolgt keine Optimierung hinsichtlich Kosten oder Emissionen.

[Abbildung 5.3](#) zeigt eine Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von [D-ECA](#) und [MODER](#) in den Entwicklungsprozess der [EST](#).

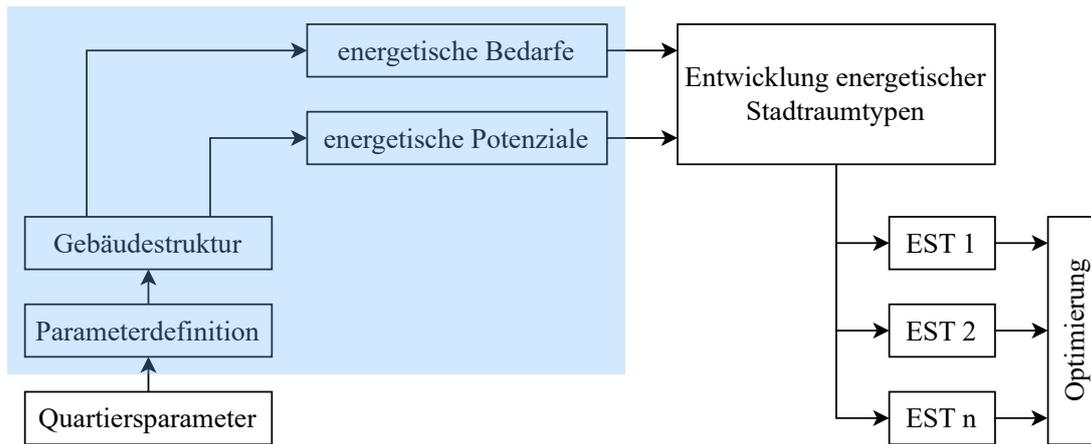


Abbildung 5.3.: Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von **D-ECA** und **MODER** in das Konzept zur Implementierung der **EST** in den **SESMG**. Untersuchungsschwerpunkte in blau hervorgehoben. Abk.: EST: Energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

Die Softwaretools ermöglichen eine schnelle Bewertung verschiedener Versorgungskonzepte bis hin zu einer **THG**-neutralen Versorgung [36]. Durch die Verwendung vordefinierter Gebäudetypen und voreingestellter Kennwerte können Energieeinsparpotenziale schnell bewertet werden. Voreingestellte Standardwerte können unplausible Ergebnisse verursachen, da eine Anpassung durch die Anwendenden nicht zwingend erforderlich ist. Selbst wenn individuelle Daten vorliegen, erfordern die Softwaretools keine Eingabe dieser Werte [36]. Die Verwendung von Standardwerten kann somit zu einer reduzierten Ergebnisgenauigkeit führen [36, 56].

Nach dem **D-ECA** und **MODER** wird das Quartier nur indirekt als Gesamtsystem erfasst. Der Ansatz der Softwaretools basiert auf der detaillierten Betrachtung einzelner Gebäude, deren Ergebnisse zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden [39]. Der Fokus auf Gebäudetypen anstelle von **EST** ermöglicht die Analyse einzelner Gebäude, erhöht jedoch den Eingabeaufwand besonders bei großen Quartieren [36]. Aus diesem Grund eignet sich das Softwaretool insbesondere für kleinere Gebiete mit wenigen Einzelgebäuden [39]. Quartierslösungen wie Wärmenetze können zwar dargestellt werden, die Entscheidung über den Anschluss einzelner Gebäude liegt jedoch bei den Anwendenden [36].

5.2.4. **TABULA** und **Episcope**

Die Forschungsprojekte **TABULA** und **EPISCOPE** konzentrieren sich auf die Erstellung einer Gebäudetypdatenbank [42]. Diese Datenbank dient als Grundlage für Bottom-up-Modelle, die den Energieverbrauch im Wohngebäudesektor analysieren. Konzepte zur Strom- und Wärmeversorgung werden mit der **TABULA**-Datenbank jedoch nicht entwickelt oder optimiert.

Die Auswahl der Optimierungskriterien und die Ausgestaltung eines Quartiersansatzes hängen von den verwendeten Softwaretools und nicht von der **TABULA**-Datenbank ab. Dennoch fördert die Datenbank den Einsatz von Bottom-up-Modellen, da sie Potenziale und Bedarfe auf Basis einzelner Gebäude strukturiert bereitstellt.

Abbildung 5.4 zeigt eine Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von **TABULA** und

EPISCOPE in den Entwicklungsprozess von EST.

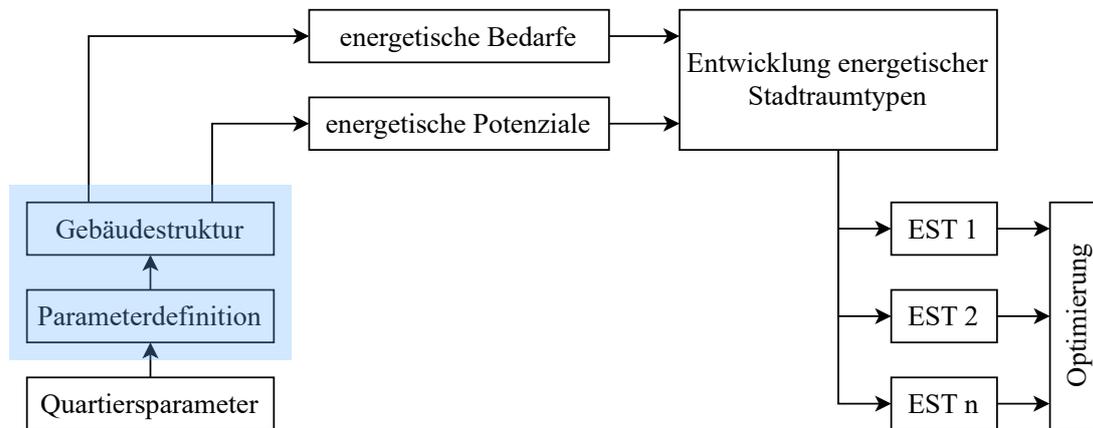


Abbildung 5.4.: Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von TABULA und EPISCOPE in das Konzept zur Implementierung der EST in den SESMG. Untersuchungsschwerpunkte in blau hervorgehoben. Abk.: EST: Energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

5.2.5. SimStadt

SimStadt ist eine Simulationsplattform zur Planung und Bewertung von Quartieren anhand energetischer Eigenschaften. Dabei nutzt SimStadt die Gebäudetypologie von TABULA und erweitert diese um zusätzliche Daten.

Eine Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von SimStadt in das Konzept zur Implementierung von EST in den SESMG, ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

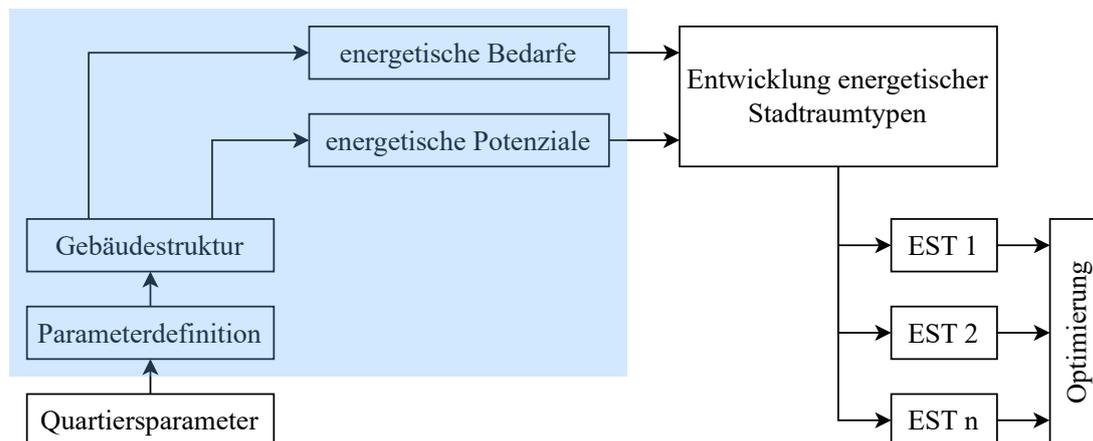


Abbildung 5.5.: Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte von SimStadt in das Konzept zur Implementierung der EST in den SESMG. Untersuchungsschwerpunkte in blau hervorgehoben. Abk.: EST: Energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

In SimStadt werden die Gebäudegeometrie sowie deren energetische Bedarfe und Poten-

ziale erfasst [50, 57]. SimStadt entwickelt weder Konzepte zur Umsetzung einer Strom- und Wärmeversorgung, noch erfolgt eine Optimierung hinsichtlich Kosten oder Emissionen. Für die Simulation greift SimStadt auf 3D-Gebäudedaten zurück. Die verfügbaren 3D-Gebäudedaten bilden nur Bestandsgebäude ab, während für Neubauquartiere eine manuelle Erstellung der Daten mit CAD-Programmen erforderlich ist [50].

5.2.6. SESMG

Die Methode der **ESM** ermöglicht unter anderem die Optimierung der Strom- und Wärmeversorgung von Quartieren. Mit dem **SESMG** erfolgt eine Optimierung hinsichtlich der Kosten und **THG**-Emissionen [5]. Damit ist der **SESMG** das einzige vorgestellte Softwaretool, das ein Versorgungskonzept für Strom und Wärme entwickelt und optimiert. **Abbildung 5.6** zeigt eine Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte der **ESM** mit dem **SESMG** in den Entwicklungsprozess der **EST**.

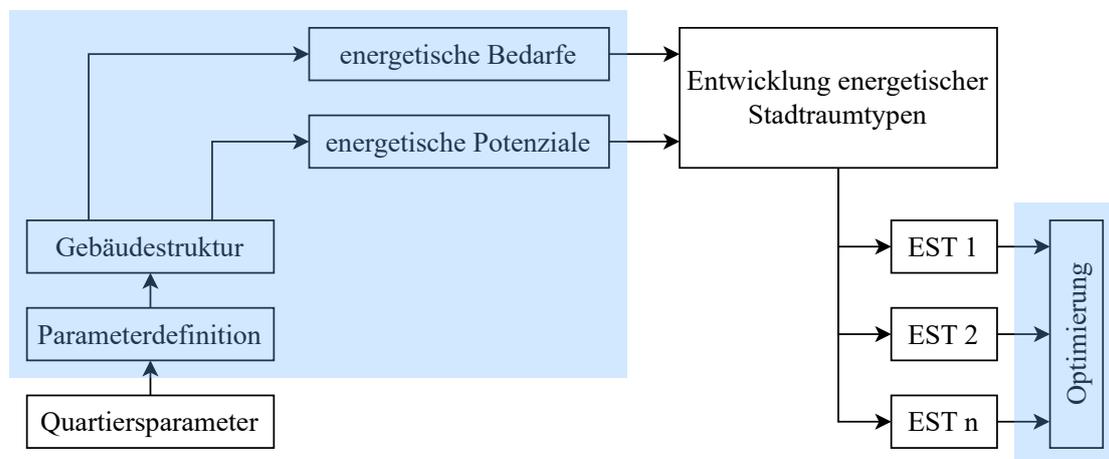


Abbildung 5.6.: Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte des **SESMG** in das Konzept zur Implementierung der **EST** in den **SESMG**. Untersuchungsschwerpunkte in blau hervorgehoben. Abk.: EST: Energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

Der **SESMG** optimiert Quartiere auf Basis der energetischen Eigenschaften von Gebäuden. Die Eingangsparameter werden auf Gebäudeebene erhoben und die Ergebnisse ebenfalls gebäudespezifisch berechnet. Einzelgebäude werden nach dem Bottom-up-Ansatz zu einem Quartier zusammengefasst, um Synergien der Gebäudetechnologien berücksichtigen zu können. Die energetischen Bedarfe und Potenziale des Quartiers werden auf Basis der Gebäudedaten ermittelt.

Verschiedene Quartiere werden individuell und unabhängig voneinander optimiert. Eine Einteilung in energetische Stadtraumtypen oder eine Zusammenfassung quartierstypischer Ergebnisse erfolgt nicht. Jede Untersuchung basiert auf spezifischen Eingangsdaten und zielt darauf ab, ein angepasstes Versorgungskonzept für das jeweilige Quartier zu entwickeln.

5.3. Bewertung der Untersuchungsschwerpunkte

Die Einordnung der Untersuchungsschwerpunkte zeigt, dass nur [UrbanReNet](#) und die Einteilung nach Roth Quartiere in typische [EST](#) kategorisieren. Die [TABULA](#)-Datenbank ermöglicht zwar die Einteilung von Gebäuden, jedoch nicht von Quartieren. Die Projekte [D-ECA](#), [MODER](#) und [SimStadt](#) ermöglichen eine schnelle Bewertung der energetischen Eigenschaften von Quartieren, ohne jedoch diese zu kategorisieren oder in [EST](#) zusammenzufassen.

Für den Modellierungsansatz in [FB](#) ist sowohl eine Einteilung in [EST](#) als auch eine Optimierung der Energiesysteme notwendig. Die Einteilung von [EST](#) in [UrbanReNet](#) bietet einen geeigneten Ansatz für die Entwicklung einer [EST](#)-Datenbank im Rahmen des Modellierungsansatzes von [FB](#). Der [SESMG](#) ermöglicht eine Optimierung der Energiesysteme für die in der [EST](#)-Datenbank definierten Siedlungstypen. Beide Ansätze liefern Ergebnisse für Teilbereiche des Konzepts zur Implementierung [EST](#) in den [SESMG](#). Ziel ist es, die Einteilung von [EST](#) aus [UrbanReNet](#) zu nutzen und in den [SESMG](#) zu integrieren. Welche Eingangsparameter zur Einteilung von [EST](#) in [UrbanReNet](#) genutzt wurden und welche für den [SESMG](#) relevant sind, wird in [Kapitel 6](#) untersucht.

6. Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG

Für die Implementierung von **EST** in den **SESMG** ist eine Untersuchung und Einordnung der Eingangsparameter des **SESMG** erforderlich. Das Projekt **UrbanReNet** aus der energetischen Leitplanung bildet die Grundlage für die Entwicklung an den **SESMG** angepasster **EST**. Im Folgenden wird der Modellierungsansatz aus **Abbildung 2.1** eingeordnet und die Eingangsparameter aus **UrbanReNet** sowie dem **SESMG** untersucht.

6.1. Hybrider Modellierungsansatz

Der in **Abbildung 2.1** dargestellte Modellierungsansatz kombiniert Elemente aus Bottom-up- und Top-down-Ansätzen. Die Implementierung **EST** in den **SESMG** nach dem in **Abbildung 5.1** dargestellten Konzept basiert auf einem Hybrid-Ansatz. Dieser Ansatz ist in **Abbildung 6.1** dargestellt.

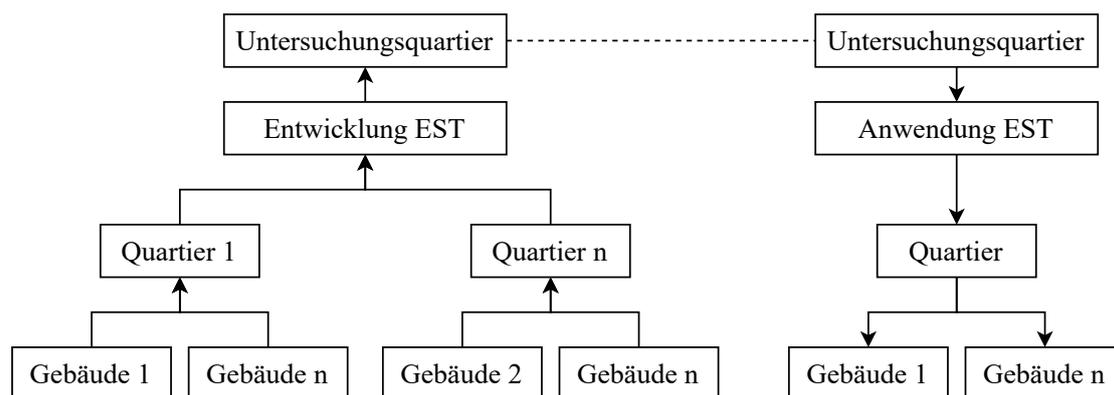


Abbildung 6.1.: Hybrider Modellierungsansatz zur Entwicklung von **EST**. Links: Entwicklung der **EST** nach dem Bottom-up-Ansatz, Rechts: Anwendung der **EST** nach dem Top-down-Ansatz. Eigene Darstellung.

Die Optimierung der **EST** erfolgt nach dem Bottom-up-Ansatz. Dazu werden die energetische Bedarfe und Potenziale auf Gebäudeebene ermittelt und die Energiesysteme der Quartiere mithilfe der **ESM** optimiert. Ein Konzept zur nachhaltigen Strom- und Wärmeversorgung dieser Gebäude entsteht unter der Berücksichtigung aller Gebäude auf Quartiersebene. Aus diesen Ergebnissen lassen sich **EST** entwickeln.

Die Übertragung der Ergebnisse der **EST** auf das Untersuchungsquartier basiert auf dem Top-down-Ansatz. Das Untersuchungsquartier wird dabei als Gesamtsystem betrachtet und mit den **EST** verglichen. Anschließend werden die Ergebnisse auf Quartiersebene auf die Gebäude angewendet. Dazu wird das ausgewählte Energiesystem mit der optimalen Nutzung energetischer Potenziale und Deckung der Bedarfe auf das Untersuchungsquartier angewendet.

6.2. Eingangsparemeter in UrbanReNet

Das Forschungsprojekt **UrbanReNet** ermöglicht die Einteilung von Stadträumen anhand bau- und freiraumstruktureller Kennwerte sowie energetischer Potenziale und Bedarfe. Die Einteilung umfasst 13 **EST**, die überwiegend Wohn- und Mischnutzung, gewerbliche Nutzung oder Freiräume abbilden [6]. Der Schwerpunkt von **FB** liegt auf der Betrachtung von Wohnquartieren [4]. Daher werden in dieser Untersuchung nur die **EST** mit Wohn- und Mischnutzung analysiert. Diese umfassen die **EST**-Typen 1-8 aus **Tabelle 4.2**.

Zur Erstellung der **EST**-Steckbriefe¹³ und als Berechnungsgrundlage für das Softwaretool wurden in **UrbanReNet** typische **EST**-Parameter¹⁴ ermittelt. Grundlage bildeten Sensitivitätsanalysen, in denen Referenzgebiete mit einheitlichen baustrukturellen und energetischen Eigenschaften untersucht wurden [6]. Ziel dieser Analysen war die Definition der **EST**-Typen sowie die Überprüfung ihrer Einteilung. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen werden in Primär-, Sekundär- und Tertiärdaten unterteilt.

Primär-, Sekundär- und Tertiärdaten Primärdaten sind absolute Kennwerte, die sich direkt aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse ableiten. Sie umfassen beispielsweise die Grundfläche beheizter Gebäude oder die Grundstücksfläche. Sekundärdaten sind relative Kennwerte, die sich indirekt aus Primärdaten ergeben. Ein Beispiel ist die Grundflächenzahl. Sie beschreibt das Verhältnis der Grundfläche des Gebäudes zur Gesamtfläche des Grundstücks und ist ein Maß für die Bebauungsdichte [6]. Tertiärdaten entstehen aus der Kombination von Sekundärdaten mit externen Werten. Dabei wird zwischen Tertiärdaten für die **EST**-Steckbriefe und solchen für das Softwaretool unterschieden. Tertiärdaten für Steckbriefe beziehen sich auf eine Fläche von einem Hektar oder werden als Faktoren angegeben. Im Softwaretool können Tertiärdaten durch eine Eingabe der **BAK**, Korrektur der Vollgeschosse oder der Grundflächenzahl an spezifische Gegebenheiten angepasst werden. **Abbildung 6.2** zeigt den Ablauf der Spezifizierung.

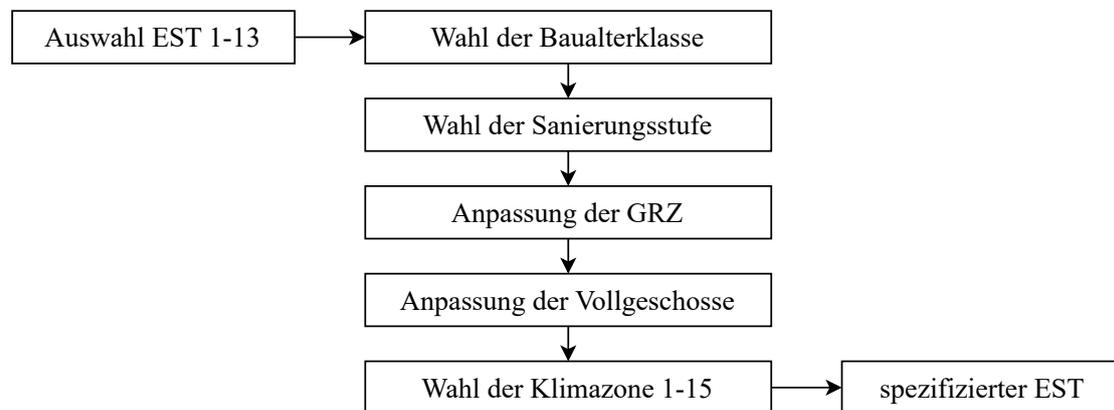


Abbildung 6.2.: Ablaufschema zur Spezifizierung von **EST** im Softwaretool von **UrbanReNet**. Links: Eingabe, Mitte: Anpassung, Rechts: Ausgabe. Abk.: **EST**: Energetische Stadtraumtypen, **GRZ**: Grundflächenzahl. Eigene Darstellung nach [6].

¹³Eine Übersicht aller **EST**-Steckbriefe findet sich hier: [7].

¹⁴Eine Übersicht der verwendeten **EST**-Parameter findet sich in der Parametermatrix hier: [6].

Entkopplung baustruktureller von energetischen Eigenschaften Die Untersuchung in [UrbanReNet](#) zeigt, dass energetische Eigenschaften nicht allein aus baustrukturellen Eigenschaften abgeleitet werden können. Während sich Potenziale aus baustrukturellen Eigenschaften ergeben, gilt dies nicht für Bedarfe. Durch diese Entkopplung der Bedarfe von den baustrukturellen Eigenschaften erhöht sich die Varianz der [EST](#) [6].

Baustrukturale Kennwerte Zur Reduktion der Eingangsparameter wurden zahlreiche Annahmen getroffen und vereinfachte Verfahren angewendet.¹⁵ Beispielsweise wurde der Fensterflächenanteil bei allen [EST](#) auf 25 % festgelegt und eine Geschosshöhe von 3 m angenommen. Die Hüllfläche der Gebäude wurde durch ein vereinfachtes Verfahren ermittelt, das die Dachform und -fläche sowie die Fassadenfläche abhängig vom jeweiligen [EST](#) berücksichtigt. Der Strom- und Warmwasserverbrauch wurde durch Sensitivitätsanalysen auf Grundlage der Haushaltsgröße, Haushaltsanzahl und Anzahl der Einwohner für jeden [EST](#) ermittelt [6]. Im Softwaretool kann die Bebauungsdichte durch Anpassung der Grundflächenzahl und die Hüllfläche durch Anpassung der Vollgeschosse korrigiert werden.

Bedarfe Die Bedarfe lassen sich in Jahresheizwärme-, Jahrestrinkwarmwasser- und Jahresstrombedarf unterteilen. Der Jahresheizwärmebedarf wurde flächenbezogen für jede [BAK](#) und Sanierungsstufe ermittelt. Der Jahrestrinkwarmwasserbedarf wurde mit 500 kWh pro Einwohner festgelegt und der Jahresstromverbrauch abhängig von der Haushaltsgröße bestimmt [6].

Potenziale Die Potenziale für Solarthermie und [PV](#) sind nach Verwendungsart und der Ausrichtung der Gebäudedächer differenziert. Die Dach- und Fassadenflächen sind dabei in die Ausrichtungen Nord, Süd, West und Ost kategorisiert. Das Potenzial für Geothermie basiert auf flächenbezogenen Berechnungen. Für jeden [EST](#) gelten dabei einheitliche Werte für den Abstand der geothermischen Sonden und die Bohrtiefe. Unterschiede in den geothermischen Potenzialen zwischen den [EST](#) ergeben sich aus der verfügbaren Fläche und der Anzahl einsetzbarer geothermischer Sonden. Dem Potenzial zur Biomassenutzung liegen Literaturwerte zugrunde, die auf die Fläche und einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr bezogen sind [6].

Eingangsparameter In [UrbanReNet](#) basiert die Einteilung der [EST](#) auf baustrukturellen Kennwerten. Die Parameter zur Einteilung werden nicht gewichtet oder vereinfacht. Für jeden [EST](#) sind energetische Bedarfe und Potenziale angegeben. Um die [EST](#)-spezifischen Bedarfe und Potenziale detaillierter abbilden zu können, werden die [EST](#) weiter spezifiziert. Die Parameter zur Spezifizierung im Softwaretool sind:

- Auswahl der [BAK](#)
- Korrektur der Grundflächenzahl
- Korrektur der Vollgeschosse
- Anpassung der Klimazone

Die Eingangsparameter der [EST](#)-Steckbriefe umfassen:

¹⁵Eine Beschreibung aller Annahmen und Vereinfachungen findet sich hier: [6].

- BAK
- Sanierungsstufen
- Ausrichtung von Potenzialflächen (Nord, Süd, West oder Ost)
- Art der Potenzialfläche (Dach oder Fassade)

Einordnung der EST Die baustrukturelle Einteilung aus [UrbanReNet](#) ermöglicht eine Einteilung städtischer Siedlungsstrukturen in wenige [EST](#). Durch die Betrachtung aller [EST](#)-Typen und Subtypen mit überwiegender Wohn- oder Mischnutzung, ergeben sich insgesamt zehn verschiedene [EST](#). Ein [EST](#)-Typ der durch [EST](#)-Subtypen näher beschrieben wird, bedarf keiner eigenen Betrachtung sondern wird durch die Subtypen vollständig abgedeckt [6]. Somit werden die [EST](#)-Typen 1 und 4 durch die [EST](#)-Subtypen 1A, 1B sowie 4A und 4B beschrieben und müssen nicht eigenständig betrachtet werden (vergleiche [EST](#)-Typen aus [Anhang A](#)).

Zur Ermittlung energetischer Potenziale und Bedarfe erfolgt im Softwaretool eine Spezifizierung der vorgegebenen [EST](#) durch weitere Parameter (vergleiche [Abbildung 6.2](#)). Auch in den [EST](#)-Steckbriefen werden beispielsweise die Jahresheizwärmebedarfe nach [BAK](#) und Sanierungsstufen differenziert angegeben.

Die Differenzierung der insgesamt zehn [EST](#)-Typen anhand zusätzlicher Parameter zur Spezifizierung erhöht die Gesamtanzahl möglicher [EST](#). Im Rahmen des Modellierungsansatzes aus [Abbildung 2.1](#) ist die Optimierung von jedem der möglichen [EST](#) erforderlich. Durch die Spezifizierung der [EST](#)-Steckbriefe aus den neun verschiedenen [BAK](#) und den vier Sanierungsstufen ergeben sich insgesamt 36 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Werden zusätzlich die Potenziale berücksichtigt, entstehen bei zwei Arten der Potenzialflächen und vier Ausrichtungen acht weitere Kombinationsmöglichkeiten pro [EST](#) [6, 7]. Für die Erstellung einer [EST](#)-Datenbank in [FB](#) ist es notwendig, alle Kombinationsmöglichkeiten und Spezifizierungen der energetischen Bedarfe und Potenziale zu berücksichtigen. Bei zehn [EST](#), 36 Bedarfsvarianten und acht Potenzialvarianten ergeben sich 2880 zu optimierende Szenarien.

Einordnung der energetischen Einzelelemente und Straßenraumtypen Die Einteilung in energetische Einzelelemente umfasst beispielsweise Krankenhäuser, Schwimmbäder, Sportplätze oder Tankstellen. Dabei handelt es sich um Gebäude, die nach der Methode aus [UrbanReNet](#) nicht in der Einteilung von [EST](#) berücksichtigt werden. Der Schwerpunkt von [FB](#) liegt in der Untersuchung von Quartieren mit überwiegender Wohnnutzung [4]. Daher ist eine Betrachtung der energetischen Einzelelemente aus [UrbanReNet](#), die ausschließlich Nichtwohngebäude umfassen, für die Entwicklung des Modellierungsansatzes aus [FB](#) nicht relevant. Ebenso ist eine Differenzierung in verschiedene Straßenraumtypen wie Land-, Bundes- oder innerörtliche Straßen im Modellierungsansatz aus [FB](#) nicht von Bedeutung. Für die Betrachtung von Quartieren mit überwiegender Wohnnutzung sind ausschließlich innerörtliche Straßen relevant.

Anwendung der Methode aus UrbanReNet in FB Die Methoden und Ergebnisse aus [UrbanReNet](#) beantworten die Forschungsfrage nicht vollständig. Die Einteilung von [EST](#) ermöglicht eine Abbildung des Gebäudebestands in Deutschland. Für eine Bewertung der [EST](#)-Typen anhand ihrer energetischen Potenziale und Bedarfe, ist jedoch eine Spezifizierung durch zusätzliche Parameter erforderlich. Die Abbildung jedes [EST](#)-Typs in allen möglichen Kombinationen der Parameter [BAK](#), Sanierungsstufe, Ausrichtung und

Art der Potenzialfläche führt zu einer großen Anzahl an möglichen **EST**. Diese detaillierte Methode aus **UrbanReNet** eignet sich für den Modellierungsansatz in **FB** nicht, da die große Anzahl der **EST** zu einem erheblichen Aufwand in der Optimierung führt. Im Folgenden wird untersucht, wie die baustrukturelle Einteilung der **EST**-Typen 1-8 aus **UrbanReNet** für eine Implementierung in den **SESMG** angepasst werden kann.

6.3. Vereinfachtes Konzept zur Bedarfsermittlung

Die Untersuchung von **UrbanReNet** zeigt, dass es nicht möglich ist, von baustrukturellen auf energetische Bedarfe zu schließen. Die Spezifizierung der energetischen Bedarfe eines **EST** erfolgt in **UrbanReNet** durch die Parameter **BAK** und Sanierungsstand [6]. So kann die aktuelle Sanierungsstufe der Gebäude und die damit verbundenen energetischen Bedarfe der **EST** bestimmt werden. Im Gegensatz dazu benötigt der **SESMG** individuelle Werte für Wand-, Fenster- und Dachflächen sowie die dazugehörigen U-Werte nach der neuesten Renovierung. Mithilfe der jährlichen Strom-, Wärme- und Kältebedarfe sowie Standardlastprofilen werden die energetischen Bedarfe für jedes Gebäude individuell ermittelt [28]. **Abbildung 6.3** zeigt ein Konzept, um energetische Bedarfe anhand weniger Parameter abzubilden.

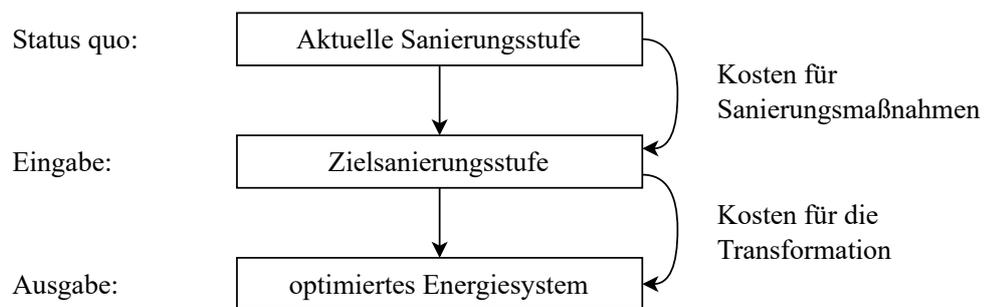


Abbildung 6.3.: Kostenaufteilung nach einem vereinfachten Bedarfskonzept. Aufteilung der Gesamtkosten für die Optimierung in Kosten für Sanierungsmaßnahmen und Kosten für die Transformation. Eigene Darstellung.

Nach dem Modellierungsansatz aus **Abbildung 2.1** bedarf es einer Optimierung der Energiesysteme eines jeden **EST**. Die **ESM** mit dem **SESMG** bietet dazu eine geeignete Methode [5]. In der **ESM** werden Technologien zur Strom- und Wärmeversorgung, Sanierungsmaßnahmen, Wetter- und Gebäudedaten sowie wirtschaftliche Faktoren und deren Wechselwirkungen berücksichtigt [5, 58]. Sanierungsmaßnahmen umfassen dabei die Verbesserung der Dämmung von Dächern, Außenwänden, Decken und Fenstern. Die Untersuchung von Falke et al. [58] schreibt Sanierungsmaßnahmen eine wichtige Bedeutung für die Steigerung der Energieeffizienz von Energiesystemen zu. Die Häufigkeit von Sanierungsmaßnahmen nimmt in Szenarien mit geringeren Emissionen zu [58]. Daher lässt sich annehmen, dass bei der Optimierung der Energiesysteme der **EST** Sanierungsmaßnahmen für die meisten Gebäude berücksichtigt werden.

Abbildung 6.3 zeigt ein Konzept um die Gesamtkosten der Optimierung aufzuteilen. Ausgangspunkt der Optimierung des Energiesystems bildet die aktuelle Sanierungsstufe der Gebäude im **EST**. Die Gesamtkosten umfassen die Kosten für Sanierungsmaßnahmen und die Kosten für die weitere Transformation. Zu den Transformationskosten zählen beispielsweise Investitionskosten in neue Wärmepumpen oder den Anschluss und Betrieb

eines Fernwärmenetzes [28]. Die Zielsanierungsstufe bildet den aktuellen Gebäudebestand von ausschließlich bereits sanierten Gebäuden ab. Sie zeigt den für eine nachhaltige Transformation notwendigen Mindeststandard der energetischen Eigenschaften von Gebäuden. Für die Optimierung der Energiesysteme nach dem Modellierungsansatz aus [Abbildung 2.1](#) wird nicht die aktuelle Sanierungsstufe der Gebäude im [EST](#), sondern die Zielsanierungsstufe dieser betrachtet. So lassen sich die Kosten für die Sanierungsmaßnahmen von den Kosten zur Optimierung der Energiesysteme trennen. Nach diesem Konzept wird für die Einteilung der [EST](#) ausschließlich der Gebäudebestand der Zielsanierungsstufe berücksichtigt. Die aktuelle Sanierungsstufe findet in der Einteilung der [EST](#) keine Berücksichtigung. Die Kosten für die Sanierungsmaßnahmen können unabhängig von dem Modellierungsansatz aus [Abbildung 2.1](#) ermittelt und nachträglich zu den Kosten für die Transformation addiert werden.

Durch dieses Konzept reduziert sich die Anzahl der Eingangsparameter zur Einteilung der [EST](#). Es ist nicht notwendig, die Bedarfe der Gebäude abhängig von der [BAK](#) und dem aktuellen Sanierungsstand zu bestimmen. Da jedes Gebäude innerhalb eines [EST](#) mit den energetischen Eigenschaften der Zielsanierungsstufe betrachtet wird entfällt die Notwendigkeit, die baustrukturellen Eigenschaften von energetischen Eigenschaften wie in [UrbanReNet](#) zu entkoppeln. Dabei kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich der gesamte Gebäudebestand von Deutschland zu einer einheitlichen Zielsanierungsstufe transformieren lässt. Dadurch ist die Sanierungsstufe nach diesem Konzept ein für die Einteilung von [EST](#) relevanter Eingangsparameter.

6.4. Eingangsparameter im SESMG

Zur Implementierung von [EST](#) in den [SESMG](#) sind abgestimmte Parameter zur Einteilung von [EST](#) notwendig. Im Folgenden werden die Eingangsparameter des [SESMG](#) untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

6.4.1. Abgrenzung quartiersspezifischer Parameter

Der [SESMG](#) erfordert die Eingabe von Eingangsparametern zur Optimierung urbaner Energiesysteme. Diese erfolgt über Kalkulationstabellen, die als Grundlage für die folgende Untersuchung dienen [28]. Die Eingangsparameter des [SESMG](#) unterteilen sich in quartiersspezifische und quartiersunspezifische Parameter.

Quartiersunspezifische Parameter Quartiersunspezifische Parameter sind unabhängig von den baustrukturellen und energetischen Eigenschaften eines Quartiers und können quartiersübergreifend verwendet werden. Dabei gelten sie in der vorliegenden Untersuchung als nicht relevant für die Einteilung und Kategorisierung von Quartieren und finden daher in dieser Untersuchung keine Berücksichtigung. Zu den quartiersunspezifischen Parametern gehören beispielsweise Technologiedaten wie Kostenparameter, Emissionsparameter oder technische Daten wie Wirkungsgrade und Lebensdauer. Auch Brenn- und Heizwerte von Brennstoffen werden nicht gebäudespezifisch definiert.

Quartiersspezifische Parameter Quartiersspezifische Parameter beschreiben die baustrukturellen und energetischen Eigenschaften eines Quartiers. Diese Parameter erfordern eine individuelle und auf das Untersuchungsquartier angepasste Eingabe auf Gebäudeebene. In jeder Untersuchung erfolgt eine einzelne Betrachtung der Gebäudeeigenschaften. Die

quartiersspezifischen Parameter des **SESMG** bilden die Grundlage für die Einteilung von **EST** und lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Quartiersspezifische Technologiedaten
- Quartiersdaten
- Verbrauchsdaten
- Gebäudedaten
- Nutzungsdaten
- Solarthermie- und **PV**-Daten
- Geothermiedaten
- Windenergiedaten
- Wetter- und Umweltdaten

6.4.2. Auswahl relevanter Eingangsparameter

Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht der quartiersspezifischen Eingangsparameter des **SESMG**, die nachfolgend hinsichtlich ihrer Relevanz für die Einteilung von **EST** in **FB** untersucht werden. Aufgrund der Anforderungen aus **FB** können einige Eingangsparameter des **SESMG** als nicht relevant eingestuft werden.

Quartiersspezifische Technologiedaten Die Gruppe der quartiersspezifischen Technologiedaten aus **Tabelle 6.1** umfasst Technologiedaten, die sich abhängig von dem zu untersuchenden Quartier unterscheiden. Die Parameter Flächenbedarf und die maximale Länge von Erdsonden beeinflussen das geothermische Potenzial von Quartieren. Sie sind jedoch unabhängig von baustrukturellen Eigenschaften der **EST**. Beispielsweise bleibt die maximale Erdsondenlänge bei unterschiedlichen Gebäudestrukturen gleich, sei es eine Blockrandbebauung oder ein Einfamilienhaus. Der Flächenbedarf der Erdsonden ist durch festgelegte Abstände definiert, die bei der Installation einzuhalten sind. Diese umfassen beispielsweise den Abstand zu Gebäuden, Grundstücksgrenzen oder anderen Erdsonden [60]. Die Vor- und Rücklauftemperaturen für Solarthermieanlagen sind ebenfalls unabhängig von der Gebäudestruktur und haben keinen Einfluss auf diese.

Somit sind Eingangsparameter aus der Gruppe der quartiersspezifischen Technologiedaten für die Einteilung von **EST** in **FB** nicht relevant. Für die Optimierung der **EST** bedarf es keiner individuellen Betrachtung dieser Parameter, da sie quartiersübergreifend genutzt werden.

Quartiersdaten Quartiersdaten umfassen standortabhängige, aber nicht gebäudespezifische Eingangsparameter des **SESMG**. Für die Auslegung eines Wärmenetzes müssen im **SESMG** spezifische Quartiersdaten definiert werden, einschließlich der Koordinaten eines potenziellen Standorts der Heizzentrale sowie aller Hausanschlusspunkte. Dabei wird jedes Gebäude mit einem Wärmebedarf individuell betrachtet.

Den Verlauf des Leitungsnetzes legt der **SESMG** auf Grundlage definierter Wärmenetz-knoten abschnittsweise fest. Die Wärmenetz-knoten werden durch die Eingabe von Koordinaten individuell festgelegt und orientieren sich in der Regel an dem Straßennetz des

Tabelle 6.1.: Quartiersspezifische Eingangsparameter des **SESMG** aus [59].

| Parameter | Beschreibung | Relevanz |
|--|--|----------|
| Quartiersspezifische Technologiedaten | | |
| Vor- und Rücklauftemperatur | für Solarthermieanlagen | Nein |
| Flächenbedarf der Erdsonden | für Geothermiepotenzial | Nein |
| maximale Erdsondenlänge | für Geothermiepotenzial | Nein |
| Quartiersdaten | | |
| Hausanschlusspunkte | für Auslegung von Wärmenetzen | Nein |
| Ort der Heizzentrale | für Auslegung von Wärmenetzen | Nein |
| Struktur des Wärmenetzes | für Auslegung von Wärmenetzknotten und Leitungsabschnitten | Nein |
| Verbrauchsdaten | | |
| Strombedarf | Verbrauch in kWh pro Jahr | Ja |
| Wärmebedarf | Verbrauch in kWh pro Jahr | Ja |
| Kältebedarf | Verbrauch in kWh pro Jahr | Ja |
| Gebäudedaten | | |
| Flächen von Wand, Dach und Fenster | | Ja |
| U-Werte für Wand, Dach und Fenster | Werte nach der letzten Sanierung | Ja |
| Nutzungsdaten | | |
| niedrigste Wohnraumtemperatur | | Ja |
| Gebäudeinnentemperatur | | Ja |
| niedrigste Vorlauftemperatur | für das Heizsystem | Ja |
| Solarthermie- und Photovoltaikdaten | | |
| Nutzbare Dachfläche | | Ja |
| Dachwinkel | | Ja |
| Albedo-Wert | | Ja |
| Dachausrichtung | | Ja |
| Geothermiedaten | | |
| Geothermiepotenzialfläche | | Ja |
| Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs | | Ja |
| Erdreichtemperatur | | Ja |
| Windenergiedaten | | |
| Mögliche Windenergiestandorte | | Nein |
| Wetter- und Umweltdaten | | |
| Solare Strahlung | für PV und Solarthermie | Ja |
| Höhe über dem Meeresspiegel | für PV und Solarthermie | Ja |
| Lufttemperatur | | Ja |
| Luftdruck | für Windkraftanlagen | Nein |
| Windgeschwindigkeit | für Windkraftanlagen, in 10 m Höhe | Nein |
| Rauhigkeitslänge | für Windkraftanlagen | Nein |
| Oberflächenwassertemperatur | für Flusswärmepumpen | Nein |
| Grundwassertemperatur | in 6–10 m Tiefe | Ja |

Quartiers. Der Optimierungsprozess untersucht und bewertet die Auslegung eines Wärmenetzes durch die Verbindung eines Wärmenetzknötens mit dem nächsten. Die Auslegung eines Wärmenetzes ist in Gebieten mit hoher Wärmedichte wirtschaftlich sinnvoll [61]. Die Wärmedichte beschreibt den Wärmebedarf pro Flächeneinheit [62]. Sie wird durch die relative Anordnung der Gebäude zueinander bestimmt und ist unabhängig von deren absoluten Lage der Gebäude im Quartier.

Die Orte der Hausanschlusspunkte, der Heizzentrale sowie die Struktur des Wärmenetzes stellen Parameter dar, die die Ausgestaltung der EST beeinflussen. Sie definieren die technischen Vorgaben für die zu optimierenden Energiesysteme, haben jedoch keinen Einfluss auf die Einteilung der EST und sind daher in dieser Untersuchung nicht relevant.

Präselektion von Technologien Der SESMG erlaubt die Modellierung verschiedener Technologien, jedoch sind nicht alle für die Entwicklung von EST im Kontext von FB relevant. Der Einsatz von Windkraftanlagen stellt sich aufgrund von Abstandsregelungen und Lärmschutzvorgaben in Siedlungsräumen mit überwiegender Wohnnutzung als ungeeignet heraus [63]. Daher werden Windkraftanlagen bei der Entwicklung von EST nicht berücksichtigt. Eingangsparmeter des SESMG, wie Luftdruck, Windgeschwindigkeit oder Rauigkeitslänge, sind ausschließlich für die Modellierung von Windkraftanlagen relevant und werden somit vernachlässigt.

Flusswärmepumpen erfordern eine geografische Nähe zu Flüssen und werden in Siedlungsräumen mit überwiegender Wohnnutzung nur selten eingesetzt [64]. Aufgrund der Standortabhängigkeit ist eine Einbindung dieser Technologie in EST schwierig umsetzbar. Der Eingangsparmeter der Oberflächenwassertemperatur, der ausschließlich für Flusswärmepumpen benötigt wird, ist daher für die Entwicklung von EST nicht relevant.

Relevante Eingangsparmeter Die Eingangsparmeter, die in dieser Untersuchung nicht ausgeschlossen wurden, können für die Einteilung von EST relevant sein. Sie werden nach der Kategorisierung aus Kapitel 6.4.3 in Kapitel 6.4.4 und Kapitel 6.4.5 bewertet.

6.4.3. Kategorisierung relevanter Eingangsparmeter

Die Entwicklung von EST umfasst die Einteilung typischer Siedlungsräume anhand baustruktureller Eigenschaften sowie die Bewertung dieser Räume durch energetische Bedarfe und Potenziale. Entsprechend dieser Eigenschaften erfolgt die Einteilung der relevanten Eingangsparmeter des SESMG aus Tabelle 6.1 in die Bereiche Bedarf und Potenzial. Das Ziel der Kategorisierung ist es, Korrelationen oder Wechselwirkungen zwischen den Eingangsparmetern des SESMG zu erkennen und diese zusammenzufassen.

Bedarfsabhängige Parameter Eingangsparmeter, die die energetischen Bedarfe von Quartieren beeinflussen, können als bedarfsabhängige Parameter zusammengefasst werden. In Kapitel 6.4.4 erfolgt die Untersuchung der zur Ermittlung der energetischen Bedarfe relevanten Eingangsparmeter des SESMG aus Tabelle 6.1.

Potenzialabhängige Parameter Eingangsparmeter, die Einfluss auf die energetischen Potenziale nehmen, können als potenzialabhängige Parameter zusammengefasst werden. Kapitel 6.4.5 untersucht die für die Ermittlung der energetischen Potenziale relevanten Eingangsparmeter des SESMG aus Tabelle 6.1.

Modellbildende Parameter Parameter, die nicht für die grundsätzliche Einteilung von EST relevant sind, dienen der Beschreibung und detaillierten Ausgestaltung der EST-Modelle. Diese Parameter definieren die Komponenten des Energiesystemmodells der EST und bilden die städtebaulichen und strukturellen Merkmale von Quartieren ab. Das Modell umfasst Merkmale wie den Flächenbedarf von Erdsonden, die Struktur des Wärmenetzes im Quartier oder den Verlauf von Straßen [6]. Für jeden im Modellierungsansatz aus FB berücksichtigten EST ergibt sich ein individuelles Energiesystemmodell, welches für jedes EST mit dem SESMG optimiert wird.

6.4.4. Bedarfsabhängige Parameter

Zur Abbildung der energetischen Bedarfe eines Quartiers benötigt der SESMG Verbrauchsdaten, Gebäudedaten und Nutzungsdaten. Diese Parameter bilden die Grundlage für die bedarfsabhängigen Eingangsparameter des SESMG, die in Abbildung 6.4 dargestellt sind.

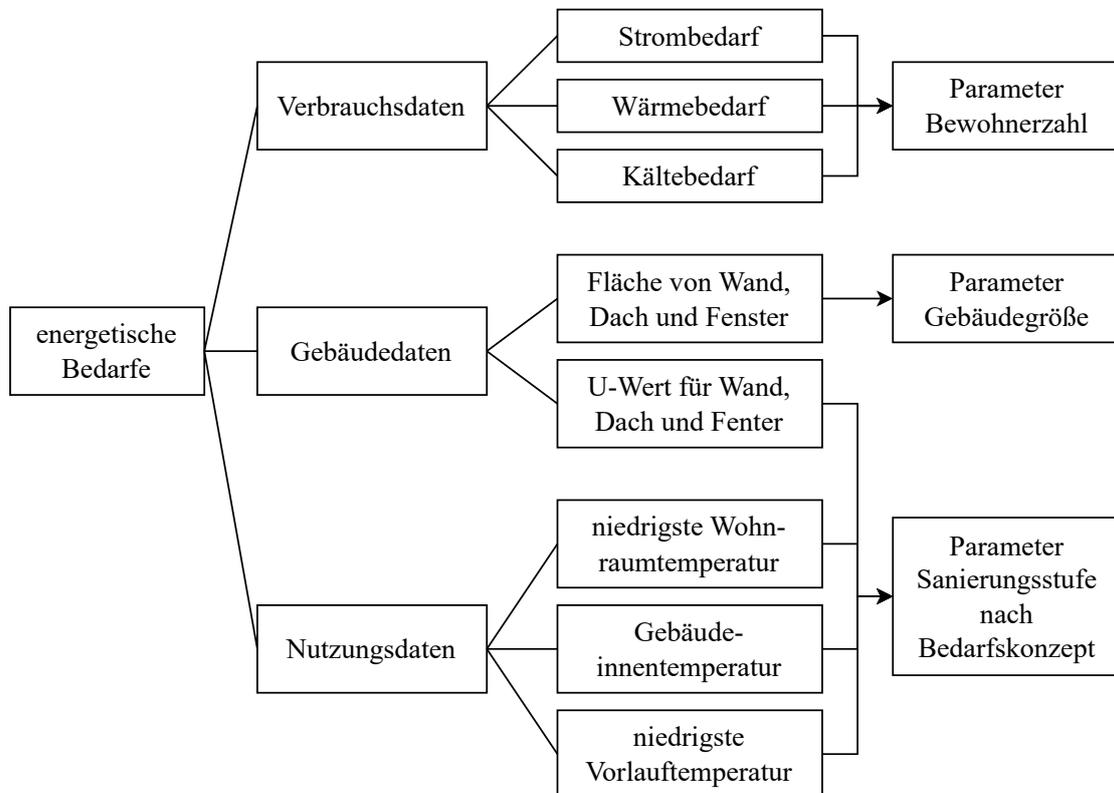


Abbildung 6.4.: Bedarfsabhängige Parameter des SESMG und deren Einordnung für die Entwicklung von EST. Eigene Darstellung.

Verbrauchsdaten Die Verbrauchsdaten umfassen den jährlichen Strombedarf, Wärmebedarf und Kältebedarf von jedem Gebäude im Quartier. Diese werden als kumulierte Werte in kWh pro Jahr angegeben. Die Anwendung von Standardlastgängen im SESMG ermöglicht eine zeitliche Auflösung der Verbrauchsdaten. Die Verbrauchsdaten sind abhängig von dem Nutzungsverhalten und der Anzahl der Bewohnenden sowie den energetischen Eigenschaften des Gebäudes.

Die energetischen Eigenschaften werden durch die **BAK** und den Sanierungsstand bestimmt [6]. Nach dem vereinfachten Bedarfskonzept aus **Kapitel 6.3** können diese durch die Zielsanierungsstufen abgebildet werden. Das Nutzungsverhalten wird durch Standardlastgänge im **SESMG** abgebildet wird. Die Bewohnerzahl eines Gebäudes wird durch die baustrukturellen Eigenschaften beeinflusst. Beispielsweise wohnen in einem Einfamilienhaus in der Regel weniger Personen als in einem Mehrfamilienhaus. Dennoch lässt sich nicht eindeutig von den baustrukturellen Eigenschaften auf die Bewohnerzahl schließen. Ein Einfamilienhaus kann von einer Familie mit vier Personen oder lediglich zwei Personen bewohnt werden und somit die Verbrauchsdaten erheblich beeinflussen [6].

Daraus lässt sich schließen, dass aus den Verbrauchsdaten der Strom-, Wärme- und Kältebedarfe nur der Parameter Bewohnerzahl für die Einteilung von **EST** relevant ist.

Gebäudedaten Die Gebäudedaten umfassen die Flächen und U-Werte der Außenwände, Dächer und Fenster. Die Fläche der Außenwände wird durch die Wohnfläche und die Anzahl der Geschosse definiert, während die Dachfläche sich aus der Wohnfläche und der Dachform ableitet. Die Fensterfläche kann als prozentualer Anteil der Fassadenfläche angenommen werden [6]. Alle Flächen sind baustrukturelle Parameter, die die Einteilung der **EST** beeinflussen. Die Fläche der Außenwände und des Dachs definieren die Gebäudegröße. Diese ist für die Einteilung in **EST** entscheidend, da sie beispielsweise zwischen Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern unterscheidet. Somit lässt sich der Eingangsparameter der Fläche von Wand, Dach und Fenster über den für die Einteilung von **EST** relevanten Parameter der Gebäudegröße abbilden.

Die U-Werte für Außenwände, Dächer und Fenster sind von den energetischen Eigenschaften des Gebäudes abhängig. Diese lassen sich aus der **BAK** und den Sanierungsstand ermitteln. Nach dem vereinfachten Bedarfskonzept aus **Kapitel 6.3** werden diese durch die Zielsanierungsstufen beschrieben und lassen sich durch den Parameter Sanierungsstufe abbilden.

Nutzungsdaten Die Nutzungsdaten umfassen die Gebäudeinnentemperatur, die niedrigste Wohnraumtemperatur und die niedrigste Vorlauftemperatur des Heizsystems.

Die niedrigste Wohnraumtemperatur beschreibt die Temperatur, ab der geheizt wird. Für die Entwicklung der **EST** wird er vereinfacht als relativer Wert zur Gebäudeinnentemperatur angegeben. Nach der Untersuchung von Rovers et al. [65] hat die Gebäudeinnentemperatur einen erheblichen Einfluss auf den Wärmebedarf eines Gebäudes. Diese Temperatur ist jedoch stark vom individuellen Nutzungsverhalten abhängig. Durch unterschiedlich hohe Heizkosten kann sich das Nutzungsverhalten je nach Sanierungsstand des Gebäudes ändern [65]. Die niedrigste Vorlauftemperatur hängt von der Sanierungsstufe des Gebäudes ab [66]. Energetisch sanierte Gebäude, beispielsweise mit einer Fußbodenheizung, können niedrigere Vorlauftemperaturen nutzen [67].

Die Parameter der niedrigsten Wohnraumtemperatur, der Gebäudeinnentemperatur und der niedrigsten Vorlauftemperatur lassen sich auf die Sanierungsstufe der Gebäude und auf das individuelle Nutzungsverhalten zurückführen. Im Modellierungsansatz aus **FB** wird das Nutzungsverhalten nicht individuell, sondern einheitlich betrachtet. Die verschiedenen Sanierungsstufen von Gebäuden werden nach dem vereinfachten Bedarfskonzept aus **Kapitel 6.3** durch wenige Zielsanierungsstufen abgebildet. Aus diesem Grund lassen sich die Parameter der niedrigsten Wohnraumtemperatur, der Gebäudeinnentemperatur und der niedrigsten Vorlauftemperatur durch den Parameter Sanierungsstufe aus dem vereinfachten Bedarfskonzept zusammenfassen.

6.4.5. Potentialabhängige Parameter

Zur Ermittlung der energetischen Potenziale eines Quartiers lassen sich die Eingangsparameter des **SESMG** in Daten für Solarthermie und **PV**, Daten für Geothermie sowie Wetter- und Umweltdaten kategorisieren. **Abbildung 6.5** zeigt eine Übersicht der potenzialabhängigen Eingangsparameter des **SESMG** und deren Verwendung.

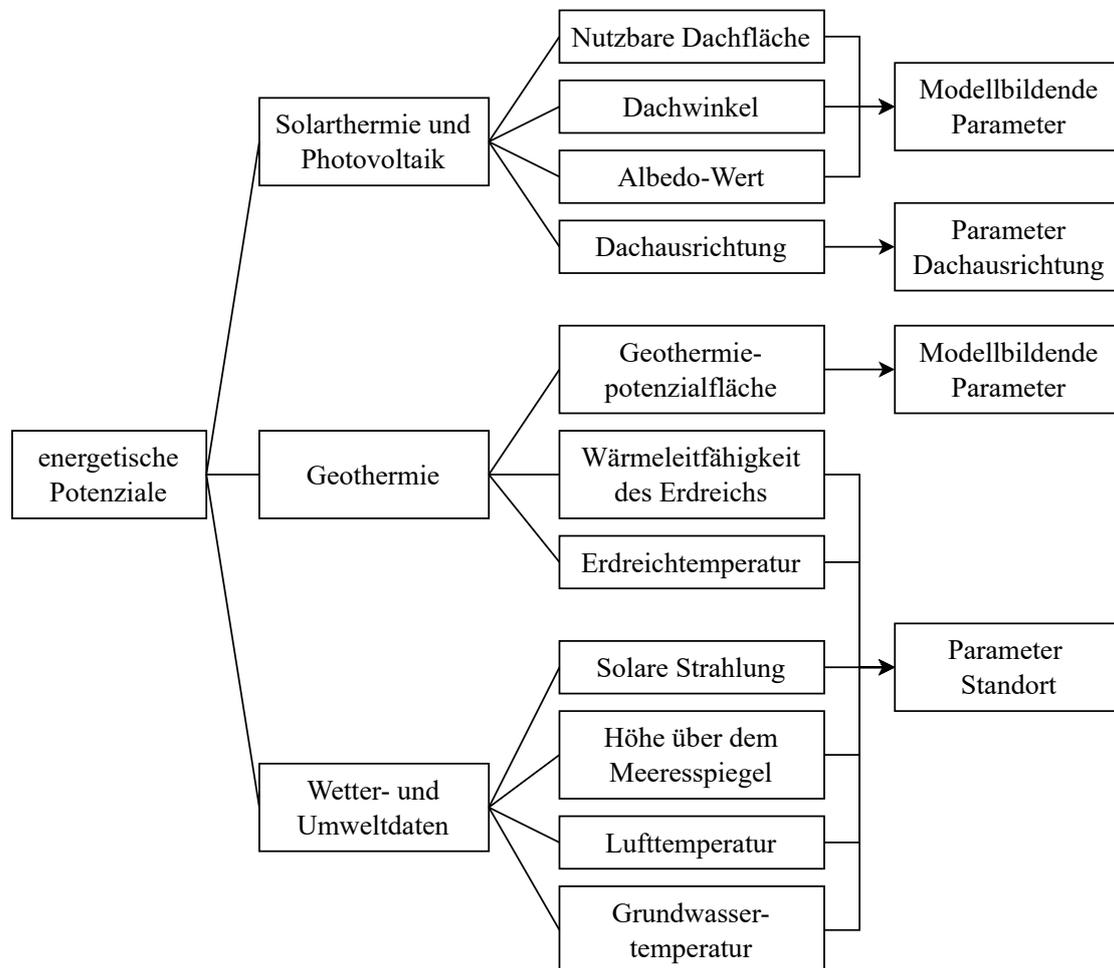


Abbildung 6.5.: Potenzialabhängige Parameter des **SESMG** und deren Einordnung für die Entwicklung von **EST**. Eigene Darstellung.

Solarthermie und Photovoltaik Um die Potenziale für Solarthermie und **PV** zu ermitteln, müssen im **SESMG** die nutzbare Dachfläche, der Dachwinkel, der Albedo-Wert und die Ausrichtung des Dachs für jedes Gebäude im Quartier angegeben werden.

Die nutzbare Dachfläche umfasst die gesamte Dachfläche, die für den Einsatz von **PV** und Solarthermie zur Verfügung steht. Elemente wie Dachflächenfenster und Schornsteine reduzieren die nutzbare Dachfläche. Der Dachwinkel beschreibt die Neigung der Dachfläche in Grad zur Horizontalen. Der Albedo-Wert gibt an, wie stark die umliegenden Bodenflächen Sonnenlicht reflektieren [28]. Diese Parameter ergeben sich aus den baustrukturellen Eigenschaften eines Gebäudes und sind damit modellbildende Parameter. Die nutzbare Dachfläche, der Dachwinkel und der Albedo-Wert beeinflussen die Einteilung der **EST**

nicht. Diese Parameter beschreiben die Gebäudetypen und beeinflussen daher die Ausgestaltung der zuvor eingeteilten **EST**.

Die Dachausrichtung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Potenzial von **PV**-Anlagen [68]. Dabei kann sie keinen baustrukturellen Eigenschaften zugeordnet werden und ist abhängig von den individuellen Gebäuden im Quartier. Da die Dachausrichtung für die Potenziale von **PV** und Solarthermie entscheidend ist, wird sie als relevanter Parameter für die Entwicklung von **EST** betrachtet.

Geothermie Das geothermische Potenzial eines Quartiers hängt von den oberflächennahen Eigenschaften des Untergrunds ab. Die für den Einsatz der Geothermie relevanten Eingangsparameter des **SESMG** sind die Geothermiepotenzialfläche, die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und die Erdreichtemperatur.

Die Geothermiepotenzialfläche bezeichnet die im Quartier für Erdsonden nutzbare Fläche. Anhand dieser und des Flächenbedarfs der Erdsonden wird die maximal mögliche Anzahl an Erdsonden berechnet [60]. Diese Fläche wird durch die Ausgestaltung der **EST** definiert und gehört damit zu den modellbildenden Parametern.

Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ist abhängig von der mineralischen Zusammensetzung, Schichtung sowie den physikalischen Eigenschaften des Gesteins [69]. Damit ist sie abhängig vom Standort und kann lokal variieren [70, 71]. Die Erdreichtemperatur kann durch die Lufttemperatur und die Tiefe der Erdsonden anhand eines Temperaturgradienten bestimmt werden. Für Nordrhein-Westfalen beträgt der Temperaturgradient $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro 100 m Tiefe [69]. Dadurch ist die Erdreichtemperatur von der Lufttemperatur abhängig und weist eine Korrelation zu dieser auf.

Wetter- und Umweltdaten Zur Ermittlung der Potenziale von Technologien benötigt der **SESMG** Wetter- und Umweltdaten. Dazu gehören die solare Strahlung, die Höhe über dem Meeresspiegel, die Lufttemperatur und die Grundwassertemperatur.

Die standortabhängigen Unterschiede der solaren Strahlung sind in Deutschland vergleichsweise gering [72, 73]. Auch für die Verbreitung von **PV**-Anlagen ist die solare Strahlung nicht entscheidend, da lokale Faktoren wie die Dachausrichtung einen stärkeren Einfluss haben [68]. Die Lufttemperatur und die Höhe über dem Meeresspiegel variieren in Nordrhein-Westfalen standortabhängig, insbesondere in Mittelgebirgsregionen und Höhenzügen. Diese Gebiete betreffen jedoch nur einen kleinen Anteil der Bevölkerung [69]. Für den Großteil der Bevölkerung sind die Unterschiede in den klimatischen Bedingungen innerhalb Nordrhein-Westfalens als gering einzustufen. Auch die Lufttemperatur variiert abhängig vom Standort. Die Untersuchung von Schartner [74] zeigt, dass die Grundwassertemperatur stark mit der Lufttemperatur korreliert.

Parameter Standort Die Parameter zu Wetter- und Umweltdaten sowie die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und die Erdreichtemperatur weisen alle eine Abhängigkeit zum Standort auf. Zudem besitzen einige dieser Parameter eine Korrelation zueinander. Daher lassen sich diese Eingangsparameter zu einem Parameter zusammenzufassen. Der Parameter Standort bildet die lokalen Gegebenheiten eines Quartiers ab und vereinfacht die Entwicklung von **EST**.

7. Diskussion und Fazit

7.1. Implementierung energetischer Stadtraumtypen in den SESMG

Zur Entwicklung energetischer Stadtraumtypen (EST) sind auf den Spreadsheet Energy System Model Generator (SESMG) abgestimmte Parameter zur Einteilung von EST notwendig.

Relevante Parameter zur Einteilung Aus den Eingangsparametern des SESMG (siehe [Tabelle 6.1](#)) konnten fünf Parameter identifiziert werden, die für die Einteilung der EST relevant sind. Diese relevanten Parameter zur Einteilung sind:

- Bewohnerzahl
- Gebäudegröße
- Sanierungsstufe
- Dachausrichtung
- Standort

Der Parameter Bewohnerzahl wird durch baustrukturelle Eigenschaften beeinflusst und eignet sich, um vordefinierte und typische Bewohnerzahlen der EST anzupassen. Die Dachausrichtung weist einen erheblichen Einfluss auf das Potenzial von Photovoltaik (PV) und Solarthermie aus, kann jedoch nicht direkt aus baustrukturellen Eigenschaften abgeleitet werden. Der Parameter Standort fasst die Eingangsparameter aus Umwelt- und Wetterdaten eines Quartiers zusammen. Die Untersuchung zeigt eine Korrelation dieser Parameter im Betrachtungsraum Nordrhein-Westfalen, wodurch diese zusammengefasst werden und die Anzahl der zu optimierenden EST reduziert wird. Die Gebäudegröße, definiert durch die Flächen von Wänden, Fenstern und Dächern, beeinflusst die baustrukturellen Eigenschaften eines Quartiers.

EST-Typen aus UrbanReNet Das Forschungsprojekt UrbanReNet - Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum (UrbanReNet) liefert mit den EST-Typen 1-8 (vergleiche [Anhang A](#)) eine für FutureBEEing (FB) geeignete Methode zur Kategorisierung typischer Siedlungsräume. Die EST-Typen 1-8 lassen sich dazu auf den Modellierungsansatz aus [Abbildung 2.1](#) übertragen. Dafür wird jeder EST-Typ aus UrbanReNet durch die Parameter Bewohnerzahl, Gebäudegröße, Sanierungsstand, Dachausrichtung und Standort spezifiziert.

Anzahl der zu optimierenden EST Die Anzahl der zu optimierenden EST wird durch die Parametern Bewohnerzahl, Gebäudegröße, Sanierungsstand, Dachausrichtung und Standort sowie deren jeweiligen Ausprägungsstufen bestimmt. [Abbildung 7.1](#) zeigt schematisch eine Matrix, um die Anzahl der zu optimierenden EST zu bestimmen.

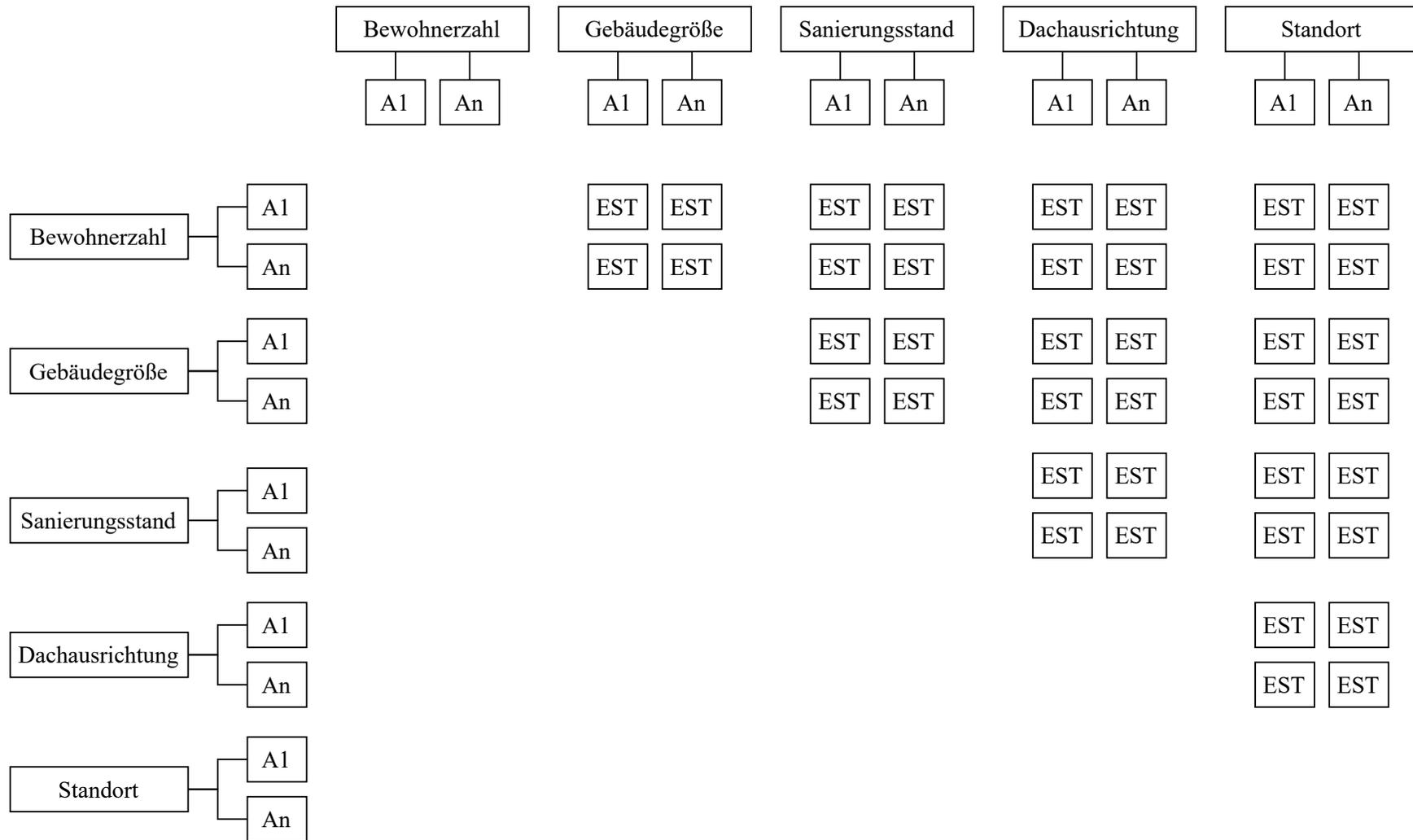


Abbildung 7.1.: Ergebnismatrix der Parameter zur Einteilung von EST für den Modellierungsansatz aus FB. Abk.: A: Ausprägung, EST: energetische Stadtraumtypen. Eigene Darstellung.

Dabei ist die Matrix für einen der insgesamt zehn **EST**-Typen und -Subtypen aus **UrbanReNet** dargestellt. Sie ist jedoch auf jeden der insgesamt zehn **EST**-Typen aus **UrbanReNet** übertragbar. Zu jedem der fünf Parameter, die zur Einteilung von **EST** herangezogen werden, bedarf es einer Beschreibung durch Ausprägungsstufen. Die Matrix aus **Abbildung 7.1** stellt jede Kombinationsmöglichkeit der Parameter und deren Ausprägungsstufen zueinander dar, die jeweils einen **EST** repräsentieren. Um die Gesamtanzahl der zu optimierenden **EST** bestimmen zu können, muss die Anzahl aus einer Matrix mit den zehn **EST**-Typen aus **UrbanReNet** multipliziert werden.

Modellbildende Parameter zur Ausgestaltung der EST Die modellbildenden Parameter sind für die Einteilung von **EST** nicht relevant, sondern definieren die Komponenten des Energiesystemmodells. In der Untersuchung konnten einige der modellbildenden Parameter identifiziert werden:

- Nutzbare Dachfläche
- Dachwinkel
- Albedo-Wert
- Geothermiepotenzialfläche

Alle Eingangsparameter des **SESMG** aus **Tabelle 6.1**, die nicht für eine Einteilung von **EST** relevant sind, können für die Ausgestaltung der **EST** von Bedeutung sein. Dazu ist zu prüfen, ob sich die Werte der Parameter für die unterschiedlichen **EST** unterscheiden oder konstant sind. Ein Parameter, dessen Wert sich für die unterschiedlichen **EST** unterscheidet, lässt sich als ein modellbildender Parameter einordnen.

7.2. Anwendung der Ergebnisse

Für die Anwendung des Modellierungsansatzes aus **Abbildung 2.1** auf Basis der Ergebnisse aus **Kapitel 6** sind die folgenden Schritte zur Umsetzung erforderlich:

- Untersuchung der Ausprägungsstufe der relevanten Parameter
- Erstellung einer **EST**-Datenbank
- Ausgestaltung der **EST**
- Optimierung der **EST** mithilfe der Energiesystemmodellierung (**ESM**)

Untersuchung der Ausprägungsstufen der relevanten Parameter Um die Gesamtanzahl der zu optimierenden **EST** bestimmen zu können, bedarf es einer Untersuchung der Ausprägungsstufen für die Parameter Bewohnerzahl, Gebäudegröße, Sanierungsstand, Dachausrichtung und Standort. Durch diese Parameter und deren Ausprägungsstufen können nach der schematischen Matrix aus **Abbildung 7.1** die zu optimierenden **EST** definiert werden.

Erstellung einer EST-Datenbank Nachdem die Ausprägungsstufen bekannt und die Gesamtanzahl der **EST** definiert ist, kann aus diesen eine **EST**-Datenbank erstellt werden. Die **EST**-Datenbank fasst alle **EST** und deren optimierte Energiesysteme zusammen.

Ausgestaltung der EST Die Ausgestaltung der EST erfolgt mithilfe von modellbildenden Parameter. Für jeden EST wird dazu ein Energiesystemmodell aufgestellt. Diese bildet das Quartier aus dem EST ab und beschreibt dessen energetische Eigenschaften.

Optimierung der EST mithilfe der ESM Um die Ergebnisse der EST in die EST-Datenbank zu integrieren, ist eine Optimierung der Energiesystemmodelle von jedem EST erforderlich. Die nach der ESM optimierten Energiesystemmodelle sind die Ergebnisse der EST-Datenbank. Diese werden in dem Modellierungsansatz in FB für die Untersuchung von Quartieren eingesetzt.

7.3. Kritische Bewertung der Ergebnisse

Der Modellierungsansatz aus FB sowie die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf den in Kapitel 2.1 genannten Annahmen. Bei dem Modellierungsansatz aus Abbildung 2.1 handelt es sich um ein Konzept, das durch die Ergebnisse dieser Arbeit weiterentwickelt wird. In der gesamten Entwicklung dieses Ansatzes ist nicht auszuschließen, dass getroffene Annahmen oder Vereinfachungen zu Fehlern führen. Zudem kann bisher nicht überprüft werden, ob eine Umsetzung des Modellierungsansatzes in die Praxis möglich ist. Aus diesem Grund gilt es die in Kapitel 2.1 getroffenen Annahmen zu validieren.

Das Konzept zur vereinfachten Bedarfsermittlung aus Kapitel 6.3 basiert auf der Annahme, dass der aktuelle Sanierungsstand von Gebäuden in wenigen Zielsanierungsstufen zusammengefasst werden kann. In dieser Untersuchung konnte jedoch nicht geprüft werden, ob Gebäude mit unterschiedlichen Baujahren und Sanierungsständen eine vergleichbare Zielsanierungsstufe erreichen können.

Die in Kapitel 6.4.2 getroffene Auswahl an relevanten Eingangsparameter des SESMG sowie die Zusammenfassung und Bewertung der Parameter aus Kapitel 6.4.4 und Kapitel 6.4.5 führen dazu, dass ggf. relevante Parameter ausgeschlossen werden. Dabei hat eine Zusammenfassung von mehreren Eingangsparametern zwangsläufig eine geringere Ergebnisgenauigkeit zur Folge. Durch die Abbildung von Quartieren anhand weniger Parameter besteht die Möglichkeit, dass individuelle Gegebenheiten nicht vollständig berücksichtigt werden.

Die Untersuchung der Eingangsparameter beschränkt sich auf den Betrachtungsraum Nordrhein-Westfalen. Es ist nicht auszuschließen, dass die städtebaulichen und strukturellen Merkmale von Quartieren in anderen Bundesländern oder den Niederlanden abweichen. Eine Übertragung der Ergebnisse dieser Arbeit erfordert möglicherweise Anpassungen an der Einteilung und den Parametern der EST.

Bestehende Ansätze zur energetischen Leitplanung zeigen einen für die Anwendung in FB zu detaillierte Betrachtung von Quartieren. Im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Arbeit können die Ergebnisse aus den Projekten der energetischen Leitplanung nicht auf den Modellierungsansatz aus FB angewendet oder zu einer signifikanten Reduktion der Rechenressourcen genutzt werden.

8. Ausblick

Durch diese Arbeit konnten auf den **SESMG** abgestimmte Parameter zur Einteilung von **EST** definiert werden. Um die Ergebnisse im Modellierungsansatz von **FB** anwenden zu können, bedarf es einer Validierung dieser. In einer weiterführenden Untersuchung kann die in dieser Arbeit getroffene Auswahl durch Sensitivitätsanalysen überprüft werden.

In der gesamten Entwicklung des Modellierungsansatzes zur Implementierung von **EST** in den **SESMG** ist es erforderlich die getroffenen Annahmen zu validieren. Dazu können die Annahmen durch die Anwendung der Ergebnisse in Fallstudien überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen jedoch nicht die Anwendung des Modellierungsansatzes in der Praxis. Hierzu sind weitere Fragestellungen zu beantworten. Zunächst ist eine Untersuchung der Ausprägungsstufen der Parameter Bewohnerzahl, Gebäudegröße, Sanierungsstand, Dachausrichtung und Standort erforderlich. Durch die Ermittlung dieser kann die Anzahl der zu optimierenden **EST** bestimmt werden, die es nach der Methode der **ESM** zu optimieren gilt. Zudem wird eine Methode benötigt, um die Kosten für Sanierungsmaßnahmen von der aktuellen Sanierungsstufe bis zur Zielsanierungsstufe zu ermitteln. Es wurde nicht geprüft, welche Parameter geeignet sind, um ein Untersuchungsquartier mit den in dieser Untersuchung entwickelten **EST** zu vergleichen. Diese Parameter können sich von den Parametern zur Einteilung der **EST** unterscheiden. Die relevanten Parameter für den Vergleich sind von der gewählten Methode zur Betrachtung der Untersuchungsquartiere abhängig. Sowohl die Parameter als auch die Betrachtungsmethode bedürfen einer weiterführenden Untersuchung. Darüber hinaus ist die Entwicklung einer Methode erforderlich, die eine Kombination der optimierten Energiesysteme der **EST** ermöglicht. Dabei ist zu prüfen, ob die Ergebnisse des kombinierten **EST** mit hinreichender Genauigkeit auf das Untersuchungsquartier übertragbar sind. Die Optimierung der **EST** mit dem **SESMG** ermöglicht die Erstellung verschiedener semi-optimaler Szenarien entlang der Paretokurve. Es ist zu überprüfen, welcher Paretopunkt als repräsentatives Ergebnis für die **EST** ausgewählt werden sollte.

Die in dieser Arbeit entwickelten Parameter zur Einteilung von **EST** beschränken sich auf Quartieren in Nordrhein-Westfalen. Ob diese Parameter und die Siedlungstypen aus **UrbanReNet** auch auf niederländische Quartiere übertragbar sind, erfordert weitere Untersuchungen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Peter Venemann und Herrn Jan Niklas Tockloth, die mir die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben haben und mich während des gesamten Prozesses unterstützt haben. Ebenso danke ich Jan Niklas Tockloth und Benjamin Blankenstein für die wertvollen inhaltlichen Diskussionen zur Ausarbeitung dieser Arbeit. Lea Sommerfeld danke ich für das anschließende Korrekturlesen der Arbeit. Abschließend möchte ich den Entwicklenden der KI-Tools ChatGPT 4¹⁶ und Perplexity¹⁷ danken, deren Funktionen ich zur Texteditierung genutzt habe.

Die Veröffentlichung wurde durch das Interreg VI-Programm Deutschland-Niederland im Rahmen des Projekts "FutureBEEing" gefördert.

¹⁶Nähere Informationen zu ChatGPT finden sich hier: [75].

¹⁷Nähere Informationen zu Perplexity finden sich hier: [76].

Literaturverzeichnis

- [1] R. Galvin. “Policy Pressure to Retrofit Germany’s Residential Buildings to Higher Energy Efficiency Standards: A Cost-Effective Way to Reduce CO2 Emissions?” In: *Building and Environment* (2023). DOI: [10.1016/j.buildenv.2023.110316](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110316).
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). *Klimaschutzprogramm 2023 der Bundesregierung*. 2023. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/20231004-klimaschutzprogramm-der-bundesregierung.html> (besucht am 06.01.2025).
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Hrsg. *8. Energieforschungsprogramm Zur Angewandten Energieforschung Forschungsmissionen Für Die Energiewende*. 2023. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/8-energieforschungsprogramm-zur-angewandten-energieforschung.html>.
- [4] FutureBEEing Projektkonsortium. *Antragsformular FutureBeeing*. Internes Dokument. 2023.
- [5] C. Klemm und P. Vennemann. “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 (2021). ISSN: 13640321. DOI: [10.1016/j.rser.2020.110206](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110206).
- [6] M. Hegger, J. Dettmar, A. Martin, B. Boczek, M. Greiner, T. Kern, A. Al Najjar, J. Schulze, V. Stute, S. Wurzbacher und A. Zelmer. *UrbanReNet I. EnEff:Stadt – Verbundprojekt Netzooptimierung – Teilprojekt: Vernetzte Regenerative Energiekonzepte Im Siedlungs- Und Landschaftsraum*. Technische Universität Darmstadt, 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/311100248_UrbanReNet_I_-_Vernetzte_regenerative_Energiekonzepte_im_Siedlungs-_und_Landschaftsraum.
- [7] J. Dettmar, C. Drebes und S. Sieber, Hrsg. *Energetische Stadtraumtypen.: Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2020. DOI: [10.51202/9783738803433](https://doi.org/10.51202/9783738803433).
- [8] F. Ebrecht. *Implementierung eines ganzheitlichen Nachhaltigkeitskonzeptes - „Von der Unternehmensstrategie zur Operationalisierung auf Quartiersebene“*. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021. 237 S. ISBN: 978-3-7369-7415-9.
- [9] M. Alich. “Soziale Stadtentwicklung - Politik mit neuer Qualität?” In: *Soziale Stadt — Zwischenbilanzen*. Hrsg. von U.-J. Walther. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2002, S. 57–70. DOI: [10.1007/978-3-663-11414-7](https://doi.org/10.1007/978-3-663-11414-7).
- [10] J. D. Schölzel, M. Zuschlag und T. Beckhölter. *Definition des Begriffs Quartier: Positionspapier*. RWTH Aachen University, 2023. DOI: [10.18154/RWTH-2023-02417](https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-02417).

- [11] R. Riechel. “Zwischen Gebäude und Gesamtstadt: Das Quartier als Handlungsraum in der lokalen Wärmewende”. In: *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung* 85.4 (2016), S. 89–101. ISSN: 1861-1559, 0340-1707. DOI: [10.3790/vjh.85.4.89](https://doi.org/10.3790/vjh.85.4.89).
- [12] EnArgus. *Stadtquartiere*. 2022. URL: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d12033-2/*/*Stadtquartier?op=Wiki.getwiki&search=Dioxine#:~:text=Ein%20Stadtquartier%20ist%20ein%20geografisch,die%20Einteilung%20aber%20unabh%C3%A4ngig%20davon. (besucht am 16.11.2022).
- [13] O. Schnur. *Quartiersforschung: Zwischen Theorie und Praxis*. 2. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2014. DOI: [10.1007/978-3-531-19963-4](https://doi.org/10.1007/978-3-531-19963-4).
- [14] A. Eckenweber, K. Habermann-Nieße, K. Klehn, M. Köhler, G. Langenbrinck, A. Raatz, Rosenau, S. Schäfer und M. Wangelin. *Begleitforschung KfW-Programm 432 – Energetische Stadtsanierung 2018–2022*. Bonn, 2023.
- [15] H. Erhorn-Kluttig, R. Jank, L. Schrempf, A. Dütz, F. Rumpel, J. Schrade, H. Erhorn, C. Beier, C. Sager und D. Schmidt. *Energetische Quartiersplanung - Methoden - Technologien - Praxisbeispiele*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011. ISBN: 978-3-8167-8411-1.
- [16] F. Koch und K. Krellenberg. *Nachhaltige Stadtentwicklung: Die Umsetzung der Sustainable Development Goals auf kommunaler Ebene*. essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. DOI: [10.1007/978-3-658-33927-2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-33927-2).
- [17] H. Freudenau, S. Siebert, M. Bußkamp, S. Bosch-Lewandowski, R. Ganser, H. Krug und M. Runge. *Neue Stadtquartiere - Konzepte und gebaute Realität*. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2021.
- [18] E. Dunkelberg, J. Weiß, T. Beckhölter und S. Welter. “Die Rolle von Kommunen in der Entwicklung und Umsetzung von Quartiersprojekten - Working Paper”. In: *Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen – Modul 3 Quartiere* (2023). DOI: [10.18154/RWTH-2023-08182](https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-08182).
- [19] H. K. Jacobsen. “Integrating the Bottom-up and Top-down Approach to Energy Economy Modelling: The Case of Denmark”. In: *Energy Economics* 20 (1998), S. 443–461. DOI: [10.1016/S0140-9883\(98\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(98)00002-4).
- [20] A. Herbst, F. Toro, F. Reitze und E. Jochem. “Introduction to Energy Systems Modelling”. In: *Swiss Journal of Economics and Statistics* 148.2 (2012), S. 111–135. ISSN: 2235-6282. DOI: [10.1007/BF03399363](https://doi.org/10.1007/BF03399363).
- [21] D. P. Van Vuuren, M. Hoogwijk, T. Barker, K. Riahi, S. Boeters, J. Chateau, S. Scricciu, J. Van Vliet, T. Masui, K. Blok, E. Blomen und T. Kram. “Comparison of Top-down and Bottom-up Estimates of Sectoral and Regional Greenhouse Gas Emission Reduction Potentials”. In: *Energy Policy* 37.12 (2009), S. 5125–5139. ISSN: 03014215. DOI: [10.1016/j.enpol.2009.07.024](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.024).
- [22] J. N. Tockloth. “Energiesystemmodellierung - Grundlagen der Energiesystemmodellierung II”. Vorlesung (FH Münster). 2024.
- [23] M. Kendzioriski. “Renewable Energy System Modeling - Challenges, Methodologies, and Applications”. Berlin, 2024. DOI: [10.14279/depositonce-19656](https://doi.org/10.14279/depositonce-19656).

- [24] D. Keles, P. Jochem, R. McKenna, M. Ruppert und W. Fichtner. “Meeting the Modeling Needs of Future Energy Systems”. In: *Energy Technology* 5.7 (2017), S. 1007–1025. ISSN: 2194-4288, 2194-4296. DOI: [10.1002/ente.201600607](https://doi.org/10.1002/ente.201600607).
- [25] C. Klemm, F. Wiese und P. Vennemann. “Model-Based Run-Time and Memory Reduction for a Mixed-Use Multi-Energy System Model with High Spatial Resolution”. In: *Applied Energy* 334 (2023). ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.120574](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120574).
- [26] M. Ferrando, F. Causone, T. Hong und Y. Chen. “Urban Building Energy Modeling (UBEM) Tools: A State-of-the-Art Review of Bottom-up Physics-Based Approaches”. In: *Sustainable Cities and Society* 62 (2020), S. 102408. ISSN: 22106707. DOI: [10.1016/j.scs.2020.102408](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408).
- [27] J. Budde, C. Klemm, J. N. Tockloth, G. Becker und P. Vennemann. *Automatisierte Modellierung und Optimierung urbaner Energiesysteme*. 2023. ISBN: 978-3-940820-21-1.
- [28] SESMG Developer Group. *The Spreadsheet Energy System Model Generator — SESMG 0.1.1 Documentation*. 2024. URL: <https://spreadsheet-energy-system-model-generator.readthedocs.io/en/latest/> (besucht am 27. 09. 2024).
- [29] *A Modular Open Source Framework to Model Energy Supply Systems*. 2024. URL: <https://oemof.org/> (besucht am 29. 12. 2024).
- [30] C. Klemm und F. Wiese. “Indicators for the Optimization of Sustainable Urban Energy Systems Based on Energy System Modeling”. In: *Energy, Sustainability and Society* 12.3 (2022). DOI: [10.1186/s13705-021-00323-3](https://doi.org/10.1186/s13705-021-00323-3).
- [31] C. Klemm, G. Becker, J. N. Tockloth und P. Vennemann. “The Spreadsheet Energy System Model Generator (SESMG): A Tool for the Optimization of Urban Energy Systems”. In: *The Journal of Open Source Software* (2023). DOI: [10.21105/joss.05519](https://doi.org/10.21105/joss.05519).
- [32] Gemeinsames Interreg-Sekretariat. *FutureBEEing - Interreg*. 2024. URL: <https://deutschland-nederland.eu/projects/futurebeeing/> (besucht am 26. 09. 2024).
- [33] F. Kraas, C. Leggewie, Lemke, E. Matthies, D. Messner, N. Nakicenovic, H. J. Schellenhuber, S. Schlacke und U. Schneidewind. *Der Umzug der Menschheit: die transformative Kraft der Städte: Zusammenfassung*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2016. 43 S. ISBN: 978-3-936191-71-4.
- [34] M. Gornig und C. Kemfert. “Grüne Transformation in Deutschland – nur mit echter Energiewende ein ökologischer und ökonomischer Erfolg”. In: *Wirtschaftsdienst* 104.5 (2024), S. 296–300. DOI: [10.2478/wd-2024-0082](https://doi.org/10.2478/wd-2024-0082).
- [35] H. Erhorn-Kluttig, H. Erhorn, J. Weber, S. Wössner und E. Budde. “EnEff:Stadt - Energiekonzept-Berater Für Stadtquartiere”. In: *Bauphysik* Jg. 35 (Heft 3 2013), S. 172–180. DOI: [10.1002/bapi.201310062](https://doi.org/10.1002/bapi.201310062).
- [36] H. Erhorn-Kluttig, H. Erhorn, J. Weber, S. Wössner und E. Budde. *Der Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere.: Ein Potenzialbewertungstool aus der Forschungsinitiative EnEff:Stadt*. Fraunhofer IRB Verlag, 2014. DOI: [10.51202/9783816791409](https://doi.org/10.51202/9783816791409).

- [37] U. Roth und F. Häubi. “Wechselwirkung zwischen Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen”. In: *Schweizer Ingenieur und Architekt* 98.29 (1980). DOI: [10.5169/SEALS-74156](https://doi.org/10.5169/SEALS-74156).
- [38] Technische Universität Darmstadt. *UrbanReNet*. Fachgebiet Entwerfen und Freiraumplanung – TU Darmstadt. 2024. URL: https://www.freiraum.architektur.tu-darmstadt.de/forschung_freiraum/UrbanReNet.de.jsp (besucht am 30.10.2024).
- [39] M. Hegger, J. Dettmar, T. Meinberg, C. Drebes, J. Schulze, S. Sieber und O. Sylla. *UrbanReNet II: EnEff:Stadt: Weiterführung Und Inhaltliche Vertiefung Des Forschungsprojektes UrbanReNet- Vernetzte Regenerative Energie Konzepte Im Siedlungs- Und Landschaftsraum*. Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [40] H. Erhorn-Kluttig, E. Budde, L. Lyslow, S. Wössner, H. Erhorn und K. Koutso-markos. *EU-Projekt MODER - Mobilisierung von innovativen Design Tools für die Sanierung von Gebäuden auf Quartiersebene*. Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3154. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019. 44 S. ISBN: 978-3-7388-0356-3.
- [41] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. *DistrictECA - Willkommen*. District Energy Concept Adviser - Energiekonzept_Berater für Stadtquartiere. URL: <https://www.district-eca.de/index.php?lang=de> (besucht am 18.10.2024).
- [42] T. Loga, N. Diefenbach und B. Stein. *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA Project - Final Project Report*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2012. URL: <https://episcopes.eu/communication/download/>.
- [43] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born. *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. 2., erw. Aufl. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2015. 281 S. ISBN: 978-3-941140-47-9.
- [44] Institut Wohnen und Umwelt GmbH. *TABULA WebTool*. 2017. URL: <https://webtool.building-typology.eu/#bm> (besucht am 05.11.2024).
- [45] Institut Wohnen und Umwelt GmbH. *TABULA-Calculator*. URL: <https://episcopes.eu/fileadmin/tabula/public/calc/tabula-calculator.xlsx>.
- [46] T. Loga, B. Stein und N. Diefenbach. “TABULA Building Typologies in 20 European Countries - Making Energy-Related Features of Residential Building Stocks Comparable”. In: *Energy and Buildings* 132 (2016), S. 4–12. ISSN: 03787788. DOI: [10.1016/j.enbuild.2016.06.094](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094).
- [47] Institut Wohnen und Umwelt GmbH. *TABULA – Entwicklung von Gebäudetypologien Zur Energetischen Bewertung Des Wohngebäudebestands in 13 Europäischen Ländern*. 2022. URL: <https://www.iwu.de/forschung/gebaeudebestand/tabula/> (besucht am 17.10.2024).
- [48] I. W. und Umwelt GmbH. *EPISCOPE – Typologische Klassifizierung Und Energieeffizienz-Monitoring von Wohngebäudebeständen in Europäischen Ländern*. 2022. URL: <https://www.iwu.de/forschung/gebaeudebestand/episcopes/> (besucht am 05.11.2024).

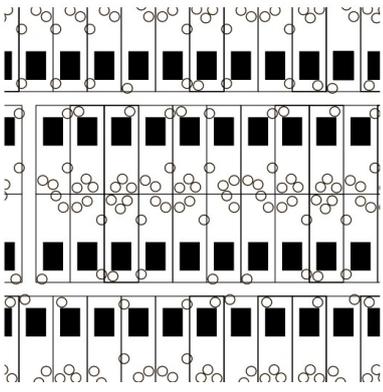
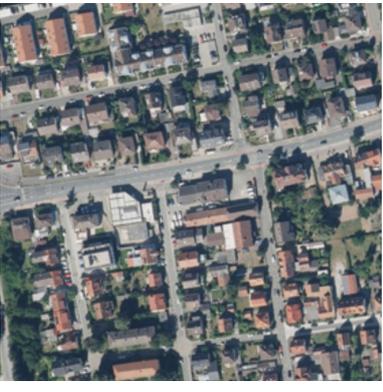
- [49] R. Nouvel, K. Brassel, M. Bruse, E. Duminil, V. Coors, U. Eicker und D. Robinson. “SimStadt, a New Workflow-Driven Urban Energy Simulation Platform for CityGML City Models”. In: *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*. Lausanne: LESO-PB, EPFL, 2015, S. 889–894. DOI: [10.5075/epfl-cisbat2015-889-894](https://doi.org/10.5075/epfl-cisbat2015-889-894).
- [50] K. Bao und B. Schröter. *SimStadt - Eine Plattform Zur Detailgetreuen Und Multidimensionalen Analyse von Stadtquartieren*. 2021. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346234971>.
- [51] V. Coors, P. Rodrigues, M. Betz, S. Schneider, V. Weiler, E. Duminil, B. Schröter, A. Klöber, D. Holweg, T. Brüggemann, K. Bohn, M. Rein, L. Goll, B. Balbach, F. Spath und B. Gärtner. *EnEff:Stadt – SimStadt 2.0 - Schlussbericht*. Stuttgart / Dresden / Leimen / Mainz, 2021. URL: https://simstadt.hft-stuttgart.de/attachments/SimStadt2_Schlussbericht.pdf.
- [52] E. Duminil, K. Brassel, R. Nouvel, A. Benoit, M. Bruse, M. Betz, N. Alam, H. Dastageeri, P. Wate, P. Debue, S. Köhler, V. Weiler, P. Monsalvete, M. Zirak, K. Bao, S. Schneider und V. Coors. *SimStadt Documentation*. URL: <https://simstadt.hft-stuttgart.de/> (besucht am 05. 11. 2024).
- [53] Open Geospatial Consortium. *CityGML - Offenes Geospatial-Konsortium*. 2024. URL: <https://www.ogc.org/de/publications/standard/citygml/> (besucht am 06. 11. 2024).
- [54] R. Pieperit. “Automatisierte Geometriaufbereitung digitaler 3D-Stadtmodelle für die Strömungssimulation”. Berlin: Technischen Universität Berlin, 2024. DOI: [10.14279/depositonce-20356](https://doi.org/10.14279/depositonce-20356).
- [55] F. Biljecki, H. Ledoux und J. Stoter. “An Improved LOD Specification for 3D Building Models”. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 59 (2016), S. 25–37. ISSN: 01989715. DOI: [10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005).
- [56] M. Geske und C. Völker. “Einflüsse unterschiedlicher Eingangsdaten auf die Quartierssimulation: Untersuchung der Interaktionseffekte”. In: *Proceedings Bauphysik-tage in Weimar 2024: Bauphysik in Forschung und Praxis* (2024). Hrsg. von 6.-7. M. 13. Bauphysik-tage in Weimar 2024, A. Vogel, C. Völker und O. Kornadt. DOI: [10.25643/dbt.59909](https://doi.org/10.25643/dbt.59909).
- [57] V. Coors, M. Betz und E. Duminil. “A Concept of Quality Management of 3D City Models Supporting Application-Specific Requirements”. In: *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 88.1 (2020), S. 3–14. ISSN: 2512-2789, 2512-2819. DOI: [10.1007/s41064-020-00094-0](https://doi.org/10.1007/s41064-020-00094-0).
- [58] T. Falke, S. Kregel, A.-K. Meinerzhagen und A. Schnettler. “Multi-Objective Optimization and Simulation Model for the Design of Distributed Energy Systems”. In: *Applied Energy* 184 (2016), S. 1508–1516. ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.03.044](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.044).
- [59] C. Klemm, G. Becker, J. N. Tockloth, J. Budde und P. Vennemann. *The Spreadsheet Energy System Model Generator (SESMG): A Tool for the Optimization of Urban Energy Systems*. 2023. DOI: [10.21105/joss.05519](https://doi.org/10.21105/joss.05519).

- [60] Energie- und Umwelttechnik. *VDI 4645 - Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern - Planung, Errichtung, Betrieb*. Hrsg. von E. und Umwelt. 2023. 208 S. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4645-heizungsanlagen-mit-waermepumpen-in-ein-und-mehrfamilienhaeusern-planung-errichtung-betrieb-1> (besucht am 11.01.2025).
- [61] V. Hagedorn. *Wohnquartiere mit einem Niedrig-Temperatur-Wärmenetz: Eine modellgestützte Analyse zentraler und dezentraler Energieversorgungssysteme*. Best-Masters. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. DOI: [10.1007/978-3-658-25993-8](https://doi.org/10.1007/978-3-658-25993-8).
- [62] E. Bruns, M. Futterlieb, D. Ohlhorst und B. Wenzel. “Erneuerbare Energien in Wärmenetzen – eine realistische Perspektive?” In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 36.3 (2012), S. 159–172. ISSN: 0343-5377, 1866-2765. DOI: [10.1007/s12398-012-0087-z](https://doi.org/10.1007/s12398-012-0087-z).
- [63] T. Tröndle, D. Süsser und J. Lilliestam. *Ohne Windenergie Keine Energiewende. Die 1000 Meter-Abstandsregelung Macht Windenergieausbau Unmöglich Und Stellt Damit Den Kohleausstieg in Deutschland in Frage*. Potsdam: Institute for Advanced Sustainability Studies, 2019. DOI: [10.2312/iass.2019.052](https://doi.org/10.2312/iass.2019.052).
- [64] F. Urbansky. “Wie Bekommt Man Die Wärmenetze Grün?” In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 48.1 (2024), S. 30–36. ISSN: 1866-2765. DOI: [10.1007/s12398-024-1250-z](https://doi.org/10.1007/s12398-024-1250-z).
- [65] T. Rovers, C. Struck, C. Gieling, S. Mohammadi, O. Slagmolen, A. Dorée, L. Olde Scholtenhuis, K. Vink, H. Poppe, D. Koopman, H. ter Maat und B. Boeve. “Development and Evaluation of Digital Twins for District-Level Heating Energy Demand Simulation”. In: *CLIMA 2022 conference* (2022). DOI: [10.34641/clima.2022.399](https://doi.org/10.34641/clima.2022.399).
- [66] M. Iivonen. “Renovation of a Heating System”. In: *The REHVA European HVAC Journal* (Volume: 57 2020), S. 46–49. ISSN: 1307-3729. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/renovation-of-a-heating-system> (besucht am 27.12.2024).
- [67] A. Vadiée, A. Doodoo und E. Jalilzadehazhari. “Heat Supply Comparison in a Single-Family House with Radiator and Floor Heating Systems”. In: *Buildings* 10.1 (2019), S. 5. ISSN: 2075-5309. DOI: [10.3390/buildings10010005](https://doi.org/10.3390/buildings10010005).
- [68] S. Linder. “Räumliche Diffusion von Photovoltaik-Anlagen in Baden-Württemberg”. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2013. URL: <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/docId/6694>.
- [69] R. Bracke, W. Rocholl, B. Schmidt, G. Bussmann, T. Eicker und B. Kelz. *Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 - Geothermie: LANUV-Fachbericht 40*. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2015. URL: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_40-Teil4-Geothermie_web.pdf.
- [70] *Masterplan Geothermie Nordrhein-Westfalen*. Düsseldorf: Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2024. URL: https://www.wirtschaft.nrw/system/files/media/document/file/masterplan_geothermie_langfassung.pdf.

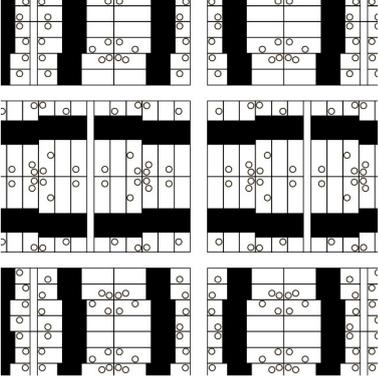
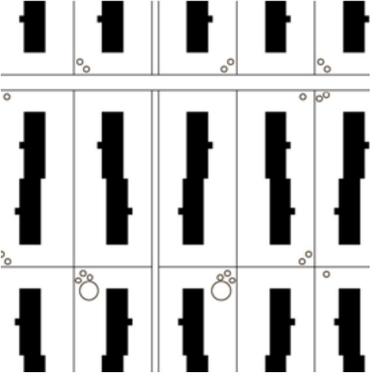
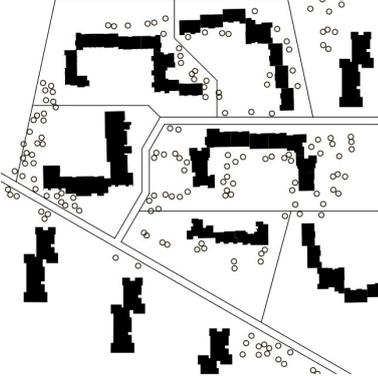
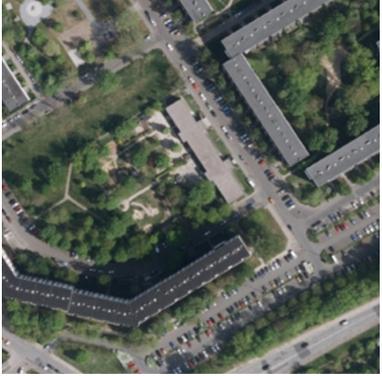
- [71] Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen. *Geothermie in NRW - Standortcheck*. URL: <https://www.geothermie.nrw.de/> (besucht am 12. 01. 2025).
- [72] M. M. Hoogwijk. "On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources". Universität Utrecht, 2004. URL: <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/782>.
- [73] T. Bennat, T. Broekel und R. Sternberg. "How to measure the usage of regional potentials of renewable energies. An empirical analysis of German counties". In: *Raumforschung und Raumordnung / Spatial Research and Planning* 77.6 (2019), S. 617–638. ISSN: 1869-4179, 0034-0111. DOI: [10.2478/rara-2019-0043](https://doi.org/10.2478/rara-2019-0043).
- [74] C. Schartner und M. Kralik. *Trends der Grundwassertemperatur: Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich*. Bd. 328. Report. Wien: Umweltbundesamt, 2011. 24 S. ISBN: 978-3-99004-130-7.
- [75] OpenAI. *ChatGPT*. URL: <https://chatgpt.com> (besucht am 11. 01. 2025).
- [76] Perplexity AI Inc. *Perplexity*. URL: <https://www.perplexity.ai> (besucht am 11. 01. 2025).

A. Energetische Stadtraumtypen aus UrbanReNet

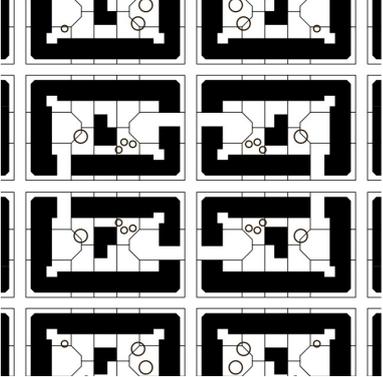
Tabelle A.1.: EST aus UrbanReNet nach [6, 7].

| Typ und Subtyp | Schematisches Luftbild | Luftbild |
|--|--|--|
| Überwiegende Wohnnutzung | | |
| EST 1 Kleine, freistehende Wohnbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit |  |  |
| EST 1A Freistehende Einfamilienhausbebauung | |  |
| EST 1B Freistehende Mehrfamilienhausbebauung | |  |

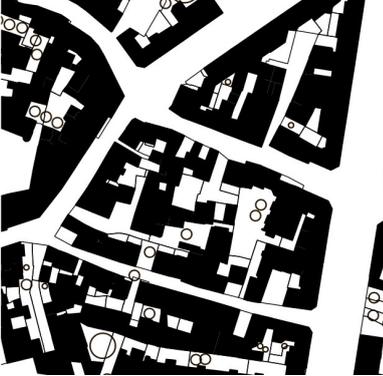
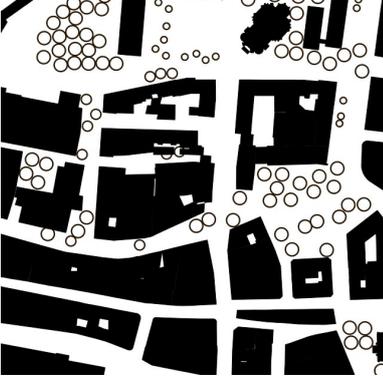
Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Typ und Subtyp | Schematisches Luftbild | Luftbild |
|--|---|--|
| <p>EST 2 Reihenhausbebauung</p> |  |  |
| <p>EST 3 Zeilenbebauung niedriger bis mittlerer Geschossigkeit</p> |  |  |
| <p>EST 4 Großmaßstäbliche Wohnbebauung hoher Geschossigkeit</p> |  |  |
| <p>EST 4A Großmaßstäbliche Zeilenbebauung</p> |  |  |

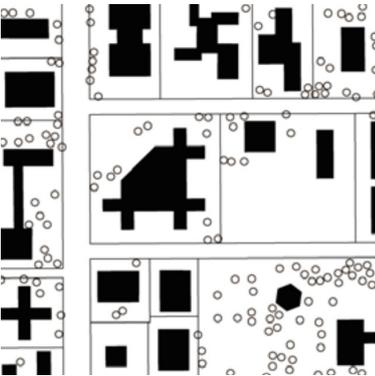
Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Typ und Subtyp | Schematisches Luftbild | Luftbild |
|---|--|---|
| <p>EST 4B Freistehende Wohnhochhäuser</p> | |  |
| <p>EST 5 Blockrandbebauung</p> |  |  |

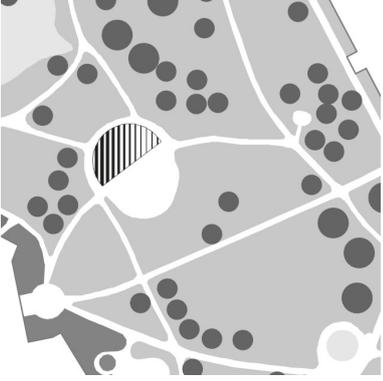
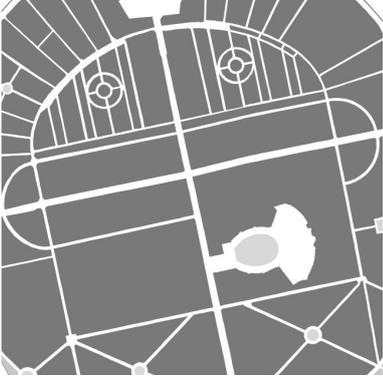
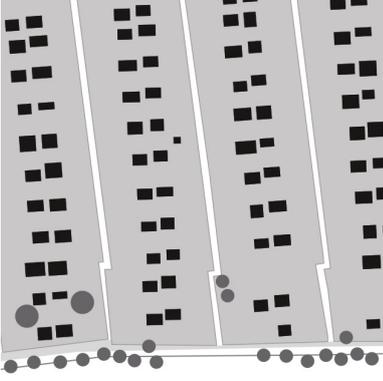
Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Typ und Subtyp | Schematisches Luftbild | Luftbild |
|--|---|--|
| Überwiegende Mischnutzung | | |
| EST 6 Dörfliche Bebauung |  |  |
| EST 7 Historische Altstadtbebauung |  |  |
| EST 8 Innenstadtbebauung |  |  |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Typ und Subtyp | Schematisches Luftbild | Luftbild |
|---|---|--|
| Büro- und gewerbliche Nutzung | | |
| <p>EST 9 Geschäfts-, Büro-, und Verwaltungsgebiet</p> |  |  |
| <p>EST 10 Gewerbegebiet</p> |  |  |
| <p>EST 10A Gewerbegebiet, überwiegend Handel</p> |  |  |
| <p>EST 10B Gewerbegebiet, überwiegend Pro- duktion</p> |  |  |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Typ und Subtyp | Schematisches Luftbild | Luftbild |
|--|---|--|
| Freiraum | | |
| <p>EST 11 Öffentliche Parkanlagen</p> |  |  |
| <p>EST 12 Friedhofsanlagen</p> |  |  |
| <p>EST 13 Kleingartenanlagen</p> |  |  |

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit „Energiesystemmodellierung auf Basis energetischer Stadtraumtypen“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Die verwendeten Literaturquellen sind im Literaturverzeichnis vollständig zitiert.

T. Steinort

Tim Mikku Steinort

Münster, 13. Januar 2025