

TUM School of Engineering and Design

---

Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände  
auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle

---

Hannes Michel Harter

---

Vollständiger Abdruck der von der promotionsführenden Einrichtung  
TUM School of Engineering and Design  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr. Ing.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
  2. Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe
  3. Prof. Dr. rer. nat. habil. Ursula Eicker
- 

Die Dissertation wurde am 11.05.2021 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die promotionsführende Einrichtung  
TUM School of Engineering and Design am 30.09.2021 angenommen.



# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) an der Technischen Universität München (TUM). Hier wurde es mir ermöglicht, mich in meinem Arbeiten, und vor allem auch in meinen Gedanken, frei in einem sehr innovativen und spannenden Forschungsfeld zu entfalten. Hierfür bedanke ich mich ganz besonders bei meinem Erstbetreuer und Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Werner Lang. Vielen Dank für eine inspirierende Zeit, für die vielfältige Unterstützung sowie für tiefgreifende Gespräche und Diskussionen und die wertvollen Hinweise zur inhaltlichen Ausrichtung und thematischen Eingrenzung dieser Arbeit. Zudem bedanke ich mich sehr bei meinem Zweitbetreuer der Dissertation, Herrn Prof. Dr. Thomas H. Kolbe für die konstruktive und hilfreiche Zusammenarbeit, ohne dessen bereitgestellte Forschungsarbeiten und Softwarelösungen hätte diese Arbeit nicht zu solch weitreichenden Ergebnissen geführt. Im Zuge dessen gebührt ein ebenfalls großes Dankeschön meinem Kollegen Herrn Bruno Willenborg, der mich von Seiten des Lehrstuhls von Herrn Prof. Dr. Kolbe über die gesamte Zeit meiner Dissertation kompetent unterstützt hat. Frau Prof. Dr. Ursula Eicker danke ich für die Übernahme des Drittgutachtens und Herrn Prof. Thomas Auer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Ein herzliches Dankeschön gilt allen jetzigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen, inklusive der HiWis des Lehrstuhls ENPB. Ich bedanke mich bei den Projektteams aller Forschungsprojekte (EERAdata, Grüne Stadt der Zukunft, DFG-Projekt „EarlyBim“ etc.), in denen ich während der Zeit der Promotion mitarbeiten konnte. Ich bin dankbar für die Möglichkeit der Zusammenarbeit mit diesen Teams, des gegenseitigen voneinander Lernens und gemeinsamen Weiterdenkens. In Bezug auf die programmierseitige Umsetzung meiner Methode und der Entstehung von urbi+ bedanke ich mich herzlich bei meinem Kollegen Jimmy Abualdenien für die fachliche und geduldige Unterstützung. Mein Dank geht auch an die Landeshauptstadt München (Planungsreferat) und das Bayerische Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung für die unkomplizierte Bereitstellung der für die Berechnungen und Analysen notwendigen Gebäudedaten.

Ich möchte mich auch bei meinen lieben Freundinnen und Freunden aus Filderstadt, Stuttgart und München bedanken, die stets an unserer Freundschaft festgehalten haben. Ganz besonderen Dank sagen möchte ich meinem besten Freund Dr. Bernhard Drotleff für seine langjährige Freundschaft und seine Unterstützung als Mentor meiner Dissertation. Jederzeit stand er mir mit seinem fachlichen und vor allem sehr hoch einzuschätzenden persönlichen Rat zur Seite. Zudem bedanke ich mich bei Katja Herter und ihrer Familie für die jahrelange Unterstützung und ihr Vertrauen. Der wohl größte Dank gebührt meinen Eltern und meiner Schwester für ihre jederzeitige Unterstützung, ihr unbedingtes Vertrauen in mich und meine Arbeit. Ihre bedingungslose Akzeptanz meiner Person und Lebensumstände schafft eine verlässliche Basis und einen ungemein starken Rückhalt, auf den ich mich in jeglichen Situationen verlassen kann.



# Zusammenfassung

Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Entwicklung, der programmierseitigen Umsetzung und der Anwendung einer Methode zur lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Analyse großer Wohngebäudebestände. Der spezielle Fokus liegt dabei auf ausgewählten Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und der Nutzung semantischer 3D-Stadtmodelle. Das durch die programmierseitige Umsetzung entwickelte Softwaretool urbi+ steht für „urban improvement“.

Im Zuge des Klimawandels und durch zunehmenden Druck von Seiten der Wissenschaft sowie der Gesellschaft steigt das gesellschaftspolitische Interesse an nachhaltigkeitsorientierten Themen. Daraus ergibt sich ein positiv zu wertender genereller Druck, Nachhaltigkeitsmaßnahmen zu erarbeiten und umzusetzen, der besonders auch den Gebäudebereich in den Fokus nimmt. Lebenszyklusbasierte Analysen dienen als mögliche Maßnahmen, um verschiedenste energetische, emissions- und kostenbezogene Parameter in Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte von Gebäuden zu bewerten. Diese sind jedoch bislang in keinen baurechtlichen Verordnungen implementiert und finden deshalb nur selten Anwendung in der Planungs- und Baupraxis. Die erarbeitete Methode zur lebenszyklusbasierten Betrachtung großer Wohngebäudebestände erweitert den bisherigen Bewertungshorizont deutlich über die Nutzungsphase hinaus und ermöglicht zudem den Vergleich unterschiedlicher Bewertungshorizonte. Hierbei können sowohl der Status quo als auch verschiedene Entwicklungsszenarien großer Gebäudebestände analysiert werden. Zudem bietet urbi+ eine Basis und Potenzial für weiterführende Forschungsarbeiten. Das Forschungsfeld der nachhaltigen Stadtplanung und -entwicklung eröffnet einen multidimensionalen Bewertungs- und Analyseraum, der sich durch eine Vielzahl an Wechselwirkungen zwischen den Betrachtungs- und Bewertungshorizonten charakterisiert.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen und Analysen zielen zunächst darauf ab, die entwickelte Methode der Lebenszyklusanalyse (LCA) der TGA auf der Basis von 3D-Stadtmodellen zu validieren und dessen korrekte Umsetzung und Anwendung aufzuzeigen. Darauf aufbauend lassen die Ergebnisse erkennen, wie wichtig die Implementierung der Themenfelder LCA und Lebenszykluskostenanalyse (LCC) auf städtischer Ebene ist, um eine nachhaltige urbane Entwicklung anzustoßen. Die weiterführenden auf Stadtquartiers- und Stadtebene erzielten Ergebnisse geben Aufschluss über die Heizlast, den Heizenergiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen und Kosten. Zudem wird die Dimensionierung der Technische Gebäudeausrüstung (TGA)-Komponenten und die für diese Komponenten anfallende Graue Energie, anfallenden Grauen Emissionen und Grauen Kosten miteinbezogen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen unter anderem auf, dass trotz ambitionierter Entwicklungsszenarien für große Gebäudebestände lebenszyklusbasiert beachtliche Energiebedarfe und daraus resultierende Emissionen und Kosten anfallen.



# Abstract

This dissertation deals with the development, programming-side implementation and application of a method for life-cycle-based energy, emissions, and cost assessment of large residential building stocks. The specific focus is on selected components of the technical building services (TBS) and the use of semantic 3D city models. The software tool urbi+ developed by the programming-side implementation stands for „urban improvement“.

In the course of climate change and due to increasing pressure from science as well as society the socio-political interest in sustainability-oriented topics is increasing. This results in a general positive pressure to develop and implement sustainability measures, which also focuses on the building sector in particular. Life-cycle-based assessments serve as possible measures for evaluating a wide range of energy, emission and cost-related parameters with regard to sustainability aspects of buildings. However, these have not yet been implemented in any building regulations and are therefore rarely used in planning and construction practice. The developed method for life-cycle based assessment of large residential building stocks extends the previous assessment horizon significantly beyond the use phase and also enables the comparison of different assessment horizons. Both the status quo and various development scenarios for large building stocks can be analyzed. This results in new possibilities for the evaluation and analysis of large building stocks and for the elaboration of development scenarios based on this. In addition, urbi+ offers a basis and potential for further research work. The research field of sustainable urban planning and development opens up a multidimensional evaluation and analysis space, which is characterized by a multitude of interactions between the observation and evaluation horizons.

The calculations and analyses carried out in this work aim firstly to validate the developed method of Life Cycle Assessment (LCA) of TBS based on 3D city models and to show its correct implementation and application. Based on this, the results suggest the importance of implementing LCA and Life Cycle Costing (LCC) at the city level to trigger sustainable urban development. The further results obtained at the city quarter and city level provide information on the heating load, heating energy demand and the resulting emissions and costs. In addition, the dimensioning of the TBS components and the embedded energy, embedded emissions and embedded costs incurred for these components are included. The results of this work show, among other things, that despite ambitious development scenarios for large building stocks, considerable energy requirements and resulting emissions and costs are incurred on a life-cycle basis.



# Abkürzungsverzeichnis

<b>ADE</b>	Application Domain Extension
<b>AEE</b>	Anteil erneuerbarer Energie an Primärenergiequelle
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>BAK</b>	Baualtersklasse
<b>BIM</b>	Building Information Modelling
<b>CityGML</b>	City Geography Markup Language
<b>COP</b>	Coefficient of Performance
<b>DGNB</b>	Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
<b>EFH</b>	Einfamilienhaus
<b>EEB</b>	Endenergiebedarf
<b>EnEV</b>	Energieeinsparverordnung
<b>ENPB</b>	Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
<b>EPD</b>	Environmental Product Declaration
<b>ESD</b>	Prozentuale Energiesystemverteilung
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>FAK</b>	Zusätzliche Berechnungsfaktoren Energie-, Emissions- und Kostenwerte
<b>FBH</b>	Fußbodenheizung
<b>g-Wert</b>	Energiedurchlassgrad
<b>GUI</b>	Graphische Nutzeroberfläche
<b>GWP</b>	Global Warming Potential
<b>HP</b>	Heizperiode
<b>IEA</b>	International Energy Agency

---

<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KW</b>	Kostenwerte Endenergie der Energieträger
<b>KOST</b>	Kostenwerte aller betrachteten Komponenten
<b>LCC</b>	Lebenszykluskostenanalyse
<b>LCA</b>	Lebenszyklusanalyse
<b>LD</b>	Lebensdauer Wohngebäude
<b>LHM</b>	Landeshauptstadt München
<b>LK</b>	Lebensdauer Komponenten
<b>LoD</b>	Level of Detail
<b>MFH</b>	Mehrfamilienhaus
<b>PEF</b>	Primärenergiefaktor
<b>PENRT</b>	Primärenergiebedarf aus nicht-erneuerbaren Energiequellen
<b>PERT</b>	Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energiequellen
<b>PET</b>	Summe Primärenergiebedarf
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>SQL</b>	Structured Query Language
<b>TEM</b>	Temperaturwerte
<b>TGA</b>	Technische Gebäudeausrüstung
<b>TWW</b>	Trinkwarmwasser
<b>UGW</b>	U-/g-Werte
<b>U-Wert</b>	Wärmedurchgangskoeffizient
<b>WP</b>	Wärmepumpe
<b>WÜS</b>	Prozentuale Wärmeübergabesystemverteilung
<b>XML</b>	Extensible Markup Language

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>I. Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1. Motivation und Problemstellung . . . . .	5
1.2. Aufgabenstellung, Zielsetzung und Forschungshypothesen . . . . .	5
1.3. Forschungsansatz . . . . .	6
<b>2. Stand der Forschung und Technik</b>	<b>11</b>
2.1. Lebenszyklusanalyse von Gebäuden . . . . .	11
2.2. Forschungsarbeiten im Themenbereich . . . . .	13
2.2.1. Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung . . . . .	13
2.2.2. Lebenszyklusanalyse großer Gebäudebestände . . . . .	14
2.3. Fazit, Stand der Forschung und Technik . . . . .	17
<b>II. Forschungsansatz und Methodenentwicklung</b>	<b>19</b>
<b>3. Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Gebäudebestände</b>	<b>21</b>
3.1. Grundlagen der Methodenentwicklung . . . . .	24
3.1.1. Programmierschnittstellen und Softwarelösungen . . . . .	25
3.1.2. Methoden und Normen als Grundlage . . . . .	27
3.2. Annahmen zur Methodenentwicklung . . . . .	29
3.2.1. Betrachtete Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung . . . . .	31
3.3. Datenakquise und Datenverarbeitung . . . . .	32
3.3.1. Input-Informationen . . . . .	32
3.3.2. Berechnung der Flächen der Gebäudekomponenten . . . . .	35
3.3.3. Berechnung sich überschneidender Wandflächen . . . . .	38

3.3.4. Berechnung des Gebäudevolumens . . . . .	38
3.4. Energiebedarf und Heizlast . . . . .	39
3.4.1. Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarf . . . . .	39
3.4.2. Energiebedarf für Trinkwarmwasser . . . . .	46
3.4.3. Gebäudebezogener Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf . . . . .	48
3.4.4. Heizlast Raumheizung . . . . .	49
3.4.5. Heizlast Trinkwarmwasserbereitstellung . . . . .	55
3.4.6. Gebäudebezogene Gesamtheizlast . . . . .	55
3.5. Dimensionierung und Auslegung der betrachteten TGA-Komponenten . . . . .	56
3.5.1. Dimensionierung der Wärmeerzeuger . . . . .	56
3.5.2. Dimensionierung Öl-Tank . . . . .	57
3.5.3. Dimensionierung der Fläche der Solarthermieanlage . . . . .	57
3.5.4. Dimensionierung der Sondenlänge der Erdwärmesonden . . . . .	58
3.5.5. Dimensionierung Erdwärmekollektoren . . . . .	59
3.5.6. Dimensionierung Brunnensystem . . . . .	59
3.5.7. Dimensionierung Rohrleitungen . . . . .	60
3.5.8. Dimensionierung Wärmeübergabesysteme . . . . .	65
3.5.9. Dimensionierung der Wärmespeicherung . . . . .	66
3.6. Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung . . . . .	69
3.6.1. Grundlagen der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung . . . . .	70
3.6.2. Berechnung der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung . . . . .	73
3.7. Lebenszykluskostenanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung . . . . .	77
3.7.1. Lebenszykluskostenanalyse der Treibhausgasemissionen . . . . .	81
3.7.2. Diskontierung in der Lebenszykluskostenanalyse . . . . .	82
3.8. Szenarienbetrachtung Gebäudeentwicklung . . . . .	83
3.8.1. Sanierung Einzelgebäude . . . . .	87
3.8.2. Sanierung großer Gebäudebestände . . . . .	87
3.9. Export und Visualisierung der Ergebnisse . . . . .	91
3.9.1. Export der Ergebnisse . . . . .	91
3.9.2. Visualisierung der Ergebnisse . . . . .	91

### **III. Anwendung der Methode** **97**

#### **4. Anwendung und Validierung der Methode anhand von Fallbeispielen** **99**

4.1. Anwendung der Methode auf Gebäudeebene . . . . .	100
4.1.1. Definition der Fallbeispiele auf Gebäudeebene . . . . .	100
4.1.2. Definition der Berechnungsparameter auf Gebäudeebene . . . . .	102
4.1.3. Berechnungsergebnisse auf Gebäudeebene . . . . .	106
4.1.4. Fazit Gebäudeebene . . . . .	122
4.2. Anwendung der Methode auf Stadtquartiersebene . . . . .	122
4.2.1. Definition Fallbeispiel Stadtquartiersebene . . . . .	123

4.2.2. Definition Berechnungsparameter Stadtquartiersebene . . . . .	125
4.2.3. Berechnungsergebnisse auf Stadtquartiersebene . . . . .	133
4.2.4. Fazit Stadtquartiersebene . . . . .	166
4.3. Anwendung der Methode auf Stadtebene . . . . .	167
4.3.1. Definition Fallbeispiel Stadtebene . . . . .	167
4.3.2. Definition Berechnungsparameter Stadtebene . . . . .	170
4.3.3. Berechnungsergebnisse Stadtebene . . . . .	172
4.3.4. Fazit Stadtebene . . . . .	186
4.4. Übertragbarkeit der Methode auf Stadtebene . . . . .	186
4.4.1. Definition Fallbeispiel Übertragbarkeit Stadtebene . . . . .	187
4.4.2. Definition Berechnungsparameter Übertragbarkeit Stadtebene . . . . .	189
4.4.3. Berechnungsergebnisse Übertragbarkeit Stadtebene . . . . .	192
4.4.4. Fazit Übertragbarkeit Stadtebene . . . . .	196
<b>IV. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick</b>	<b>199</b>
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>201</b>
<b>6. Fazit</b>	<b>207</b>
<b>7. Ausblick</b>	<b>213</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>219</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>237</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>241</b>
<b>Glossar</b>	<b>247</b>
<b>A. Anhang - Tabellen</b>	<b>249</b>
<b>B. Anhang - Abbildungen</b>	<b>287</b>



**Teil I**

**Grundlagen**



# 1. Einleitung

Die Entwicklung, Planung und Umsetzung nachhaltiger Gebäudekonzepte sind einige der wichtigsten Meilensteine auf dem Weg zu einer klimaneutralen oder klimapositiven Gesellschaft. Die Gebäude waren im Jahr 2019 weltweit für mehr als ein Drittel des Endenergieverbrauchs und fast 40 % der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [1]. Auf die Herstellung von Baumaterialien entfallen dabei rund 11 % der Emissionen [2]. Dabei stellt das Jahr 2019 mit einem Allzeithoch ein Rekordjahr dar. Hierfür macht die Internationale Energieagentur (IEA) extreme Wetterereignisse und eine wachsende Nachfrage nach Energiedienstleistungen als die zwei größten Treiber aus [3]. Ein Rückgang der Anzahl solcher Ereignisse und eine sinkende Nachfrage nach Energie ist in den kommenden Jahren nicht zu erwarten, denn neben einer wachsenden Weltbevölkerung spielt das durchschnittliche jährliche Wachstum an gebäudebezogener Grundfläche von 2,5 % eine signifikant größere Rolle als der Rückgang der Energieintensität um jährlich 1 % (Endenergieverbrauch pro m<sup>2</sup>) [3]. Zwischen den Jahren 1800 und 2019 ist die Bevölkerung von einer Milliarde auf 7,7 Milliarden angewachsen [4]. Prognosen sagen für das Jahr 2050 9,7 Milliarden und für das Jahr 2100 elf Milliarden Menschen auf dem Planeten Erde voraus [5]. Hinzu kommt, dass Baumaterialien rund die Hälfte der festen Abfälle ausmachen, die jedes Jahr weltweit anfallen [6].

Diese Trends sind bekannt und werden doch häufig von gesellschaftlicher und politischer Seite ignoriert [7]. Jedoch wächst der Widerstand gegen diese Ignoranz (Fridays for Future, Scientists for Future etc.) und es gibt eine Vielzahl wissenschaftlicher und politischer Ansätze [8], die Klarheit, Transparenz, Wissen und Umsetzungswillen in diese globale Debatte mit einfließen lassen wollen. Aufgrund des hohen Energiebedarfs und Emissionsausstoßes von Gebäuden bedarf es neuer Methoden und Instrumente zur Messung, zum Vergleichen und zur Optimierung von gebäudebezogenen Energieverbräuchen und Umweltauswirkungen. Energetische und emissionsbezogene Lebenszyklusanalysen (LCAs) bilden hierfür einen methodischen Ansatz [9]. Im Rahmen einer LCA werden nicht nur die Energiebedarfe und -verbräuche und die dabei anfallenden Emissionen in der Nutzungsphase während des Gebäudebetriebs mit bilanziert. Ebenfalls werden die Energien und Emissionen, die bei der Herstellung, Nutzung (dem Austausch und Ersatz von Gebäudekomponenten) und am Ende des Lebenszyklus (Entsorgungsphase) von Gebäuden anfallen, berücksichtigt. Diese sogenannten „Grauen Energien“ und „Grauen Emissionen“ beziehen sich auf die Materialien und Komponenten der Gebäude. Hierfür wurden speziell für die LCA bzw. die Umweltdeklaration von Gebäuden und Bauprodukten die Normen DIN EN 15978 [10] und DIN EN 15804 [11] eingeführt.

Bedingt durch den stetig sinkenden Energiebedarf und Emissionsausstoß von Gebäuden während ihrer Nutzungsphase (Gebäudebetrieb) hin zu Passiv- und/oder Plus-Energiehäusern, steigt der Anteil der benötigten Energie und verursachten Emissionen für die Herstellungs-, Nutzungs- (beim

Austausch und Ersatz von Gebäudekomponenten) sowie Entsorgungsphase im Vergleich zur Nutzungsphase stetig an. Der sinkende Energiebedarf und Emissionsausstoß ist dabei unter anderem auf effizientere Energiesysteme, über die Zeit steigende Anforderungen in Verordnungen wie z. B. in der *Energieeinsparverordnung* (EnEV) [12] oder deren Nachfolgegesetz, dem *Gebäudeenergiegesetz* (GEG) [13], und energetisch optimierte Gebäudehüllen zurückzuführen. Dies hat z. B. zur Folge, dass mehr Dämmmaterial und/oder hoch technisierte Systeme eingesetzt werden. Beide Maßnahmen führen zu einem erhöhten Einsatz an Energie, Emissionen und Kosten für deren Herstellung, Nutzung (Austausch und Ersatz) sowie Entsorgung. Dadurch nehmen die Herstellungs-, Nutzungs- (beim Austausch und Ersatz von TGA-Komponenten) und Entsorgungsphasen einen immer größeren Anteil am lebenszyklusbasierten Energiebedarf, Emissionsausstoß und Kostenaufkommen von Gebäuden ein und müssen deshalb detaillierter betrachtet werden [14][15][16]. Diese Entwicklung stellt neue Anforderungen an baukonstruktive Elemente von Gebäuden und deren Technische Gebäudeausrüstung (TGA) in Bezug auf nachhaltige Lösungen. Dabei wird die TGA aufgrund fehlender LCA-Daten und wegen ihrer Komplexität nur selten bei der Gebäude-LCA mitbetrachtet. Werden TGA-Komponenten berücksichtigt, dann in den meisten Fällen lediglich die Wärmeerzeuger. Alle weiteren Komponenten werden über einen Faktor abgebildet [17]. Trotz eines geringen Massenanteils der TGA von 1 % bis 4 % an der Gesamtmasse eines Gebäudes kann diese einen Anteil von 7 % bis 23 % am lebenszyklusbasierten Energiebedarf und den sich daraus ergebenden Umwelteinwirkungen einnehmen [18]. Es existieren zudem Untersuchungen, die spezifische Gebäude oder einzelne Gebäudearten betrachten, die einen Anteil der TGA am lebenszyklusbasierten Energiebedarf und Emissionsausstoß von bis zu 48 % errechnen [19]. Es gibt jedoch keine Untersuchungen zu inhomogenen Gebäudebeständen mit unterschiedlicher TGA auf der Ebene von Stadtquartieren oder Städten.

In urbanen Bereichen stecken hohe Entwicklungspotenziale für eine nachhaltig gestaltete Zukunft. Rund 55 % der Menschen weltweit leben in einer urbanen Umgebung [20]. Deshalb ist gerade hier der Stellhebel zur Minderung der Umweltbelastungen und Senkung des Energiebedarfs besonders wirksam. Es gilt Verfahren zu entwickeln, den urbanen Gebäudebestand anhand von LCA und Lebenszykluskostenanalysen (LCCs) zu untersuchen, zu bewerten und hinsichtlich energetischer, emissions- und kostenbezogener Fragestellungen zu optimieren. Hierbei bedarf es im Speziellen an Konzepte zur spezifischen Bewertung der TGA, die bislang in der Forschung und Technik nicht auf der Basis großer Gebäudebestände existieren. Semantische 3D-Stadtmodelle bieten eine fundierte Grundlage zur Berechnung der gebäudebezogenen energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bilanz großer Gebäudebestände. 3D-Stadtmodelle im City Geography Markup Language (CityGML)-Format bieten ein digitales Abbild der Realität und umfassen sowohl geometrische als auch topologische und strukturelle Informationen verschiedenster Stadtobjekte, unter anderem auch von Gebäuden [21]. Diese Informationen können dazu herangezogen werden, weitgreifende und großflächige Berechnungen und Analysen durchzuführen. Die aus diesen Untersuchungen und Analysen resultierenden Ergebnisse können dazu genutzt werden, innovative Entwicklungsszenarien für eine lebenszyklusbasierte nachhaltige Entwicklung von Gebäuden und Städten zu konzipieren und um eine klimaneutrale bzw. klimapositive Stadtentwicklung anzustreben.

## 1.1. Motivation und Problemstellung

Die angeführten Herausforderungen zeigen die hohe Dringlichkeit, sich der Thematik der nachhaltigen Gebäude- und Stadtentwicklung anzunehmen. Bisher fehlen wissenschaftliche Methoden, Werkzeuge und Erkenntnisse zur Durchführung von LCAs und LCCs großer Gebäudebestände (Stadtquartiers- und Stadtebene). Auch mangelt es an Methoden zur Durchführung der LCA und LCC in Bezug auf die TGA. Die identifizierten Forschungslücken bilden nicht nur die Grundlage der Motivation dieser Dissertation, sondern auch meine persönliche Motivation, dem anthropogenen Klimawandel entgegenwirken zu wollen.

Für diese Dissertation ergibt sich folglich eine maßgebliche Problemstellung: Die mangelnde Verfügbarkeit von Daten auf der Basis großer Gebäudebestände, die für die Berechnungen und Analysen benötigt werden. Auf Stadtquartiers- und Stadtebene gibt es in Deutschland, und so auch in München, keinen konsistenten Datensatz, der über ein gesamtes Stadtgebiet gebäudespezifische Daten, wie z. B. über Energiebedarfe oder verbaute Energiesysteme, zusammenführt. Die zur Verfügung stehenden Daten beziehen sich auf verschiedene Zeitpunkte oder Jahre, beinhalten unterschiedliche Werte für dieselben Gebäude, weisen Datenlücken auf und erfassen in der Summe nicht alle relevanten Daten, die für weiterführende Analysen verwendet werden müssten. Um dieser Problemstellung entgegenzuwirken, wird in einem ersten Schritt die Bedeutsamkeit der Thematik der gebäudebezogenen Lebenszyklusanalyse ganzer Stadtquartiere und Städte aufgezeigt. Hierfür müssen Methoden entwickelt werden, die anhand weniger Input-Parameter die Durchführung von LCAs und LCCs ermöglichen. Anhand der daraus resultierenden Ergebnisse kann nicht nur die Wichtigkeit der Thematik aufgezeigt, sondern auch ein Anreiz für Kommunen geschaffen werden, eine konsolidierende Datenbasis für derartige Analysen und Bewertungen zu erarbeiten.

Alle weiteren Hürden zählen als Herausforderungen, die sich in Form von Recherchearbeit, Methodenentwicklung, Programmieraufwand, Datenauswertung etc. widerspiegeln. Die programmierseitige Umsetzung der entwickelten Methode ermöglicht eine in Zukunft zeiteffiziente Analyse und übertragbare Durchführung der Methode auf weitere Fallbeispiele. Zudem ergeben sich eine Vielzahl von Möglichkeiten der Weiterentwicklung und Verknüpfung mit anderen Werkzeugen und Methoden.

## 1.2. Aufgabenstellung, Zielsetzung und Forschungshypothesen

Aufgabe dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, die in der Lage ist, auf Grundlage weniger Input-Daten wie z. B. Geometrien, Baujahr und Nutzungsart der betrachteten Gebäude, korrekte und für die Erarbeitung von Entwicklungsszenarien verwendbare lebenszyklusbasierte Ergebnisse bezüglich der LCA und LCC der TGA für große Gebäudebestände zu errechnen. Die Methode berücksichtigt energetische, emissions- und kostenbezogene Parameter, nutzt 3D-Stadtmodelle als Grundlage für die Berechnungen und soll in Form eines eigens programmierten Tools automatisiert anwendbar sein. Eine weitere Aufgabe ist die Implementierung einer Methode zur Berechnung und Analyse von Entwicklungsszenarien und die grafische Darstellung bzw. der Export der Ergebnisse in das genutzte 3D-Stadtmodell.

Darüber hinaus soll es möglich sein, die energetischen, emissions- und kostenbezogenen Ergebnisse der Nutzungsphase der betrachteten Gebäude(bestände) zu errechnen. Die Methode und das Tool müssen so konzipiert werden, dass beide auf verschiedensten Ebenen (Gebäude, Stadtquartier, Stadt) angewendet werden können. Die errechneten Ergebnisse sollen für stadtplanerische, energievorsorgungstechnische und politische Belange als Planungsgrundlage nutzbar sein. Ebenso können die Ergebniswerte als Grundlage für die Konzeption von Entwicklungsszenarien mit der Zielsetzung der Klimaneutralität herangezogen werden.

Weiterführend lassen sich die folgenden drei Forschungshypothesen aufgrund der Aufgabenstellung und Zielsetzung aufstellen:

- Forschungshypothese 1: 3D-Stadtmodelle (CityGML-Format) und die darin enthaltenen Informationen bieten eine ausreichende Grundlage zur Durchführung von Lebenszyklusanalysen der TGA mit Fokus auf große Wohngebäudebestände.
- Forschungshypothese 2: Eine statische Berechnung der Energiebedarfe, der LCA und LCC auf Gebäudeebene liefert hinreichend genaue Ergebnisse, um dieselben Berechnungen auf der Basis großer Gebäudebestände durchführen zu können.
- Forschungshypothese 3: Anhand der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Gebäudebestände lassen sich weitreichende Erkenntnisse bezüglich der nachhaltigen Stadtentwicklung erlangen.

Diese Forschungshypothesen werden im Verlauf der Arbeit falsifiziert oder gegebenenfalls verifiziert und in Kapitel 7 *Ausblick* nochmals aufgegriffen und diskutiert.

### 1.3. Forschungsansatz

Diese Dissertation setzt sich aus vier aufeinander aufbauenden Teilen zusammen (siehe Abbildung 1.1 auf Seite 8):

- Grundlagen (Teil I)
- Forschungsansatz und Methodenentwicklung (Teil II)
- Anwendung der Methode (Teil III)
- Zusammenfassung, Fazit und Ausblick (Teil IV)

Dabei wird ein klassischer Forschungsansatz verfolgt. Im Teil I der *Grundlagen* wird sowohl die Relevanz der Thematik als auch die sich daraus ergebende Motivation erklärt. Hieraus lassen sich die zu bearbeitenden Problemstellungen und angestrebten Ziele definieren. Mit der darauffolgenden Aufarbeitung des Standes der Technik und Forschung werden bisherige Forschungsarbeiten in diesem Themenfeld erläutert und die Ausgangsbasis für die Methodenentwicklung geschaffen.

Der Teil II *Forschungsansatz und Methodenentwicklung* baut auf dem derzeitigen Stand der Technik und Forschung auf. Hierbei werden die Grundlagen der LCA und LCC und der zu untersuchenden TGA erläutert und die Methodenentwicklung beschrieben, die die Problemstellungen bearbeitet und die definierten Ziele verfolgt. Das methodische Vorgehen wird analog und chronologisch zu ihrer programmierseitigen Umsetzung erklärt. Die beschriebenen Formeln und Werte werden in Java implementiert und in Form eines Softwaretools umgesetzt. Das ermöglicht die Anwendung der Methode im darauf folgenden Teil III.

Die *Anwendung der Methode* (siehe Teil III) erfolgt auf drei Betrachtungsebenen: Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtebene. Auf Gebäudeebene findet zusätzlich zur Ergebnisauswertung und -präsentation eine Validierung und ein Abgleich der Ergebnisse mit bereits validierten Tools und publizierten Forschungsarbeiten statt. Auf Stadtquartierebene wird neben der Ergebnispräsentation und der Betrachtung von Entwicklungsszenarien eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, um zu ermitteln, welchen Effekt variierende Werte (Annahmen) von Input-Parametern auf die Varianz der Endergebnisse haben. Auf Stadtebene werden die Ergebnisse des Status quo inklusive der Entwicklungsszenarien sowie die Übertragbarkeit der Methode auf ein internationales Fallbeispiel dargestellt. Recherchen haben gezeigt, dass es bisher keine vergleichbaren Ansätze in der Forschung und Technik gibt.

Der Teil IV *Zusammenfassung, Fazit und Ausblick* zeigt anschließend nochmals die wichtigsten Ergebnisse auf und verknüpft die daraus gewonnen Erkenntnisse miteinander. Das Fazit nimmt die genannten Forschungshypothesen auf und beantwortet Forschungsfragen, die sich im Verlauf der Arbeit ergeben haben. Der Ausblick schafft Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten und definiert Schnittstellen zu weiteren Themen- und Forschungsfeldern.

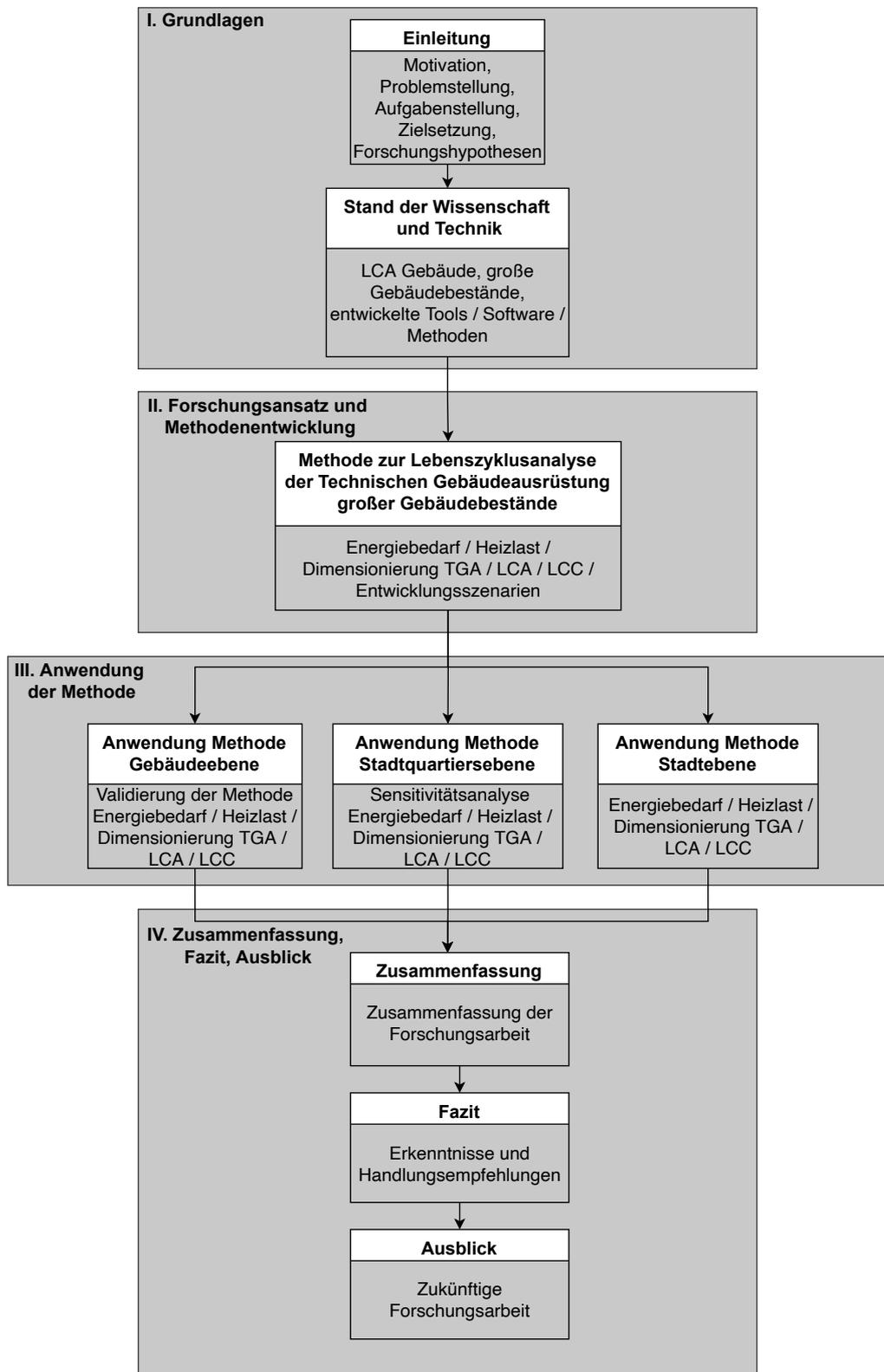


Abbildung 1.1.: Ablaufdiagramm des Forschungsansatzes (eigene Abbildung)

An das Ende jedes Kapitels werden Kurzfassungen gestellt. Darin werden die wichtigsten Aussagen und Erkenntnisse des jeweiligen Kapitels nochmals stichpunktartig zusammengestellt.

**Kurzfassung der Einleitung:**

- Gebäude sind weltweit für mehr als ein Drittel des Endenergieverbrauchs und rund 40 % der direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [1].
- Prognosen gehen von 9,7 Mrd. Menschen im Jahr 2050 bzw. 11 Mrd. Menschen im Jahr 2100 auf dem Planeten Erde aus [5].
- In absehbarer Zukunft ziehen wöchentlich rund 1,5 Mio. weitere Menschen in Städte [22].
- Bis zum Jahr 2060 werden weltweit 230 Mrd. m<sup>2</sup> an Gebäudefläche hinzukommen. Diese Fläche entspricht dem gesamten derzeitigen globalen Gebäudebestand [2].
- Daraus ergibt sich sowohl eine hohe Dringlichkeit als auch ein großes Potenzial, diese Entwicklung nachhaltig und klimagerecht zu gestalten und den Bewertungshorizont auf den gesamten Lebenszyklus zu erweitern.
- Hierzu werden unter anderem bislang nicht existierende Methoden und Werkzeuge benötigt, um den gebäudebezogenen Entwicklungsprozess lebenszyklusbasiert zu bewerten und zu analysieren. Die Ergebnisse hieraus können herangezogen werden, um politische und stadtplanerische Entscheidungsabläufe zu unterstützen.
- Jedoch ist die digitale Datenverfügbarkeit von großen Gebäudebeständen bisher sehr begrenzt, weshalb Lebenszyklusanalysen, speziell auch in Bezug auf die TGA, auf dieser Basis nicht durchgeführt werden.
- Aufgabe und Ziel dieser Dissertation ist es somit, eine Methode zu entwickeln, die in der Lage ist, auf Grundlage weniger Input-Daten zu großen Gebäudebeständen, korrekte und für die Erarbeitung von Entwicklungsszenarien verwendbare lebenszyklusbasierte Ergebnisse zur LCA und LCC der TGA zu errechnen.



## 2. Stand der Forschung und Technik

Die folgenden Unterkapitel reflektieren den momentanen Stand der Forschung und Technik im Bereich der Lebenszyklusanalyse (LCA) und Lebenszykluskostenanalyse (LCC)<sup>1</sup> von Gebäuden mit speziellem Fokus auf die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) und große Gebäudebestände und bieten die Grundlage für die darauf aufbauende Methodenentwicklung.

### 2.1. Lebenszyklusanalyse von Gebäuden

Die LCA im Gebäudebereich ist auf internationalen, nationalen und kommunalen politischen und institutionellen Ebenen im Gespräch. Sie wird aktuell diskutiert und findet dennoch wenig Anwendung in der Planungs- und Baupraxis. So gibt es zum Beispiel, beginnend auf internationaler Ebene, einen von der *International Energy Agency (IEA)* publizierten Annex zu LCA-Methoden für Gebäude [23]. Internationale Institutionen wie z. B. das *American Institute of Architects* oder die *U.S. General Services Administration* geben Leitfäden zur Durchführung von Gebäude-LCAs in der Praxis [24] und Anleitungen zur LCA im Gebäudebereich heraus [25].

Auf europäischer Ebene wurde vom *European Commission's Science and Knowledge Service* ein Modell zur Lebenszyklusanalyse von Gebäuden [26] veröffentlicht. Solche Modelle ergeben sich aus von der Europäischen Union (EU) geförderten Forschungsprojekten. Diesbezüglich wurde bereits und wird nach wie vor im Forschungsprogramm Horizon 2020 (siehe Europäische Plattform zur LCA [27]) viel Forschungs- und Aufklärungsarbeit im Bereich der LCA geleistet. Als konkretes Beispiel lässt sich hier das vom Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München geleitete Projekt EERAdata anführen [28]. Zudem erfolgt die themenspezifische Kommunikation zu diesem Thema über weitere Kanäle wie z. B. dem EU-Portal für Energieeffizienz von Gebäuden [29]).

Die Thematik der LCA wird ebenso auf deutscher Bundesebene aufgenommen, z. B. im *Maßnahmenprogramm Nachhaltigkeit* der Bundesregierung aus dem Jahr 2015 [30]<sup>2</sup>. Sie wird von Bundesministerien und -instituten aufgegriffen und weitergedacht, z. B. durch das Umweltbundesamt [31][32], das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [33] oder das Bundesministerium für Bildung und Forschung [33]. Das wiederum mündet in Forschungsausschreibungen und letztlich in Forschungsprojekten wie dem vom Lehrstuhl ENPB mitbearbeiteten und vom Bundesministerium

<sup>1</sup> Die in diesem Kapitel durchgeführte Recherche bezieht sich sowohl auf die LCA als auch auf die LCC. Es wird der Begriff LCA als Überbegriff für die lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Berechnungen und Analysen verwendet.

<sup>2</sup> Die im weiteren Verlauf des Kapitels aufgeführten Quellenangaben führen zu den zum Thema LCA und nachhaltiges Bauen relevanten Publikationen, die nicht einzeln namentlich im Text aufgeführt werden.

für Bildung und Forschung finanzierten Forschungsprojekt *Grüne Stadt der Zukunft* [34]. Dieses behandelt unter anderem die Thematik der LCA in Wechselwirkung zu Nachverdichtungskonzepten und Grüner Infrastruktur. Die Thematik der LCA und generell des nachhaltigen Bauens wird von Landesregierungen (auch dem Bundesland Bayern [35][36]) und auf kommunaler Ebene (z. B. der Stadt München [37]) aufgegriffen und auf verschiedenste Art und Weise politisch und umsetzungsbezogen weiterbearbeitet. Forschungseinrichtungen wie das Fraunhofer Institut [38] und Planungsbüros wie Arup [39] und Ramboll [40] sowie Start Ups wie die v3sta UG [41] versuchen, sich ebenfalls in diesem Themenbereich zu platzieren.

Zusätzlich dazu gibt es internationale gebäudebezogene Zertifizierungssysteme (z. B. *LEED* (U.S. Green Building Council [42][43]) oder *BREEAM* [44]), die LCAs als elementaren Bestandteil in ihr Zertifizierungssystem implementiert haben und von großen internationalen Institutionen angeboten werden. Ebenso spielt die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) im Rahmen der Zertifizierung und der Implementierung gebäudebezogener LCAs eine immer stärker werdende Rolle auf nationaler und internationaler Ebene [45][46].

Aufbauend auf diesem internationalen und nationalen Interesse wurden Softwarelösungen und Tools erarbeitet, die sich auf die Durchführung von Gebäude-LCAs spezialisiert haben. Hierzu zählen z. B. *One Click LCA* [47], *Legep* [48], *CAALA* [49], *Tally* [50] und *eLCA* (Bauteileditor) [51]. Zudem gibt es noch LCA-Softwares, mit denen sich die LCAs jeglicher Produkte und Dienstleistungen berechnen lassen, die jedoch nicht spezifisch auf Gebäude zugeschnitten sind. Dazu gehören z. B. die Softwares *Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi)* [52], *Umberto* [53], *SimaPro* [54] und *OpenLCA* [55].

Die für die Berechnungen der LCAs benötigten Datenbanken und die darin enthaltenen Daten sind weitere Produkte, die aus dieser Problemstellung heraus entstanden sind. Als Grundlage für LCAs dienen z. B. die Datenbank der *Environmental Product Declarations (EPDs)* [56] und andere Datenbanken, die jedoch in den allermeisten Fällen kommerziell betrieben werden wie z. B. die Schweizer Datenbank *Ecoinvent* [57] oder die zu *GaBi* gehörende Datenbank [58]. Die Datenbank *Ökobaudat* [59], angeboten durch das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, stellt eine umfangreiche und vor allem kostenlose Datenbank für gebäudebezogene LCAs in Deutschland zur Verfügung. Diese Datenbank basiert zum größten Teil auf generischen Durchschnittsdatensätzen, gefolgt von Environmental Product Declarations (EPDs), die Produkthersteller zur Verfügung gestellt haben und die mithilfe der LCA-Software *GaBi* errechnet wurden.

Die genannten Softwarelösungen beziehen sich dabei immer auf die Durchführung von LCAs auf der Ebene von Einzelgebäuden. Die aufgeführten Datenbanken spiegeln zudem keine Gebäudetypologien etc. wider, die Hochrechnungen auf große Gebäudebestände ermöglichen. Die Nutzung digitaler Gebäudemodelle limitiert sich dabei maximal auf Building Information Modelling (BIM)-Modelle. Die Nutzung von 3D-Stadtmodellen findet hierbei in der Praxis noch keine Anwendung und wird auch von politischer und institutioneller Seite selten mitbedacht. Zudem beschränkt sich die LCA auf die Gebäudeebene und dabei in den allermeisten Fällen auf die Betrachtung der baukonstruktiven Elemente. Wird die TGA mitberücksichtigt, dann meistens im Rahmen von faktorbezogenen Aufschl-

gen auf die LCA-Ergebnisse. Die sich aus dieser Recherche ergebende Quintessenz unterstreicht nochmals das bereits Erwähnte und zwar, dass das Thema der LCA auf jeglichen politischen und institutionellen Ebenen Eingang findet, aber in der Praxis noch zu selten zur Anwendung kommt. Um jedoch übergeordnete stadtplanerische, energie- und emissionsbezogene sowie politische Entscheidungen, die auf nachhaltige Belange fokussiert sind, voranzutreiben, bedarf es an Konzepten zu lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Berechnungen. Diese Berechnungen müssen Analysen großer Gebäudebestände unter spezieller Berücksichtigung der TGA beinhalten.

## **2.2. Forschungsarbeiten im Themenbereich**

Vorherige Recherchen haben gezeigt, dass es bisher keine expliziten Arbeiten im Themenfeld der LCA der TGA auf der Basis großer Gebäudebestände gibt. Deshalb gliedert sich die Darstellung der Forschungsarbeiten im Themenbereich in die Themen „Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung“ (siehe Kapitel 2.2.1) und „Lebenszyklusanalyse großer Gebäudebestände“ (siehe Kapitel 2.2.2).

### **2.2.1. Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung**

Dass die Thematik der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung bisher nur punktuell bearbeitet wird, kommentiert Weißenberger [19], der mit seiner Dissertation aus dem Jahr 2016 mit dem Titel „Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergie-wohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik“ eine umfassende Arbeit in diesem Themenfeld verfasst hat, folgendermaßen: „Allgemein kann konstatiert werden, dass die Gebäudetechnik ökologisch unzureichend genau betrachtet wird; hierdurch existieren keine Verfahren bzw. Methoden, diese vereinfacht zu berücksichtigen“.

Weißenberger kommt bei seiner detaillierten Recherche bezüglich durchgeführter und laufender Forschungsarbeiten zu dieser Feststellung. Er stützt sich dabei auf Aussagen aus der Dissertation von Passer [60], in der angemerkt wird, dass keine brauchbaren Informationen und Daten zur Berechnung und Analyse der umweltbezogenen Qualität der Haustechnik in der Literatur zur Verfügung stehen. Passer sagt jedoch auch, dass diese Art umweltbezogener Bewertung nicht vernachlässigt werden darf. Zudem stützt sich Weißenberger auf eine Aussage von Paleari et al. [61], die konstatiert, dass die Anlagentechnik von Gebäuden bei der Durchführung einer LCA häufig nicht mitberücksichtigt wird, da diese deutlich komplexer ist als andere Gebäudeelemente.

Weißenberger arbeitet in seiner Dissertation weiter heraus, dass bei einer Gebäude-LCA die Gebäudetechnik einen Anteil zwischen 2 % und 26 % einnehmen kann, bezogen auf die Primärenergie und den Emissionsausstoß, wenn keine PV-Anlagen mit in die Betrachtung aufgenommen werden. Er betrachtet dabei zwei Wohn-Neubauten: ein Einfamilien- und ein Mehrfamilienhaus.

Dabei nimmt im speziell die Heizungstechnik der Gebäudetechnik einen Anteil von rund 67 % am gesamten Grauen Primärenergiebedarf ein. Beim Global Warming Potential (GWP) entfallen rund

45 % auf die Heizungstechnik. Hierbei werden hauptsächlich die Hauptkomponenten der Wärmeerzeuger als maßgebliche Treiber identifiziert. Zu den Wärmeerzeugern zählen Solar- bzw. PV-Module, Trinkwarmwasserspeicher und Wärmeübergabesysteme (Heizkörper oder Fußbodenheizung). Diese sind nämlich wiederum für 60 % bis 95 % der Grauen Energie und Grauen Emissionen der Heizungstechnik verantwortlich. Das Hinzunehmen der Heizungstechnik in die LCA kann einen großen Anteil des Grauen Energiebedarfs und der Grauen Emissionen der TGA mit abdecken. Im Rahmen dieser Dissertation wird deshalb hierauf ein besonderer Fokus gelegt.

Seit der Fertigstellung der Dissertation von Weißenberger wurden vereinzelt Studien und Forschungsarbeiten publiziert [17][36][62], die bei der Durchführung von Gebäude-LCAs die TGA oder einzelne TGA-Komponenten mitberücksichtigen. Diese Arbeiten beziehen sich jedoch ebenfalls auf einzelne Beispielgebäude und kommen zu keinen weiteren, neuen Erkenntnissen, die unter Berücksichtigung großer Gebäudebestände von elementarem Nutzen wären. Zudem ist kein Konzept bekannt, das Dimensionierungen und Berechnung der LCAs der TGA großer Gebäudebestände mit verschiedenem Baualter und unterschiedlichen Gebäudestrukturen erlaubt.

### 2.2.2. Lebenszyklusanalyse großer Gebäudebestände

Die meisten Modelle, Werkzeuge oder Methoden, die sich auf die Berechnung und Analyse großer Gebäudebestände konzentrieren, beziehen sich hauptsächlich auf die Energiebedarfsberechnung und/oder -simulation der Nutzungsphase von Gebäuden. Insofern lebenszyklusbasierte energetische und emissionsbezogene Untersuchungen möglich sind, erfassen diese lediglich einen geringen Umfang bzw. beziehen sich auf die baukonstruktiven Elemente. Im Folgenden werden die national und international bekanntesten Modelle, Werkzeuge und Tools vorgestellt und die wichtigsten Merkmale in Bezug auf die Energiebedarfsberechnung und die Emissionen hinsichtlich einer lebenszyklusbasierten Betrachtung dargestellt.

Das **Urban Modeling Interface (umi)**, entwickelt am *Sustainable Design Lab* des Massachusetts Institute of Technology (MIT) [63], stellt eine Modellierungsplattform zur Bewertung der Umwelteinflüsse von Stadtvierteln und Städten im Hinblick auf den Energiebedarf in der Nutzungsphase und auf die Graue Energie dar. Zudem werden Themen wie unter anderem die Begehbarkeit und das Tageslichtpotenzial betrachtet und simuliert. Die Plattform basiert auf der Modellierungssoftware Rhinoceros 3D [64], anhand der digitale Gebäude- und Quartiersmodelle erstellt werden können. Zudem steht für umi ein Application Programming Interface (API), also eine Programmierschnittstelle, zur Verfügung, die es erlaubt, zusätzliche Berechnungs- und Analysemodule in die Software zu integrieren. Bei den Berechnungen der Grauen Energien und Emissionen bezieht umi die Nutzungsphase sowie die baukonstruktiven Elemente mit ein. Die TGA wird jedoch nicht berücksichtigt [65][66]. Im September 2020 wurde in umi ein *GIS Importer* [67] implementiert, der es ermöglicht, 3D-Modelle im *Shape*- oder *City Geography Markup Language (CityGML)*-Format zu integrieren.

Der **City Building Energy Saver (CityBES)** [68] ist eine am Berkeley Lab programmierte web-basierte Berechnungs- und Analyseplattform, die auf die Energiemodellierung und -analyse des

Gebäudebestands von Städten fokussiert ist. CityBES nutzt CityGML-Dateien zur Darstellung und zum Austausch von 3D-Stadtmodellen. CityBES setzt primär auf die Simulation des Energiebedarfs der Nutzungsphase und der sich daraus ergebenden Emissionen der betrachteten Gebäude [69][70]. Es ermöglicht zudem die Simulation und Analyse von Gebäudebeständen gesamter Städte [71][72]. Die Berechnung von LCAs ist jedoch nicht in CityBES integriert.

Das an der Stanford University erstellte Werkzeug bzw. bearbeitete Projekt **Data-driven Urban Energy Simulation (DUE-S)** [73] ermöglicht die Simulation und Analyse des Energiebedarfs mehrerer Gebäude im urbanen Kontext. DUE-S bündelt dabei die gebäude- und energiebezogenen Datenströme anhand von maschinellem Lernen und verbessert dadurch die klassische Energiesimulation, die sich auf Einzelgebäude bzw. Gebäudekomplexe konzentriert. DUE-S bezieht sich dabei jedoch auch auf die Nutzungsphase der Gebäude, berücksichtigt aber keine lebenszyklusbasierten Energiebedarfe und Emissionen.

**CitySim** [74] ist ein an der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) entworfene Software, die Energieplanern und Energieplanerinnen und politischen Entscheidungsträgern und Entscheidungsträgerinnen als Bemessungsrundlage dienen soll, um den Verbrauch an nicht-erneuerbaren Energiequellen und die damit verbundenen Emissionen zu reduzieren [75][76]. Hierbei können mehrere Hundert 3D-Gebäudemodelle (XML-Format) auf Stadtquartiersebene analysiert werden, wobei verschiedene Nutzerspezifika und Energiesysteme berücksichtigt werden können. Methoden zur Berücksichtigung und Durchführung von LCAs sind jedoch nicht integriert.

Der **City Energy Analyst (CEA)** [77] ist ein an der ETH Zürich erarbeitetes Tool, das erlaubt, schnelle Vorhersagen des Energiebedarfs und des Potenzials Erneuerbarer Energien von hunderten Gebäuden zu errechnen. Zudem sind detaillierte Abschätzungen zum Einsatz klimaneutraler Technologien im städtischen Kontext möglich. Der CEA ermöglicht Abschätzungen des Potenzials klimaneutraler Energieversorgung im Entscheidungsraum zwischen technischen und ökonomischen Lösungen. Der Fokus liegt dabei primär auf dem Energiebedarf in der Nutzungsphase der Gebäude. Zudem ist ein LCA-Modul integriert, das sich an den Benchmarks der ökologischen Nachhaltigkeit der 2000-Watt-Gesellschaft orientiert [78]. Hierbei werden CO<sub>2</sub>-Emissionen in Bezug auf die Errichtung, den Betrieb und den Rückbau von Gebäuden betrachtet [79]. Der Fokus liegt auf den baukonstruktiven Gebäudeelementen und auf Photovoltaik (PV)-Anlagen [80].

**TEASER** [81] wurde an der RWTH Aachen entwickelt und ist eine Software, die Gebäudesimulationen hinsichtlich einer großen Anzahl von Gebäuden ermöglicht. Hierbei können thermische Gebäudesimulationen für mehrere Tausend Gebäude durchgeführt werden [82]. Dabei stützt sich TEASER auf Gebäudetypologien, die so aufbereitet sind, dass deren Simulation anhand weniger Input-Parameter in Modelica [83] möglich ist. Zudem ermöglicht TEASER den Import von CityGML-Dateien, um gebäudebezogene Sanierungen und energiebezogene Lastkurven zu berechnen. Ein spezifisches LCA-Modul mit Berücksichtigung der TGA ist jedoch nicht implementiert.

Der **District Energy Concept Adviser (DistrictECA)** ist ein Energiekonzept-Beratungstool auf Stadtquartiersebene, das dazu dient, Stadtplaner/-innen und weitere Interessenvertreter/-innen bei der Planung von Energiekonzepten auf Stadtquartiersebene zu unterstützen [84]. Hierbei können verschiedenste Sanierungsstrategien bezüglich der zentralen oder dezentralen (gebäudebezogenen) Energieversorgung untersucht und analysiert werden. Der DistrictECA wurde von der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen der „EnEff:Stadt“ Forschungsinitiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie entworfen und basiert auf der Norm DIN V 18599 [85], die zur energetischen Bewertung von Gebäuden herangezogen werden kann. Auch hier können bei der Berechnung verschiedene Energiesysteme berücksichtigt werden, um die Energieeffizienz der Wohn- und Nichtwohngebäude des betrachteten Stadtquartiers zu bewerten. Ein Modul zur Berechnung der LCA ist nicht vorgesehen.

Das **Gebäudemodell (GEMOD)** [86] des Instituts für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg (ifeu) ist darauf spezialisiert, den gebäudebezogenen Energiebedarf für Heizen und Trinkwarmwasser zu berechnen. Diesbezüglich können verschiedenste Entwicklungsszenarien berücksichtigt und analysiert werden, wie das Nutzerverhalten, technische Entwicklungen und politische Instrumente. Das Modell definiert 234 verschiedene Gebäudetypen für die Berechnungen. Zudem wird die Nutzungsdauer von TGA-Komponenten mitbestimmt und es werden Dämmstoffstärken anhand von U-Werten dargestellt. Der Ersatz konventioneller Wärmeerzeuger durch Erneuerbare Energien ist zusätzlich mitberücksichtigt [87]. Ein LCA-Modul ist in GEMOD nicht integriert.

**SimStadt** bzw. **SimStadt2** [88] ist eine an der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) im Rahmen des Forschungsprojekts „SimStadt“ konzipierte Software, die es ermöglicht Energieanalysen auf der Basis einzelner Gebäude, ganzer Stadtquartiere, Städte oder Regionen durchzuführen. Hierbei können sowohl Heizwärmebedarfe als auch PV-Potenzialanalysen und Gebäudesanierungs- und erneuerbare Energieversorgungsszenarien berechnet werden [89]. Als Grundlage werden von SimStadt hierfür CityGML-Dateien genutzt [90]. In SimStadt ist zudem ein Modul zur überschlägigen Berechnung LCA baukonstruktiver Elemente implementiert [91]. TGA-Komponenten wurden hingegen nicht lebenszyklusbasiert untersucht. Die Berechnungen basieren auf der vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) erarbeiteten deutschen Wohngebäudetypologie, die im Rahmen der Forschungsprojekte TABULA und EPISCOPE [92] erarbeitet wurden und auf LCA-Datensätzen beruhen die mit der LCA-Software Umberto [53] in Kombination mit der Ecoinvent-Datenbank [57] errechnet wurden. Im Rahmen dieser Berechnungen wurde zudem untersucht, ob eine Sanierung oder ein Abriss und Neubau von Gebäuden auf Stadtquartiersebene aus lebenszyklusbasierter Perspektive besser zu bewerten ist [93]. Eine Sanierung hat sich im Rahmen dieser Untersuchung doch als die bessere Variante herausgestellt.

Die **Dissertation von Kaden** [94], die am Lehrstuhl für Geoinformatik an der Technischen Universität München mit dem Titel „Berechnung der Energiebedarfe von Wohngebäuden und Modellierung energiebezogener Kennwerte auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle“ erstellt wurde, beschäftigt sich ebenfalls mit dem Thema der Energiebedarfsberechnung von Wohngebäuden auf der Grundlage von 3D-Stadtmodellen (CityGML-Format). Sie stützt sich wie beim DistrictECA auf die Norm DIN V 18599 [85]. Die Methode kann dadurch auf eine große Anzahl an Wohngebäuden angewendet

werden. Eine lebenszyklusbasierte Betrachtung wurde nicht aufgenommen, sondern der Fokus wurde klar auf die Berechnung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase der Gebäude gelegt.

Der **Urban Strategy Playground (USP)** [95][96], erstellt am Lehrstuhl für Architekturinformatik an der Technischen Universität München, ist ausgerichtet auf die Erarbeitung von Methoden zur Ermittlung, Planung und Analyse von Nachverdichtungspotenzialen und -strategien auf Stadtquartiersebene. Hierbei können ebenfalls 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format als Grundlage genutzt werden [97]. Neben einer Vielzahl an Erweiterungen wurde im Jahr 2019 der USP im Rahmen der Masterarbeit von Fellner [98] durch ein „Urban Energy Design Tool“ erweitert, das eine „energierrelevante Betrachtung von Gebäuden für die Entscheidungsunterstützung der Stadtentwicklung“ anbietet. Die Energiebedarfsberechnung basiert auch hier auf der Norm DIN V 18599 [85]. Eine lebenszyklusbasierte Betrachtung ist im USP bislang nicht möglich.

### 2.3. Fazit, Stand der Forschung und Technik

Der beschriebene Stand der Forschung und Technik im Bereich der LCA im Gebäudebereich mit Augenmerk auf die TGA sowie der LCA großer Gebäudebestände lässt folgende Schlüsse zu:

- Die Thematik der LCA ist ein in nationalen, internationalen sowie kommunal-politischen und institutionellen Ebenen diskutiertes Thema, mit bisher jedoch wenig Anwendung in der Praxis.
- Wenn LCAs auf Gebäudeebene berechnet werden, wird die TGA meistens nicht mitberücksichtigt; wenn doch, dann in den meisten Fällen in Form eines Aufschlagsfaktors.
- Zur Analyse und Berechnung der Energiebedarfe und teilweise auch zur Berechnung der daraus resultierenden Emissionen existieren bereits auf Stadtquartiersebene bzw. Stadtebene verschiedenste Werkzeuge und Tools. Diese können unterschiedliche Energiesysteme und Entwicklungsszenarien abbilden. Primär sind sie jedoch auf die Nutzungsphase der Gebäude ausgerichtet. Eine Kostenanalyse wird bislang ebenfalls in nur wenigen Fällen durchgeführt. 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format stellen sich als eine fundierte Grundlage für gebäudebezogene Berechnungen auf der Basis großer Gebäudebestände dar.

Es ist daher erforderlich, eine Methode zu erarbeiten, die sowohl den Energiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen und Kosten in der Nutzungsphase von Gebäuden berechnet als auch die Grauen Energien, Emissionen und Kosten in den Lebenszyklusphasen vor und nach der Nutzungsphase in den Blick nimmt. Die Methode soll die Betrachtung verschiedener Energiesysteme und die Durchführung von Entwicklungsszenarien erlauben und Themen wie die Emissionsbepreisung aufgreifen. Der Fokus sollte dabei auf Wohngebäude gerichtet sein, da diese rund 73 % an den über 30 % des weltweiten Endenergiebedarfs und rund 43 % an den 40 % der weltweiten direkten und indirekten Emissionen im Gebäudesektor (inklusive der Bauindustrie) ausmachen [2]. Für eine automatisierte Berechnung großer Gebäudebestände soll auf 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format zurückgegriffen werden. Aufbauend auf diesem Fazit und diesen Erkenntnissen wird im folgenden Teil II die Methodenentwicklung beschrieben.

**Kurzfassung des Standes der Forschung und Technik:**

- Die LCA im Gebäudebereich ist auf internationalen, nationalen und kommunalen politischen und institutionellen Ebenen im Gespräch. Sie findet Anwendung in der Wissenschaft, jedoch wenig in der Planungs- und Baupraxis.
- Auf der Ebene von Einzelgebäuden gibt es bereits umfangreiche Methoden, Berechnungswerkzeuge bzw. -software sowie publizierte Forschungsarbeiten und Studien zu Lebenszyklusanalysen, jedoch nicht in Bezug auf große Gebäudebestände.
- Es existieren zwar Werkzeuge und Software zur Durchführung von unter anderem Energiebedarfsberechnungen auf Basis großer Gebäudebestände (3D-Stadtmodelle im CityGML-Standard), allerdings beinhalten diese nur in Ausnahmefällen Module zur Berechnung der LCA. Das LCC findet bislang in keinem Werkzeug bzw. keiner Software Anwendung.
- Werden LCAs berechnet, dann beziehen sich diese lediglich auf die baukonstruktiven Gebäudeelemente, jedoch nicht auf die TGA.
- Dabei kann die TGA über den Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg einen Anteil von 2 % bis 26 % am gesamten Primärenergiebedarf und Emissionsausstoß einnehmen [19].
- Es ist daher erforderlich, eine Methode zu erarbeiten, die auf Basis großer Gebäudebestände sowohl den Energiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen und Kosten in der Nutzungsphase von Gebäuden berechnet als auch die Grauen Energien, Emissionen und Kosten in den Lebenszyklusphasen vor und nach der Nutzungsphase bilanziert und analysiert.

## **Teil II**

# **Forschungsansatz und Methodenentwicklung**



### **3. Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Gebäudebestände**

Die entwickelte Methode dient als generischer Ansatz zur Berechnung der lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bilanz von Gebäuden und deren Technischer Gebäudeausrüstung (TGA). Der generische Ansatz ermöglicht, dass die Methode auf beliebig große Gebäudebestände (einzelne Gebäude, Stadtquartiere, Städte usw.) angewendet werden kann. Er wird gewählt, da in den digitalen 3D-Stadtmodellen in Deutschland nur begrenzt gebäudespezifische Informationen wie z. B. das Baualter oder die Nutzungsart und, noch begrenzter, Informationen zur jeweiligen TGA enthalten sind. Der Fokus bei der Datengenerierung in Bezug auf 3D-Stadtmodelle liegt von Seiten der Vermessungsämter auf der Erarbeitung eines deutschlandweit flächendeckenden Modells, das die geometrischen Informationen und Kubaturen der Gebäude in einem einheitlichen Standard abbildet [99][100]. Weiterführende gebäudespezifische Informationen (z. B. Nutzungsart, Baujahr, verbautes Energiesystem, Sanierungsstand, Energieverbrauch) liegen teilweise auf kommunaler Ebene oder bei den Energieversorgern vor, wie Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts „Grüne Stadt der Zukunft“ [34] für das Fallbeispiel München gezeigt haben. Diese Daten werden von keinem zentralen System gebäudespezifisch erfasst, verarbeitet und für weiterführende Berechnungen und Analysen zur Verfügung gestellt. Daher wird die Methode so konzipiert, dass sie mit einer geringen Informationsdichte in Form von Input-Informationen (Gebäudegeometrie, -nutzungsart und -baujahr) plausible Ergebnisse erzielt.

Die entwickelte Methode wird programmierseitig umgesetzt und mündet in einem Softwaretool, das ermöglicht, die Methode iterativ auf eine beliebig große Anzahl von Gebäuden anzuwenden. Zudem erlaubt das Tool die Durchführung und Berechnung verschiedener Entwicklungsszenarien (siehe Abbildung 3.1 auf Seite 22). Das Softwaretool wird „urbi+“ genannt, das als Abkürzung für „urban improvement“ steht. Das „+“ signalisiert den offenen Ansatz, der bei der Entwicklung verfolgt wurde. Dieser Ansatz ermöglicht es, weitere Bewertungs- und Analysehorizonte in fortführenden Arbeiten in urbi+ zu integrieren.

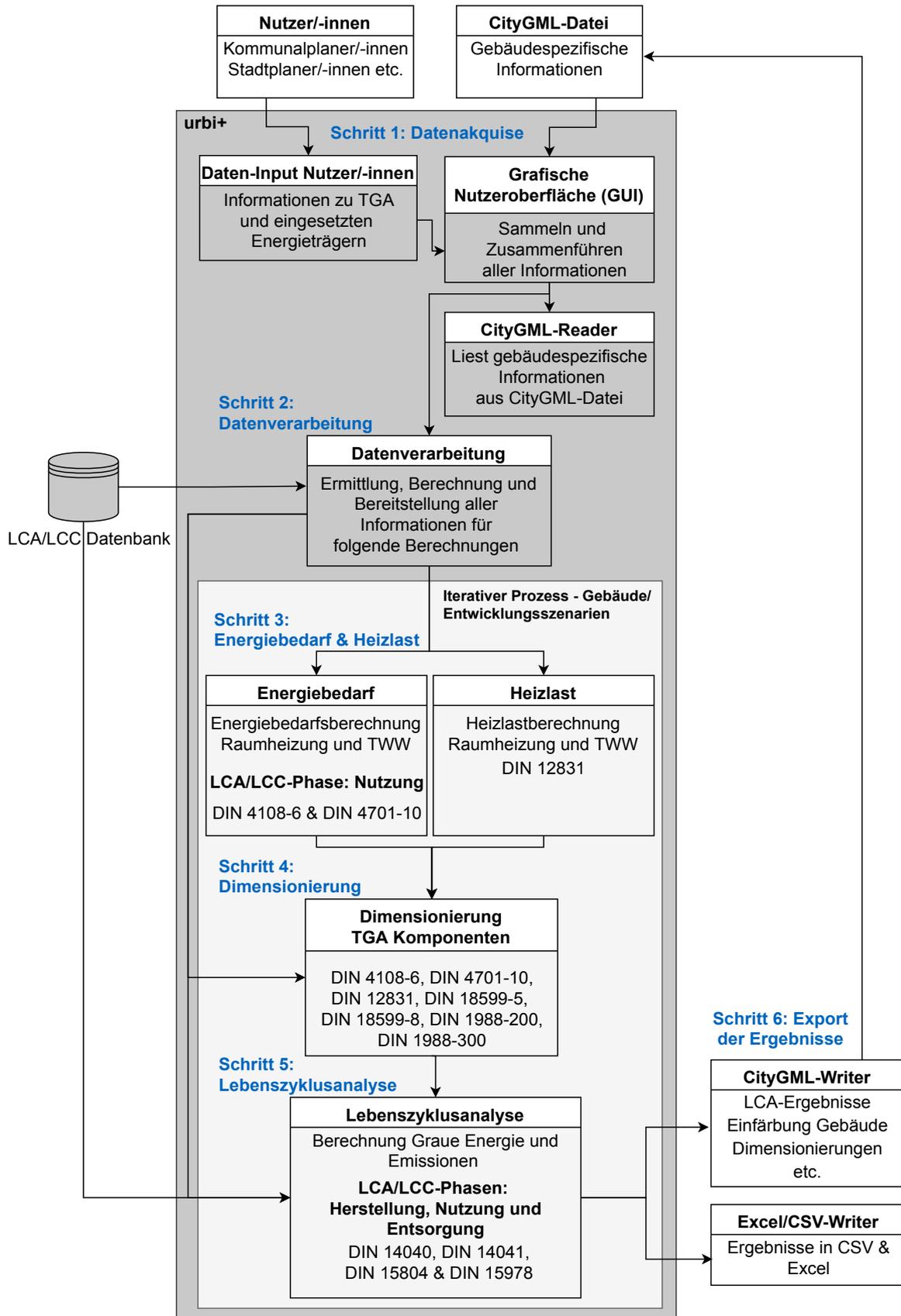


Abbildung 3.1.: Definition der methodischen Schritte in urbi+ (eigene Abbildung)

Die Berechnung der Lebenszyklusanalyse (LCA) und Lebenszykluskostenanalyse (LCC) der TGA lässt sich in fünf methodische Schritte bzw. thematische Bereiche aufteilen und folgt einem modularen Aufbau (siehe Abbildung 3.1 auf Seite 22), der in dieser Struktur in urbi+ umgesetzt ist:

- **Schritt 1: Datenakquise:** Das Auslesen und Verarbeiten der benötigten Daten und Informationen aus dem semantischen 3D-Stadtmodell (City Geography Markup Language (CityGML)-Datei) erfolgt über den CityGML-Reader. Die Bereitstellung der Informationen zu Energiesystemen wie deren Lebensdauer etc. wird von urbi+ durch den Daten-Input der Nutzer/-innen über die Graphische Nutzeroberfläche (GUI) ermöglicht. Durch das Auslesen und Verarbeiten der Daten werden alle für die Berechnung notwendigen Informationen gesammelt und zusammengeführt.
- **Schritt 2: Datenverarbeitung:** Anhand der zusammengeführten Daten werden bereits erste Vorberechnungen durchgeführt (die Gebäudevolumen- und Fensterflächenberechnung, die Flächenberechnung weiterer Gebäudekomponenten wie z. B. von Außenwänden oder die Zuweisung der Baualtersklasse). Für diese Berechnungen werden bereits Daten aus der LCA-Datenbank benötigt, z. B. der generische Fensterflächenanteil je Gebäudetyp und Baujahr des Gebäudes (siehe Kapitel 3.2, 3.3.2, 3.3.3 und 3.3.4). Die aus den Vorberechnungen resultierenden Ergebnisse sowie die zusammengestellten Daten aus Schritt 1 werden für weiterführende Berechnungen bereitgestellt.
- **Schritt 3: Energiebedarf und Heizlast:** In diesem Schritt erfolgt die normenbasierte Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs sowie der Norm-Heizlast für Raumwärme und Trinkwarmwasser (siehe Kapitel 3.2, 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 und 3.4.4).
- **Schritt 4: Dimensionierung der TGA-Komponenten:** Aufbauend auf den Werten der Energiebedarfs- und Heizlastberechnung findet in diesem Schritt die Auslegung der betrachteten TGA-Komponenten statt (siehe Kapitel 3.5).
- **Schritt 5: Lebenszyklusanalyse:** Hier wird nicht nur die LCA und LCC der TGA, sondern auch die Berechnung der Entwicklungsszenarien durchgeführt (siehe Kapitel 3.6 und 3.8). Bei der Szenarienbetrachtung muss zwischen der Berechnung und Analyse von Einzelgebäuden und der von großen Gebäudebeständen differenziert werden. In Bezug auf große Gebäudebestände ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, wie z. B. die Erstellung einer Sanierungsreihenfolge.
- **Schritt 6: Export der Ergebnisse:** Der letzte Schritt ist der Export der Ergebnisse in Excel/CSV-Format (Excel/CSV-Writer) und die Implementierung der Ergebnisse in die Ausgangs-CityGML-Datei (CityGML-Writer) (siehe Kapitel 3.9). Darauf baut die weiterführende Datenvisualisierung und -auswertung auf.

Die Methodenentwicklung und urbi+ basieren auf Grundlagen und Annahmen, die zum Verständnis vorab definiert und erklärt werden. Grundlagen bilden z. B. verschiedene Application Programming Interfaces (APIs), also Programmierschnittstellen, 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format und

unterschiedliche deutsche Normen. Es werden Annahmen benötigt, um Datenlücken in den CityGML-Dateien zu schließen. Hierzu zählen bspw. die generischen Fensterflächenanteile je Gebäudetyp (Einfamilien-/Mehrfamilienhaus) und Baujahr.

Die im Verlauf dieses Kapitels beschriebene Methode wird in Java (Java 11) [101] implementiert und resultiert im Software-Tool urbi+. Somit stellt urbi+ in Teilen die praktische Umsetzung der entwickelten Methode dar. Die einzelnen methodischen Schritte werden anhand der in urbi+ umgesetzten und einprogrammierten Logik erklärt.

### 3.1. Grundlagen der Methodenentwicklung

Bei der Erstellung bzw. Interpretation von LCA-Ergebnissen muss bedacht werden, dass diese keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben können. König et al. [102] betonen, dass LCAs „...jedoch eine Idee geben [sollen], welchen Einfluss verschiedene Baustoffe auf die Umwelt haben“. Eine LCA ist ein von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusster Berechnungs- und Analyseansatz, der es momentan noch nicht erlaubt, Ressourcenbedarfe und Umwelteinflüsse projektspezifisch realitätsnah abzubilden. Die in LCA-Datenbanken enthaltenen Datensätze bilden Momentanaufnahmen oder Durchschnittsdatsätze von produkt- und dienstleistungsbezogenen Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsprozessen ab. Diese können aufgrund technischer und politischer Änderungen dynamischen Schwankungen unterliegen, die in den Datensätzen nicht abgebildet werden. Zudem stehen in den allermeisten Fällen nicht zu allen Lebenszyklusphasen von Produkten Daten zur Verfügung. Dennoch wird bei der Durchführung einer LCA durch die Wahl der LCA-Datsätze versucht, sich dem Realzustand bestmöglich zu nähern. Die im Rahmen einer LCA errechneten Ergebnisse ermöglichen den Vergleich verschiedener Dienstleistungen und Produkte untereinander und können Tendenzen hin zu energetischen, emissions- und kostenbezogenen sinnvolleren Varianten aufzeigen. Aus diesem Grund sollten sich auf LCA-Ergebnisse fokussierte Interpretationen nicht auf die Auslegung und Erklärung von Werten mit mehreren Nachkommastellen konzentrieren, sondern auf den Vergleich verschiedener Untersuchungsvarianten untereinander. So können LCAs energetische, emissions- und kostenbezogene Optimierungspotenziale aufzeigen.

Die entwickelte Methode dient dazu, eine beliebige Anzahl an Gebäuden anhand ihrer lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bilanz zu bewerten und dabei ein spezielles Augenmerk auf ausgewählte TGA-Komponenten zu legen. Hierdurch können nicht nur der Status quo des betrachteten Gebäudes bzw. Gebäudebestandes, sondern ebenso auch dafür definierte Sanierungsstrategien oder Entwicklungsszenarien bewertet und miteinander verglichen werden. Die erlangten Ergebnisse dienen der Entscheidungsfindung und -unterstützung in frühen Planungsphasen auf stadtplanerischer und politischer Ebene. Dabei werden mögliche zukünftige energetische, emissions- und kostenbezogene Effekte prognostiziert.

Der entwickelte methodische Ansatz für die LCA der TGA basiert auf verschiedensten Application Programming Interfaces (API), Normen und Methoden, die im Folgenden beschrieben und für den spezifischen Anwendungsfall definiert werden (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.2). Zudem werden die für

die Basis der Berechnungen und Analysen verwendeten 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format näher erläutert und deren konkreter Nutzen als Datenquelle für die Berechnungen und Analysen dargestellt (siehe Kapitel 3.3.1). Die 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format stellen zwar eine Grundlage der Methodenentwicklung dar, sind jedoch vielmehr eine Datenquelle, die Input-Informationen für die Berechnungen enthält. Die in den 3D-Stadtmodellen enthaltenen Informationen sind zwischen unterschiedlichen Gebäudebeständen variierende Parameter, die sich stark voneinander unterscheiden können. Eine detaillierte Beschreibung der 3D-Stadtmodelle ist in Kapitel 3.3.1 aufgeführt.

### 3.1.1. Programmierschnittstellen und Softwarelösungen

Folgende Softwarelösungen und Programmierschnittstellen werden zur Methodenentwicklung und für deren Umsetzung in urbi+ herangezogen:

- citygml4j
- Voluminator 2.0
- SharedWallSurfaces
- 3D City Database (3DCityDB)
- 3DCityDB Importer/Exporter
- 3DCityDB Web-Map-Viewer

Alle hier aufgeführten Softwarelösungen und Programmierschnittstellen wurden am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München entwickelt.

**citygml4j** ist eine „Open-Source“ API, die eine effiziente Arbeit mit CityGML-Dateien in Java [101] ermöglicht. Die API wurde von Nagel [103] erstellt. Citygml4j erlaubt unter anderem, Daten aus CityGML-Dateien zu lesen, diese zu verarbeiten und dann wieder zurück in CityGML-Dateien zu schreiben. Citygml4j erleichtert die Entwicklung CityGML-fähiger Softwareanwendungen und die Nutzung von CityGML-Dateien in Java-basierten Programmierumgebungen. Citygml4j ist eine frei verfügbare Software, die im Rahmen der Entwicklung von urbi+ als externe API eingebunden wird [104].

Der **Voluminator 2.0**, programmiert von Sindram [105], schafft die Möglichkeit einer Berechnung des Volumens von Gebäuden auf der Basis von 3D-Stadtmodellen (CityGML). Grundlage für den Voluminator 2.0 ist eine Methode, die zur Berechnung des Volumens einen Rahmen um das Gebäude definiert, der in regelmäßige Raster von Voxeln unterteilt wird. Diese Voxel werden darauf getestet, ob sie sich innerhalb oder außerhalb eines Gebäudes befinden. Der Voluminator 2.0 wird im Rahmen von urbi+ als bestehendes Tool eingefügt und befähigt zur Berechnung der Gebäudevolumen eines zu analysierenden 3D-Stadtmodells.

Das Tool **SharedWallSurface-Calculator** ermöglicht die Berechnung sich überschneidender Wandflächen mehrerer Gebäude. Die dafür verwendete Methode findet bereits in der Dissertation von

Kaden [94] Anwendung und wurde ebenfalls von Sindram entwickelt. Das Tool identifiziert sich überschneidende Polygone und berechnet darauf aufbauend deren Überschneidungsflächen. In urbi+ wird der SharedWallSurface-Calculator zur Berechnung der Überschneidungsflächen von Gebäudewänden verwendet. Teilen sich zwei Gebäude eine Wandfläche, dann ergibt sich ein anderer Dämmstandard als bei einer Wand gegen Außenluft. Deshalb werden im Zuge der Berechnungen unterschiedliche Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) und Wärmeverluste angesetzt.

Die **3D City Database (3DCityDB)** ist ein „kostenloses Open-Source-Paket, bestehend aus einem Datenbankschema und weiteren Softwaretools zum Importieren und Exportieren, Verwalten, Analysieren und Visualisieren virtueller 3D-Stadtmodelle nach dem CityGML-Standard“ [106][107]. Das Datenbankschema resultiert aus der Übertragung des CityGML-Datenmodells in eine Datenbanksprache (Structured Query Language (SQL)). Die 3DCityDB ermöglicht es, umfangreiche Modelle in mehreren Detailstufen zu verarbeiten. Diese Modelle können aus Millionen von 3D-Objekten mit Hunderten von Millionen an Geometrien und Texturbildern bestehen.

Im Rahmen der in dieser Dissertation entwickelten Methode wird mithilfe des **3DCityDB-Importer/Exporters** [108] das Importieren und Exportieren von 3D-Stadtmodelldaten in das erwähnte Datenbankschema ermöglicht. Die durch urbi+ berechneten Ergebnisse, die mithilfe von citygml4j in die CityGML-Datei geschrieben wurden, werden aus den jeweiligen CityGML-Dateien gelesen und in das 3DCityDB-Datenbankschema importiert. Damit sorgt der 3DCityDB-Importer/Exporter für den Import von CityGML-Modellen in das Datenbankschema, den Export von Daten in Form von CityGML-Dateien und den Export von Datenformaten zur visuellen Darstellung von Ergebnissen. Visuelle Darstellungen können z. B. Texturen zur Einfärbung von Gebäudekomponenten oder der Export von Spreadsheets zur Darstellung alphanumerischer gebäudespezifischer Informationen sein.

Die visuelle Darstellung des 3D-Stadtmodells inklusive der gebäudespezifischen numerischen Informationen (z. B. zur Heizlast eines jeden Gebäudes) und die spezifische Einfärbung der Gebäudekomponenten wird durch den **3DCityDB Web-Map-Viewer** [109] erlaubt. Der 3DCityDB Web-Map-Viewer ist eine webbasierte Visualisierungssoftware für die leistungsstarke 3D-Visualisierung beliebig großer semantischer 3D-Stadtmodelle, der 3D-Grafikinhalte ohne zusätzliche Erweiterungen darstellen kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird der 3DCityDB Web-Map-Viewer zur Visualisierung der errechneten Ergebnisse herangezogen.

Die beschriebenen Softwarelösungen bieten eine fundierte Grundlage für die Entwicklung von urbi+ und zur Visualisierung der Ergebnisse. Diese können unmittelbar mit den in urbi+ implementierten Berechnungs- und Analysemodulen verknüpft werden.

### 3.1.2. Methoden und Normen als Grundlage

Die Methodenentwicklung der Dissertation schließt die folgenden Normen als Grundlage mit ein und baut auf diesen auf:

- DIN EN 12831-1:2017-09
- DIN EN 12831-3:2017-09
- DIN V 4108-6:2003-06
- DIN V 4701-10:2003-08
- DIN EN ISO 14040:2009-11
- DIN EN ISO 14044:2018-05
- DIN EN 15978:2012-10

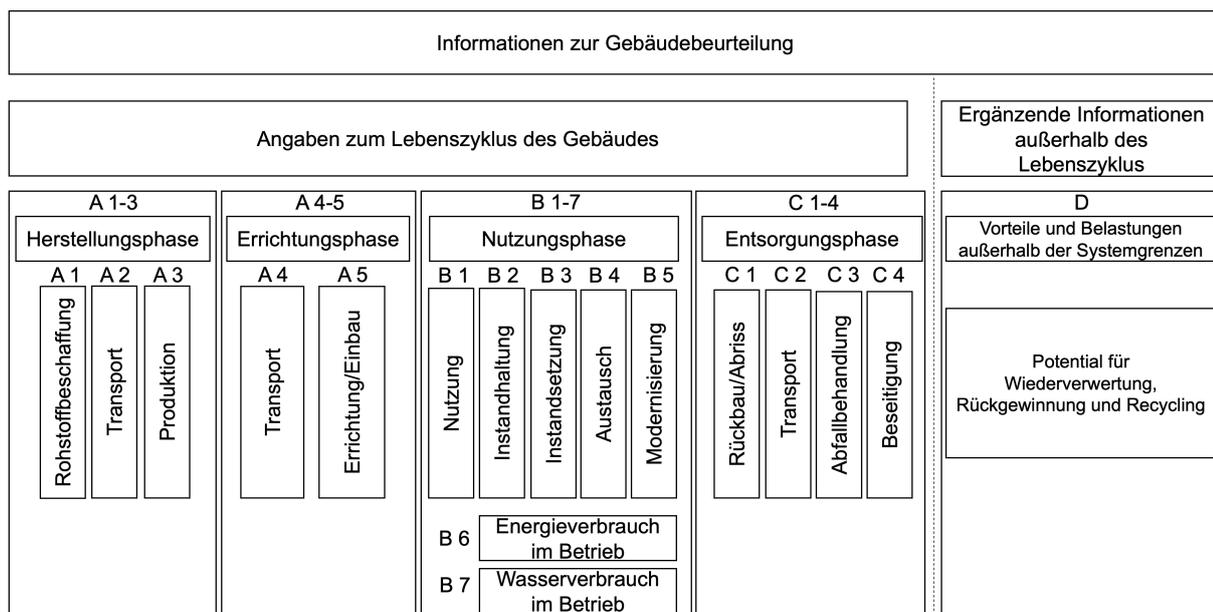
Bei der Methodenentwicklung wurde auf deutsche Normen zurückgegriffen, da diese Normen eine detaillierte, einheitliche und konsistente Grundlage für die angestrebten Berechnungen darstellen. Eine Vermischung verschiedener internationaler und nationaler Berechnungsweisen, -standards und Normen würde dem widersprechen. Das verleiht der Methode vermeintlich die Limitierung auf Deutschland, jedoch wird die spätere Validierung der Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs zeigen, dass jegliche Modelle zur Energiebedarfsberechnung die gleichen bauphysikalischen Grundformeln und Berechnungen verwenden (siehe Kapitel 4). In südlichen und tropischen Regionen sind aber oftmals keine Wärmeerzeuger, sondern nur Klimageräte in den Gebäuden verbaut. Der Heizwärmebedarf spielt somit in diesen Ländern nahezu keine Rolle. Um die Methode auch auf diese Gebiete zu erweitern, muss die Integration weiterer Betrachtungs-, Berechnungs- und Analysehorizonte erfolgen (siehe Kapitel 7).

Die Methode zur Berechnung der Raumheizlast beruht auf der Norm DIN EN 12831-1:2017-09 [110] mit dem Titel „Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast“. DIN EN 12831-3:2017-09 [111] mit dem Titelzusatz „Teil 3: Trinkwassererwärmungsanlagen, Heizlast und Bedarfsbestimmung“ bezieht sich auf die Berechnung der Heizlast für die Trinkwarmwassererwärmung. Die aus der Anwendung der beiden Normen resultierenden Ergebnisse dienen als Ausgangswerte für die Auslesung und Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten. Das Berechnungsverfahren basiert auf einer statischen Berechnung. Es werden deshalb keine Nutzerprofile in Bezug auf Anwesenheitszeiten, Jahrestemperaturverläufe oder ein Mehr-Zonen-Modell bei der Berechnung berücksichtigt. Die Herangehensweise bei der Methodenentwicklung wird in Kapitel 3.4.4 erläutert.

Die gebäudespezifische Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs erfolgt analog zu DIN V 4108-6:2003-06 [112] mit dem Titel „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs“. Das in dieser Norm beschriebene Verfahren darf nach Deutscher Energieeinsparverordnung (EnEV) [113]

auf Wohngebäude angewendet werden. Zusätzlich dazu wird die DIN V 4701-10:2003-08 [114] mit dem Titel „Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung“ für die Ermittlung energiesystemseitiger Parameter wie z. B. der Erzeugeraufwandszahl oder von Hilfsenergien herangezogen. Die in den genannten Normen dargestellten Berechnungsweisen basieren auf einer statischen Berechnung. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Ein-Zonen-Modell für alle Berechnungen angenommen. Das bedeutet, dass das gesamte zu untersuchende Gebäude als eine thermische Zone angenommen wird. Auch für diese Normen wird die Herangehensweise in Kapitel 3.4.1 näher erklärt.

Die Norm DIN EN ISO 14040:2009-11 [115] beschreibt zusammen mit der Norm DIN EN ISO 14044:2018-05 [116] die Grundlage zur Durchführung einer LCA. DIN EN ISO 14040:2009-11 thematisiert die Grundsätze und Rahmenbedingungen der LCA. DIN EN ISO 14044:2018-05 nennt die Anforderungen an LCAs und gibt eine Anleitung zu deren Durchführung. Darauf aufbauend beschreibt die DIN EN 15978:2012-10 [10] die Berechnungsmethode zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Die Norm erläutert dabei die einzelnen zu betrachtenden Lebenszyklusphasen eines Gebäudes (siehe Abbildung 3.2), die analog als Definition der Lebenszyklusphasen im Rahmen der entwickelten Methode berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3).



**Abbildung 3.2.:** Definition der Lebenszyklusphasen nach der DIN EN 15978:2012-10 (Quelle: [10])

### 3.2. Annahmen zur Methodenentwicklung

Die Methodenentwicklung basiert auf folgenden Annahmen, die für das Gesamtkonzept der Dissertation und die Berechnungsverfahren gültig sind:

Der Fokus der Methodenentwicklung liegt auf **Wohngebäuden** (siehe Kapitel 2.2.2). Für die LCA von Nichtwohngebäuden inklusive deren Energiebedarfsberechnung sind gebäudespezifische Informationen nötig, die bislang nicht in 3D-Stadtmodellen integriert und auch nicht über Typologien abgebildet werden können. Dies kann zu Unsicherheiten bei der Berechnung großer Gebäudebestände führen, worauf in Kapitel 2.1 näher eingegangen wird.

Die energetische und emissionsbezogene Analyse der Nutzungsphase von Wohngebäuden bezieht sich auf die Untersuchung des Energieverbrauchs für die Raumheizung und das Trinkwarmwasser (TWW). Hierunter fallen in Deutschland laut Deutscher Energieagentur (dena) [117] rund 98 % des gebäudebezogenen Energiebetrags und der daraus resultierenden Emissionen. Für die Beleuchtung werden lediglich 2 % des Energieverbrauchs verzeichnet. Der Einfluss von Kühlenergie ist derzeit im Wohngebäudebereich in Nordeuropa noch nicht relevant und wird deshalb in der Methode ausgeklammert [117]. Das kann sich im Zuge des Klimawandels in den kommenden Jahren ändern.

Jedem zu analysierenden Wohngebäude wird je nach Baujahr eine **Baualtersklasse** zugewiesen (siehe Tabelle A.1, Anhang A, Seite 249). Die Einteilung in eine Baualtersklasse ermöglicht z. B. die Zuweisung von U-Werten für die Heizlast- und Energiebedarfsberechnung, die spezifisch je Baualtersklasse in der LCA- und LCC-Datenbank hinterlegt sind (siehe Abbildung 3.1 auf Seite 22). Die baualtersklassenspezifischen **U-Werte** sind im Anhang A (siehe Tabellen A.2 und A.3, Seiten 249 und 250) aufgeführt. Sie dienen zu der Berechnung des Status quo des betrachteten Gebäudes. Zur Berechnung der Entwicklungsszenarien sind standardmäßig U-Werte hinterlegt, die zum einen eine Sanierung auf den KfW55-Standard [118] und zum anderen eine Sanierung auf den Passivhausstandard abbilden (siehe Tabelle A.4, Anhang A, Seite 250). Grundsätzlich können alle U-Werte sowohl baualtersklassenspezifisch als auch für die Entwicklungsszenarien frei über die GUI von urbi+ für jede Berechnung und Analyse neu definiert werden.

Die Anzahl der Stockwerke eines Gebäudes wird aus dem jeweiligen 3D-Stadtmodell ermittelt. Wenn diese Information nicht als vordefinierter Wert zur Verfügung steht oder wenn die Information zwar zur Verfügung steht, sich aber Deckenhöhen über 4,5 m und unter 2,5 m ergeben, dann wird die Gebäudehöhe durch 3 m geteilt. Hieraus ergibt sich eine für Wohngebäude vertretbare durchschnittliche Anzahl an Stockwerken in Bezug auf die Geschosshöhe.

Die Berechnung der **Nutz- bzw. Wohnfläche**  $A_N$  [m<sup>2</sup>] erfolgt anhand der Formel 3.1 auf Seite 30. Dabei wird die Grundfläche  $A_{\text{grund}}$  [m<sup>2</sup>] des jeweiligen Gebäudes mit der Anzahl der Stockwerke und einem von Bogenstätter [119] am Institute for Building Operations Research der Hochschule Nürtingen-Geislingen ausgewiesenen Faktor von 0,89 zur Umrechnung von Brutto- auf Nettogrundfläche multipliziert.

$$A_N = A_{\text{grund}} * n_{\text{SW}} * 0,89 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} A_N &= \text{Nutz- bzw. Wohnfläche [m}^2\text{]} \\ A_{\text{grund}} &= \text{Grundfläche [m}^2\text{]} \\ n_{\text{SW}} &= \text{Anzahl an Stockwerken [-]} \end{aligned}$$

Zur Berechnung des generischen, gebäudespezifischen Fensterflächenanteils, der nicht als Information aus dem 3D-Stadtmodell hervorgeht, werden die Gebäude in **Ein- und Mehrfamilienhäuser** klassifiziert. Als Einfamilienhäuser werden, basierend auf Erfahrungswerten, alle Gebäude definiert, die weniger als drei Stockwerke und gleichzeitig eine geringere Grundfläche als 300 m<sup>2</sup> aufweisen.

Mithilfe der zugewiesenen Baualtersklassen und der Klassifizierung in Ein- und Mehrfamilienhäuser kann die gebäudespezifische **Fensterfläche** berechnet werden. Die Methode der Berechnung der Fensterflächen basiert auf einer baualtersklassenbezogenen Abschätzung von Fensterflächen pro Quadratmeter Wohnfläche aus Studien von Diefenbach et al. [120] und Loga et al. [121] (siehe Tabelle A.5, Anhang A, Seite 250). Diese Verfahrensweise findet ebenfalls in der Methode der Dissertation von Heinrich [122] zum Thema „Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau“ Anwendung.

Es wird angenommen, dass **Kellerräume**, insofern vorhanden, unbeheizt sind und im Rahmen der Berechnung des beheizten Volumens nicht mitberücksichtigt werden. Die thermische Gebäudehülle verläuft entlang der Oberseite des Daches, an den Außenwänden in Richtung Gebäudeabschluss auf Erdniveau. Die Bodenplatte zum Erdreich bzw. die unterste Geschossdecke bildet in diesem Fall den unteren Abschluss der Systemgrenze. Lediglich in Kellerräumen aufgestellte oder installierte TGA-Komponenten werden mitbetrachtet.

Angaben zum **Denkmalschutz** von Gebäuden fehlen derzeit sowohl in 3D-Stadtmodellen als auch in anderen Datenbanken großer Gebäudebestände. Deshalb führt urbi+ für alle ausgewählten Wohngebäude eine Sanierung durch. Die genaue Ausführung der Sanierung obliegt den planenden Personen, die ein spezifisches Vorgehen bei der Sanierung im Einzelfall auf der Basis des vorliegenden Denkmalschutzes festlegen können. Die explizite Art und Durchführung der Sanierung eines Wohngebäudes ist dabei nicht definiert; der Sanierungsstandard wird durch die Verbesserung der U-Werte und der betrachteten TGA-Komponenten abgebildet.

Für alle Berechnung gilt der „worst-case-Ansatz“. Muss z. B. bei der Wertedefinition für Energiebedarfsberechnungen entschieden werden, ob für ein Gebäude eine Luftdichtheitsprüfung durchgeführt wurde oder nicht, dann wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass bisher keine Überprüfung stattgefunden hat. Das liegt daran, dass diese Information ebenfalls nicht bezüglich großer Gebäudebestände vorliegt.

### 3.2.1. Betrachtete Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung

Im Folgenden werden die betrachteten TGA-Komponenten beschrieben, deren Auswahl begründet und Grundlagen für deren Betrachtung und Dimensionierung definiert. Wie in Kapitel 2.2.1 erwähnt, erkannte Weißenbeger [19] in seiner Dissertation, dass die Heizungstechnik den größten Anteil an dem auf die Gebäudetechnik anfallenden Anteil an Grauer Energie (ca. 67 %) und Grauen Emissionen (ca. 45 %) einnimmt. Diese Aussage lässt sich zumindest auf den deutschen bzw. mittel- und nordeuropäischen Raum oder auf Gebiete mit ähnlichen klimatischen Bedingungen, wie sie in Deutschland vorherrschen, beziehen. Dabei deckt die Berücksichtigung der Hauptkomponenten der Heizungstechnik, nämlich Wärmeerzeuger, Solarmodule, Trinkwarmwasserspeicher und Wärmeübertragungssysteme (Warmwasserheizsysteme mit Heizkörpern oder Fußbodenheizungen), rund 60 % bis 95 % der Grauen Energie und Grauen Emissionen ab.

Eine Gegenüberstellung der benötigten Input-Daten für die Auslegung der jeweiligen TGA-Komponenten mit den auf der Basis großer Gebäudebestände verfügbaren Daten (inklusive der LCA-Datensätzen etc.) beschränkt das Feld der dimensionierbaren Komponenten. Die verfügbaren Daten werden für die Berechnungen über das 3D-Stadtmodell und über die Definitionen der GUI in urbi+ zur Verfügung gestellt. Die Tabelle A.6 im Anhang A (siehe Seite 251) listet die Auswahl der dimensionierbaren Komponenten auf. Die Auswahl der Wärmeerzeuger bezieht sich dabei auf die Wärmeerzeuger für die Erzeugeraufwandszahlen, Hilfsenergiebedarfe etc., in den für die Berechnungen herangezogenen Normen (DIN V 4108-6:2003-06 [112] und DIN V 4701-10:2003-08 [114]) definiert sind. Die Photovoltaik (PV)-Anlagen werden in dieser Dissertation ausgeklammert, da der Strombedarf (Haushaltsstrom, Beleuchtung etc.) wegen seiner untergeordneten Rolle (siehe Kapitel 3.2) vernachlässigt werden kann. Lediglich der für den Betrieb von Wärmepumpen sowie für Hilfsenergien bei der Wärmeerzeugung, -verteilung und -übergabe verbrauchte Strom wird mitbilanziert. Zudem werden für die Auslegung und effiziente sowie ökonomisch sinnvolle Nutzung von Photovoltaik (PV)-Anlagen bei weiter sinkenden Einspeisetarifen Batteriespeichertechnologien benötigt. Um dies zu ermöglichen, bedarf es weiterer, bislang nicht verfügbarer, Input-Information wie z. B. gebäudespezifischer Lastkurven oder Anwesenheitsprofile der Bewohner/-innen (siehe Kapitel 7). Alle weiteren Komponenten, die im Rahmen dieser Dissertation nicht unmittelbar mitberücksichtigt werden (bspw. Lüftungsanlagen, Umwälzpumpen im Heizkreis etc.), können in Form eines über die GUI von urbi+ zu definierenden pauschalen Faktors mit in die Berechnung einbezogen werden. Dieser wird als Zuschlag den LCA-Ergebnissen hinzugerechnet und muss von den jeweiligen Anwendern und Anwenderinnen definiert werden. Dieses Verfahren orientiert sich an dem von der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) vorgegebenen Verfahren zur Berücksichtigung der TGA in LCAs. Ein solcher Faktor wird ebenfalls bei der LCC mit aufgenommen. Dieser Faktor bildet zusätzlich zur Betrachtung nicht berücksichtigter Komponenten bei der LCC die Personalkosten für den Ein- und Ausbau von Komponenten etc. ab (siehe Kapitel 3.7). In Bezug auf die Wärmeerzeugung aus Biomasse muss angemerkt werden, dass zusätzliche Systemkomponenten wie Förderschnecken, Pelletlager etc. zum einen wegen fehlender gebäudespezifischer Grundrisse und zum anderen aufgrund hierfür fehlender LCA-Datensätze nicht dimensioniert bzw. mitbetrachtet werden können.

In der entwickelten Methode werden Durchschnittswerte für Vakuumröhren- und Flachkollektoren erzeugt und verwendet (siehe Kapitel 3.5.3). Sollten offizielle Durchschnittswerte unter Berücksichtigung weiterer erforderlicher Systemkomponenten zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung stehen, ist eine Möglichkeit vorgesehen, diese in urbi+ aufzunehmen.

### 3.3. Datenakquise und Datenverarbeitung

Der erste Teil der Methode besteht aus der Datenakquise und der Datenverarbeitung. Die Datenakquise über die 3D-Stadtmodelle und der nutzerbezogene Daten-Input finden außerhalb von urbi+ statt. Über die GUI von urbi+ werden in einem weiteren Schritt alle benötigten Daten gesammelt und für die darauf folgende Datenverarbeitung bereitgestellt. Zunächst werden die benötigten Input-Informationen definiert. Anschließend werden die Flächenberechnung der Gebäudekomponenten sowie die Berechnung der sich überschneidenden Wandflächen und des Gebäudevolumens kurz beschrieben.

#### 3.3.1. Input-Informationen

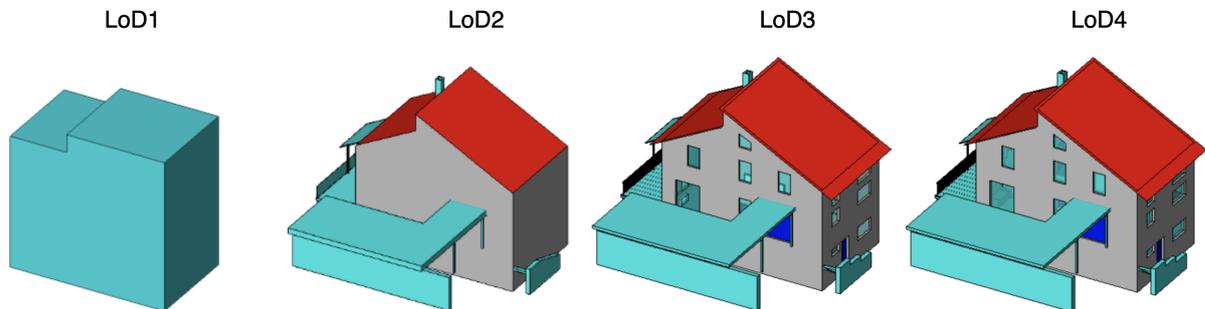
Die für die Berechnungen und Analysen notwendigen Input-Daten bezieht urbi+ aus folgenden zwei Quellen:

- 3D-Stadtmodelle im City Geography Markup Language (CityGML)-Format
- GUI (Benutzeroberfläche) urbi+

**3D-Stadtmodelle im CityGML-Format** dienen im Rahmen dieser Methode grundsätzlich als gebäudespezifische Datenquelle. Die City Geography Markup Language (CityGML) ist ein offenes, semantisches Informationsmodell zur Speicherung und zum Austausch virtueller 3D-Stadtmodelle, basierend auf der Extensible Markup Language (XML) [21][123]. In den CityGML-Dateien sind bspw. Informationen zu Gebäude-, Brücken-, Tunnel- und Vegetationsmodellen wiederzufinden, die als einzelne Stadtobjekte in den Dateien aufgeführt werden. Dabei werden diese Objekte in einem jeweils bestimmten Detaillierungsgrad, dem Level of Detail (LoD), dargestellt.

Abbildung 3.3 (siehe Seite 33) zeigt die verschiedenen Detaillierungsgrade eines Gebäudeobjekts auf. Der Unterschied zwischen LoD3 und LoD4 besteht in der Definition der Gebäudegrundrisse und ist daher in der aufgezeigten Abbildung nicht zu erkennen. Es ist möglich, dass in einem CityGML-Datensatz verschiedene Gebäudeobjekte in mehreren LoDs enthalten sind. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode ermöglicht eine Auswertung von 3D-Stadtmodellen in LoD1 und LoD2, wobei Modelle in LoD2 bevorzugt zu verwenden sind. LoD2-Datensätze enthalten im Vergleich zu LoD1 neben der Gebäudekubatur auch Dachformen, jedoch keine weiteren spezifischen Informationen (z. B. zu Fensterflächen, Innenausbauten, zur Technischen Gebäudeausrüstung etc.). 3D-Stadtmodelle in LoD1 und LoD2 sind laut der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen (AdV) in den meisten Bundesländern Deutschlands ein in einem einheitlichen Standard (Beschluss GT2019/13 [124]) flächendeckend verfügbar [125]. Werden die 3D-Stadtmodelle mit Informationen der entsprechenden Katasterämter synchronisiert, dann können bspw. gebäudespezifische Nutzungsarten festgelegt oder

Eigentumsgrenzen in den Stadtmodellen definiert werden. Das ermöglicht z. B. die Identifizierung von Reihenhäusern. Hierdurch lassen sich auf den 3D-Stadtmodellen aufbauende Berechnungen und Simulationen mit höherer Genauigkeit durchführen.



**Abbildung 3.3.:** Definition der LoDs von Gebäuden in 3D-Stadtmodellen (Quelle: [123])

Für das Bundesland Bayern, aus dem die Daten der später verwendeten Fallbeispiele stammen, stehen die 3D-Stadtmodelle mit den aus dem amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®) [126] konformen Standarddachformen in LoD2 zur Verfügung. Die im Rahmen der Anwendung der Methode und urbi+ verwendeten 3D-Stadtmodelle werden vom Bayerischen Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung bereitgestellt [127]. Diese Modelle werden mit zusätzlichen Informationen wie z. B. dem Baujahr von Gebäuden angereichert, die vom Planungsreferat der Landeshauptstadt München (LHM) stammen [128].

Neben den im CityGML-Standard vordefinierten Datenstrukturen besteht die Möglichkeit, diese durch eine „Application Domain Extension (ADE)“ mit zusätzlichen Strukturen zu erweitern [129]. Die „CityGML Energy ADE“ erweitert den CityGML-Standard bswp. durch Datenstrukturen, die zum einen gebäudespezifische Daten zur Durchführung von Energiesimulationen enthalten und zum anderen die Speicherung der aus den Simulationen resultierenden Ergebnisse ermöglichen [130]. Die CityGML Energy ADE findet in dieser Arbeit keine Anwendung, da grundlegende Datenstrukturen zur Durchführung von LCAs und LCCs bislang nicht implementiert sind (z. B. Lebensdauern von TGA-Komponenten, energieträgerbezogene Kostenwerte etc.). Die Entwicklung einer „CityGML LCA ADE“ kann aufgrund dessen für zukünftige Forschungsarbeiten in Betracht gezogen werden.

Grundsätzlich muss jedoch zwischen den vorgegebenen Datenstrukturen des CityGML-Standards und den in den 3D-Stadtmodellen implementierten Daten differenziert werden. Der internationale CityGML-Standard, inklusive ggfs. verwendeter ADEs, stellt einheitliche Datenstrukturen bereit, die die verschiedenen Stadtobjekte und deren Attribute sowie deren Zusammenhang untereinander beschreiben. Die Verwendung des CityGML-Standards bietet somit in dieser Arbeit bzw. zusammen mit der entwickelten Methode die Möglichkeit zur Analyse und Auswertung weltweit beliebiger 3D-Gebäudemodelle im CityGML-Standard in LoD2 (siehe Kapitel 4.3 auf Seite 167 und Kapitel 4.4 auf Seite 186).

Das Anreichern der Datenstrukturen mit den für die Berechnungen notwendigen gebäudespezifischen Daten erfolgt über die Landesvermessungsämter (z. B. zu Gebäudegeometrien), die zuständigen Katasterämter (z. B. zu Nutzungsarten von Gebäuden) sowie die kommunalen Planungsreferate und Geodatenservices (z. B. zu den Baujahren der Gebäude). Die Datenverfügbarkeit auf Stadtquartiers- und Stadtebene reicht trotz der Datenanreicherung der 3D-Stadtmodelle nicht aus, um alle Berechnungen der entwickelten Methode durchzuführen. Deshalb werden fehlende Datenlücken mit Annahmen geschlossen, die über die GUI von urbi+ angegeben werden können. Es bleibt somit festzuhalten, dass der CityGML-Standard, inklusive ggfs. verwendeter ADEs, die für die Berechnungen benötigten Datenstrukturen vorsieht. Diese können jedoch von Seiten der Kataster- und kommunalen Planungsreferate sowie der Geodatenservices nicht vollständig mit den benötigten Daten angereichert werden.

Welche Auswirkungen die Datenlücken und Annahmen auf die Ergebnisberechnung haben, wird im weiteren Verlauf der Arbeit anhand von Unsicherheitsanalysen ermittelt (siehe Kapitel 4.2.3 ab Seite 133). Aus den Ergebnissen der Unsicherheitsanalysen lässt sich ableiten, welche Informationen zukünftig von kommunaler Seite priorisiert auf Basis großer Gebäudebestände zur Verfügung gestellt werden müssen, um Ergebnisse von stadtquartiers- und stadtweiten Berechnung von LCAs mit geringerer Unsicherheit durchzuführen. Zudem wird die Thematik der Datenverfügbarkeit nochmals im Fazit vertiefend aufgegriffen und anhand von Datenbeispielen aus den Anwendungsbeispielen dargestellt (siehe Kapitel 6 ab Seite 207). Die CityGML-Dateien (LoD2) der im Rahmen der Arbeit untersuchten Fallbeispiele der Stadt München und New York City enthalten folgende Informationen, die für die Methode und in urbi+ für weitere Berechnungen zur Verfügung stehen:

- Positionierung bzw. Adresse der Gebäude im 3D-Stadtmodell
- Geometrische Informationen bzw. 3D-Koordinaten der Polygone, die die einzelnen Gebäudekomponenten (Wand-, Boden-, Dachflächen) beschreiben
- Nutzungsart der Gebäude
- Baujahr der Gebäude
- Dachformen der Gebäude
- Höhe der Gebäude

Die Adressen der Gebäude im 3D-Stadtmodell werden zur Ermittlung der ortsspezifischen Klimadaten für die Heizlast- und Energiebedarfsberechnungen und als Grundlage der Visualisierung der Gebäude und Ergebnisse im 3DCityDB Web-Map-Viewer benötigt. Aus den geometrischen Informationen, also den 3D-Koordinaten der Polygone, lassen sich die Flächen der einzelnen Gebäudekomponenten berechnen (siehe Kapitel 3.3.2). Die Nutzungsart des Gebäudes ist nach Gröger et al. [123] als spezifischer Kennwert definiert. So können die relevanten Wohngebäude im 3D-Stadtmodell identifiziert werden (siehe Tabelle A.7, Anhang A, Seite 251). Die Dachformen sind ebenfalls nach Gröger et al. [123] als spezifischer Kennwert definiert und in Tabelle A.8 (Anhang A, Seite 252) zu finden. Die wichtigste Unterscheidung wird hierbei zwischen dem Flachdach und allen anderen Dachformen getroffen. Ein Flachdach weist in den meisten Fällen keinen Dachraum auf, wohingegen alle anderen Dachformen Möglichkeiten für einen Dachraum bieten, der ggf. beheizt und bewohnt sein kann.

Diese Information ist für die Berechnung des Jahresheizwärme-, Jahresheizenergiebedarfs, der Norm-Heizlast sowie für die Dimensionierung der TGA-Komponenten und letztlich für die LCA der TGA von Bedeutung. Die Höhe der Gebäude wird in Meter [m] angegeben und, sofern als Information im Modell vorhanden, für verschiedene Berechnungen, z. B. für die Dimensionierung von Rohrleitungslängen, herangezogen.

Die **Graphische Nutzeroberfläche von urbi+** besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Eingabemasken (siehe Abbildungen B.1 und B.2 auf den Seiten 287 und 288). In der ersten Eingabemaske werden folgende Schritte durchlaufen (siehe Abbildung B.1):

- **Schritt 1:** Definition der Input- (CityGML-Datei) und Output-Dateien (Excel, CSV und CityGML)
- **Schritt 2:** Definition Datenbankverbindung
- **Schritt 3:** Definition XML Input- und Output-Datei, die alle Input-Parameterdefinitionen enthalten
- **Schritt 4:** Auswahl des Ausgabeformats der Ergebnisdateien

In der zweiten Eingabemaske werden folgende Schritte durchgeführt (siehe Abbildung B.2):

- **Schritt 5:** Definition des zu betrachtenden Gebäudebestands und des Entwicklungsszenarios
- **Schritt 6:** Definition Wärmeerzeuger inklusive deren Lebensdauer für den Status quo und von Entwicklungsszenario 1 und 2
- **Schritt 7:** Definition Wärmeübergabesystem inklusive Lebensdauer
- **Schritt 8:** Definition Lebensdauer weiterer TGA-Komponenten
- **Schritt 9:** Definition Faktor zur Berücksichtigung zusätzlicher Komponenten
- **Schritt 10:** Entscheidung darüber, ob U-Werte für die Berechnung aller drei Szenarien (Status quo, Entwicklungsszenario 1 und 2) auf hinterlegten oder eigens definierten Werten basieren soll
- **Schritt 11:** Definition Primärenergiefaktoren und nicht-erneuerbare und erneuerbare Anteile an Primärenergie für alle drei Szenarien
- **Schritt 12:** Definition der Kostenwerte und zusätzlicher Berechnungsfaktoren für die LCC

Eine detaillierte Beschreibung der Eingabemasken der GUI von urbi+ ist in Anhang B (siehe Seite 287 ff.) aufgeführt.

### 3.3.2. Berechnung der Flächen der Gebäudekomponenten

Die geometrischen Daten der Gebäudeobjekte bzw. der Gebäudekomponenten (Wand-, Dach- und Bodenflächen) bestehen aus georeferenzierten Punkten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem, genannt „Kartesisches Koordinatensystem“. Werden die Punkte miteinander verbunden,

ergeben sich Polygone. Dabei ist jeder Eckpunkt im Polygon mit einer x-, y- und z- Koordinate im Koordinatensystem angegeben (Beispiel: Punkt  $P = (x | y | z)$ ). Diese Koordinaten sind in der jeweiligen CityGML-Datei den Gebäuden bzw. Gebäudekomponenten zugewiesen (siehe aufgeführte Punkte unter `<gml:posList srsDimension="3">` in Auflistung 3.1). Dabei ist der jeweils erste und letzte Punkt gleich. Werden die einzelnen Punkte miteinander verbunden, beschreiben diese, wie im aufgeführten Beispiel, ein Polygon. Für dieses Polygon lässt sich weiterführend der Flächeninhalt  $A_P$  berechnen. Im angeführten Beispiel ist das die Fläche einer Außenwand.

Diese Koordinaten werden mithilfe von citygml4j (siehe Kapitel 3.1.1) aus der CityGML-Datei gelesen. Anschließend wird deren Flächeninhalt  $A_P$  [m<sup>2</sup>] in urbi+ berechnet.

### Auflistung 3.1: Ausschnitt CityGML-Datei mit Polygon

```

1 <bldg:LOD2MultiSurface>
2   <gml:MultiSurface gml:id="UUID_a9e21056-5f5c-
3     41c5-8ec7-cc761b7e5993">
4     <gml:surfaceMember>
5       <gml:Polygon gml:id="DEBY_LOD2_4907037_
6         cfd71115-4482-47bb-b242-23881c429149_poly">
7         <gml:exterior>
8           <gml:LinearRing gml:id="DEBY_LOD2_4907037_
9             cfd71115-4482-47bb-b242-23881c429149_poly_0_">
10            <gml:posList srsDimension="3">
11              4467734.56 5334941.24 532.888
12              4467735.92 5334944.34 532.89
13              4467741.6 5334957.25 532.888
14              4467741.06 5334957.49 533.339
15              4467736.513 5334959.489 537.13
16              4467729.478 5334943.49 537.13
17              4467734.56 5334941.24 532.888
18            </gml:posList>
19          </gml:LinearRing>
20        </gml:exterior>
21      </gml:Polygon>
22    </gml:surfaceMember>
23  </gml:MultiSurface>
24 </bldg:LOD2MultiSurface>

```

Um den Flächeninhalt  $A_P$  des jeweiligen Polygons, ergo der Wand-, Dach- oder Bodenflächen zu berechnen, wird zunächst ein Punkt als Ursprungspunkt des Polygons definiert. Eine effiziente Möglichkeit, den Flächeninhalt eines Polygons zu berechnen ist, es in Dreiecke aufzuteilen. In einem nächsten Schritt werden die Flächeninhalte der Dreiecke berechnet und aufsummiert. Daraus ergibt sich die Gesamtfläche des Polygons. Hierfür wird jeweils der erste aufgeführte Punkt, in diesem

Beispiel Punkt U = (4467734.56 | 5334941.24 | 532.888), als Ursprungspunkt definiert. Weiterführend werden in Zwischenschritten iterierend die Vektoren zwischen dem Punkt U und den weiteren Punkten  $P_n = (x_n | y_n | z_n)$  anhand der Formel 3.2 errechnet.

$$\overrightarrow{UP_n} = \begin{pmatrix} x_n - x_u \\ y_n - y_u \\ z_n - z_u \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\overrightarrow{UP_1} = \begin{pmatrix} 1,360 \\ 3,100 \\ 0,002 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{UP_2} = \begin{pmatrix} 7,040 \\ 16,010 \\ 0,000 \end{pmatrix}$$

Im beispielhaften Polygon in Abbildung 3.4 auf Seite 38 stellen die gestrichelten Linien die ersten beiden Vektoren zwischen dem Ursprungspunkt und den ersten beiden Punkten des Polygons  $P_1 = (44467735.92 | 34944.34 | 532.89)$  und  $P_2 = (4467741.6 | 5334957.25 | 532.888)$  dar. Die x-, y- und z-Koordinaten des Vektor- bzw. Kreuzprodukts berechnen sich nach der Formel 3.3 und die Fläche des Dreiecks  $A_P$  nach der Formel 3.4.

$$\overrightarrow{UP_1} * \overrightarrow{UP_2} = \begin{pmatrix} y_n * z_{n+1} - z_n * y_{n+1} \\ z_n * x_{n+1} - x_n * z_{n+1} \\ x_n * y_{n+1} - y_n * x_{n+1} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

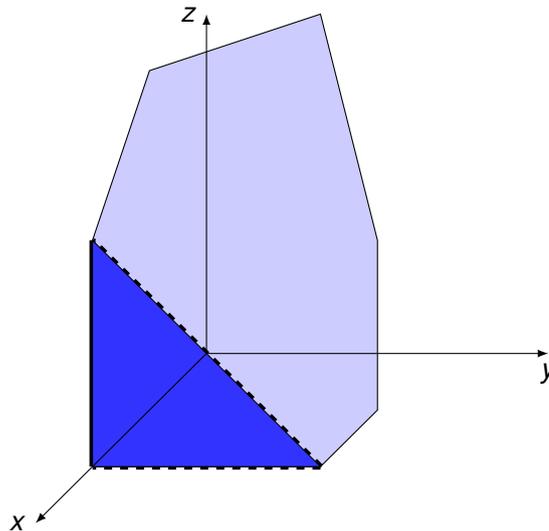
Für das angeführte Beispiel ergibt sich daraus folgendes Kreuzprodukt:

$$\overrightarrow{UP_n} * \overrightarrow{UP_{n+1}} = \begin{pmatrix} -0,032 \\ 0,014 \\ 0,050 \end{pmatrix}$$

$$A_P = 1/2 * \sqrt{x^2, y^2, z^2} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} A_P &= \text{Flächeninhalt [m}^2\text{]} \\ x, y, z &= \text{Koordinatenpunkte [-]} \end{aligned}$$

Werden die Werte für die x-, y- und z-Koordinaten in Formel 3.4 eingesetzt, ergibt sich daraus eine Fläche von  $0,03 \text{ m}^2$  für das in Abbildung 3.4 eingezeichnete Dreieck innerhalb des Polygons. Die Information zu den Flächeninhalten wird für weitere Berechnungen, z. B. für die Berechnung der Wärmeverluste durch die verschiedenen Bauteilflächen, zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 3.4.:** Beispielhaftes Polygon zur Verdeutlichung der Flächenberechnungen (eigene Abbildung)

### 3.3.3. Berechnung sich überschneidender Wandflächen

Bei der Berechnung sich überschneidender Wandflächen (*SharedWallSurfaces*) werden sowohl die Polygone der Wandfläche der zu betrachtenden Wohngebäude als auch die Wandflächen aller sich im 3D-Stadtmodell befindenden Gebäude berücksichtigt. Es besteht nämlich die Möglichkeit, dass sich ein Wohngebäude eine Wandfläche mit einem Nicht-Wohngebäude „teilt“ und sich die Gebäude somit berühren. Ergebnisse der *SharedWallSurfaces*-Berechnung sind gebäudespezifische Wandflächen, die sich mehrere Gebäude „teilen“. Das ist bspw. bei Reihenhäusern der Fall. Die Ergebnisse finden bei der Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs (siehe Kapitel 3.4.1) und der Heizlastberechnung (siehe Kapitel 3.23) Anwendung.

### 3.3.4. Berechnung des Gebäudevolumens

Das Gebäudevolumen berechnet sich mithilfe des bereits in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Tools *Voluminator 2.0*. Dabei werden die anhand von *citygml4j* aus der CityGML-Datei gelesenen Gebäude dem *Voluminator 2.0* übergeben. Dieser berechnet das umbaute Volumen des Gebäudes  $V_e \text{ [m}^3\text{]}$ , das zur Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs (siehe Kapitel 3.4.1) und der Heizlastberechnung (siehe Kapitel 3.23) verwendet wird.

### 3.4. Energiebedarf und Heizlast

Die Energiebedarfs- und Heizlastberechnung untergliedert sich in die Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs (Raumheizung), die Berechnung des Energiebedarfs für TWW und die Zusammenführung der beiden Bedarfe im gebäudebezogenen End- und Primärenergiebedarf<sup>1</sup>. Danach wird die Berechnung der Heizlastberechnung aufgeführt (siehe Kapitel 3.4.4).

#### 3.4.1. Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarf

Die bereits berechneten Ergebnisse für die Flächen der Gebäudekomponenten (siehe Kapitel 3.3.2) für sich überschneidende Wandflächen (siehe Kapitel 3.3.3) und für die Gebäudevolumen (siehe Kapitel 3.3.4) werden in diesem Kapitel zur Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs herangezogen. Diese Berechnungen basieren auf der DIN V 4108-6:2003-06 [112] und der DIN V 4701-10:2003-08 [114]. Nach der deutschen EnEV [113] sind diese beiden Normen für die Berechnung der Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs von Wohngebäuden zulässig. Nach der DIN V 4108-6:2003-06 wird das vereinfachte Heizperiodenbilanzverfahren angewendet. Die gebäudespezifischen Informationen aus den 3D-Stadtmodellen sowie die durch die GUI zur Verfügung gestellten Informationen dienen dem Heizperiodenbilanzverfahren als Input-Parameter. Im Rahmen des Heizperiodenbilanzverfahrens wird die Heizperiode (HP) in Deutschland auf 185 Tage pro Jahr angesetzt. Das entspricht einem durchschnittlichen winterlichen Zeitraum, in dem Wohnraum beheizt wird. Die Energiebedarfswerte der Heizperiode entsprechen folglich den Energiebedarfswerten eines Jahres. Es gilt zu beachten, dass bei den Energiebedarfsberechnungen weder Glasvorbauten noch transparente Wärmedämmung und Wärmerückgewinnung mithilfe von Lüftungsanlagen mitberücksichtigt werden. Das liegt daran, dass in LoD2 keine gebäudespezifischen Grundrisse vorliegen und ebenso keine deutschlandweite Wohngebäudetypologie in Bezug auf Grundrisse existiert. Somit wird ein Ein-Zonen-Modell für alle Berechnungen angenommen. Hierbei wird kein dynamischer Wärmeaustausch zwischen verschiedenen Zonen (z. B. von weniger beheizten Fluren zu anderen Zimmern) berücksichtigt.

Im Heizperiodenbilanzverfahren wird kein Nutzerverhalten abgebildet. Das Nutzerverhalten kann einen großen Effekt auf die Energiebedarfsberechnung haben. Die Thematik der Berücksichtigung von Nutzerprofilen in der Gebäudesimulation ist ein breites Forschungsfeld, das unter anderem darauf abzielt, den *Energy Performance Gap* zwischen Simulation und tatsächlichem Energieverbrauch der Gebäude in der Nutzungsphase zu schließen [131]. Auf der Basis großer Gebäudebestände und von Gebäudetypologien gibt es bisher keine generischen Nutzerprofile, die für die Berechnungen von Seiten der genannten Normen herangezogen werden könnten. Zudem liegen keine gebäudespezifischen Nutzerdaten (z. B. zur Bewohneranzahl, deren Altersstruktur) im 3D-Stadtmodell vor.

Böhme und Hamacher untersuchten in einer Studie [132] die Korrelation der Gebäudeparameter Gebäudevolumen, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis) und Gebäudebaujahr bei Ener-

---

<sup>1</sup> Wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff „Primärenergie“ oder „Primärenergiebedarf“ ohne Differenzierung zwischen dem Primärenergiebedarf aus nicht-erneuerbaren Energiequellen (PENRT) und dem Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energiequellen (PERT) genannt, dann ist damit die Summe des Primärenergiebedarfs (PET) gemeint.

giebedarfsberechnungen mit gemessenen und durch Nutzerverhalten bedingten Energieverbräuchen. Beim Abgleich der Berechnung von Energiebedarfen mit den Energieverbrauchsdaten einzelner Gebäude ergab sich je nach Szenario ein relativer statistischer Fehler von 85 % bis 105 %. Wird jedoch der Energiebedarf größerer Gebäudebestände berechnet, dann reduziert sich dieser Fehler ab bereits fünf Gebäuden auf rund 5 %. Die Studie hat zudem gezeigt, dass die Energieverbräuche nur teilweise durch die untersuchten Gebäudeparameter bedingt werden und das Nutzerverhalten eine bedeutende Rolle in Bezug auf die gebäudebezogenen Energiebeverbräuche hat.

Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  berechnet sich nach der Formel 3.5 (siehe DIN V 4108-6:2003-06). Dabei wird laut Norm ein Wert von 0,95 als Ausnutzungsgrad  $\eta_p$  für alle Berechnungen angenommen.

$$Q_h = Q_l - \eta_p(Q_s + Q_i) \quad (3.5)$$

- $Q_h$  = Heizwärmebedarf [kWh/a]
- $Q_l$  = Wärmeverluste [kWh/a]
- $\eta_p$  = Ausnutzungsgrad [-]
- $Q_s$  = Solare Gewinne [kWh/a]
- $Q_i$  = Interne Gewinne [kWh/a]

Die Wärmeverluste  $Q_l$  berechnen sich nach der Formel 3.6.

$$Q_l = F_{GT}(H_T + H_V) \quad (3.6)$$

- $Q_l$  = Wärmeverluste [kWh/a]
- $F_{GT}$  = Gradtagzahlfaktor [-]
- $H_T$  = spezifische Transmissionswärmeverluste [W/K]
- $H_V$  = Lüftungswärmeverluste [W/K]

Für den Gradtagzahlfaktor  $F_{GT}$  ergibt sich ein fixer Wert von 66 aus der Formel 3.7 (siehe Seite 41), der für die Berechnung der Wärmeverluste herangezogen wird. Für die Heizgradtagzahl  $G_t$  wird ein Wert von 2900 mit der Einheit  $Kd$  (Kelvin \* Tagen pro Jahr) für die Wärmesumme definiert, der sich aus Formel 3.8 auf Seite 41 ergibt. Alle weiteren Parameter werden nach Norm wie folgt bestimmt:

- $F_{Gt, o. NA} = 0,024$
- $f_{NA} = 0,95$
- $z_H = 185 \text{ d}$
- $\vartheta_i = 20 \text{ °C}$

Die mittlere Außentemperatur der Heizperiode  $\vartheta_{a,m}$  ergibt sich für Formel 3.8 ortsspezifisch, nach der jeweiligen Postleitzahl, aus der DIN EN 12831-1:2017-09.

$$F_{GT} = F_{Gt, o. NA} * Gt * f_{NA} \quad (3.7)$$

- $F_{GT}$  = Gradtagzahlfaktor [-]  
 $F_{Gt, o. NA}$  = Gradtagzahlfaktor ohne Nachtabenkung [-]  
 $Gt$  = Heizgradtagzahl [Kd]  
 $f_{NA}$  = Abminderungsfaktor für Nachtabenkung [-]

$$Gt = z_H(\vartheta_i - \vartheta_{a,m}) \quad (3.8)$$

- $Gt$  = Heizgradtagzahl [Kd]  
 $z_H$  = Zahl der Heiztage [d]  
 $\vartheta_i$  = Innenlufttemperatur [°C]  
 $\vartheta_{a,m}$  = mittlere Außenlufttemperatur der Heizperiode [°C]

Für die Berechnung der Wärmeverluste  $Q_i$  wird zunächst die Summe aller spezifischen Transmissionswärmeverluste durch die einzelnen Bauteile (Wand-, Boden- und Dachflächen) nach außen und zu beheizten und unbeheizten Nachbargebäuden  $H_T$  (siehe Formel 3.9) berechnet. In einem zweiten Schritt werden die Lüftungswärmeverluste  $H_V$  nach der Formel 3.10 auf Seite 42 berechnet.

Der für die Berechnung von  $H_T$  spezifisch zu verwendende Temperatur-Korrekturfaktor  $F_{xi}$  kann aus Tabelle A.21 im Anhang A (siehe Seite 259) herausgelesen werden. Die spezifischen U-Werte  $U_i$  werden aus den bereits in Kapitel 3.2 beschriebenen baualtersklassen-bezogenen Tabellen in der SQL-Datenbank entnommen (siehe Tabellen A.2, A.3 und A.4, Anhang A, Seite 250). Die spezifischen Bauteilflächen  $A_i$  ergeben sich aus der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Methode zur Flächenberechnung von Polygonen. Der Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  wird laut Norm mit einem fixen Wert von 0,05 W/(m<sup>2</sup>\*K) angenommen.

$$H_T = \sum (F_{xi} * U_i * A_i) + \Delta U_{WB} \quad (3.9)$$

- $H_T$  = Summe spezifischer Transmissionswärmeverluste [W/K]  
 $F_{xi}$  = spezifische Temperatur-Korrekturfaktoren [-]  
 $U_i$  = spezifischer U-Wert [W/m<sup>2</sup>\*K]  
 $A_i$  = spezifische Bauteilfläche [m<sup>2</sup>]  
 $U_{WB}$  = Wärmebrückenzuschlag [W/m<sup>2</sup>\*K]

Die Lüftungswärmeverluste  $H_V$  werden nach der Formel 3.10 mit oder ohne Luftdichtheitsprüfung berechnet. Dabei wird das umbaute Volumen des Gebäudes  $V_e$  mit einem fixen Wert von 0,19 (ohne Luftdichtheitsprüfung) bzw. 0,163 (mit Luftdichtheitsprüfung) multipliziert. Bei der Ermittlung der Lüftungswärmeverluste wird vom „worst-case“ ausgegangen. Das bedeutet, dass bei der Berechnung des Gebäudebestandes jeweils der Wert für „ohne Luftdichtheitsprüfung“ herangezogen wird. Bei den Sanierungsszenarien wird jeweils mit dem Wert für „mit Luftdichtheitsprüfung“ gerechnet.

$$H_V = 0,19/0,163 * V_e \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} H_V &= \text{Lüftungswärmeverluste [W/K]} \\ V_e &= \text{umbautes Volumen des Gebäudes [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Die solaren Wärmegewinne  $Q_S$  werden maßgeblich von der solaren Einstrahlung  $\sum(I_{st})_{j,HP}$  dem spezifischen Energiedurchlassgrad der Fenster  $g_i$  und der spezifischen Fensterfläche  $A_i$  bestimmt (siehe Formel 3.11). Die solare Einstrahlung ist dabei wiederum von der Orientierung der Fensterfläche abhängig. Es werden laut DIN V 4108-6:2003-06 [112] folgende Einstrahlungswerte für Nord-, Süd-, Ost- und West-Orientierung angenommen:

- Süd: 270 kWh/m<sup>2</sup> pro HP
- Ost und West: 155 kWh/m<sup>2</sup> pro HP
- Nord: 100 kWh/m<sup>2</sup> pro HP

Die spezifischen Fensterflächen ergeben sich aus der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode, da 3D-Stadtmodelle in LoD2 keine fenster(flächen)bezogenen Informationen enthalten. Aufgrund dessen wird ein Mittelwert aus den bereits genannten Einstrahlungswerten ( $\emptyset$  Einstrahlung: 175 kWh/m<sup>2</sup> pro HP) für die Berechnung herangezogen. Zudem wird ein durchschnittlicher Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Fenster, bezogen auf die Baualtersklassen, von  $\emptyset$  g-Wert: 0,8 in Baualtersklasse (BAK)1 bis 0,6 in BAK10 aus den bereits in Kapitel 3.2 beschriebenen Werten errechnet und für die Ermittlung der solaren Wärmegewinne verwendet. Dachfenster werden dabei ausgeschlossen.

$$Q_S = \sum[(I_{st})_{j,HP} \sum 0,567 * g_i * A_i] \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} Q_S &= \text{solare Gewinne [kWh/a]} \\ \sum(I_{st})_{j,HP} &= \text{solare Einstrahlung [kWh/m}^2\text{HP]} \\ g_i &= \text{spezifischer Energiedurchlassgrad Fenster [-]} \\ A_i &= \text{spezifische Fensterfläche [m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Die internen Wärmegewinne  $Q_i$  ergeben sich, basierend auf DIN V 4108-6:2003-06, aus Formel 3.12. Die Wohnfläche  $A_N$  (siehe Kapitel 3.2) wird dabei nach Norm mit einem vordefinierten Faktor von 22 multipliziert.

$$Q_i = 22 * A_N \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= \text{interne Gewinne [kWh/a]} \\ A_N &= \text{Wohn- bzw. Nutzfläche [m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Anhand der Ergebnisse der aufgeführten Formeln kann folglich der Heizwärmebedarf  $Q_h$  (Nutzenergie) [kWh/a] berechnet werden. Der spezifische bzw. nutzflächenbezogene Heizwärmebedarf  $q_h$  [kWh/m<sup>2</sup>\*a] dient weiterführend als Grundlage für die Berechnung des spezifischen Endenergie- und Primärenergiebedarfs der Raumheizung  $q_E$ ,  $q_P$  und der Raumheizungs-Hilfsenergie  $q_{E,HE}$ ,  $q_{P,HE}$ . Der nutzflächenbezogene Heizwärmebedarf wird verwendet, weil die Werte für die Hilfsenergien und Wärmegewinne- und verluste normenseitig ebenfalls in dieser Einheit vorliegen. Die Summe aus dem spezifischen Primär- bzw. Endenergiebedarf der Raumheizung und der Raumheizungs-Hilfsenergie ergibt folglich den Gesamtprimär- und Gesamtendenergiebedarf für die Raumheizung.

Hierzu errechnet sich aus der Formel 3.13 zunächst der spezifische Endenergiebedarf der Raumheizung  $q_E$ . Dabei ergibt sich der spezifische Heizwärmebedarf  $q_h$  aus dem Ergebnis der Formel 3.5 (siehe Seite 40), dividiert durch die Nutz- bzw. Wohnfläche  $A_N$ .

$$q_E = (q_h - q_{h,TW} - q_{h,L} + q_{ce} + q_d + \varnothing q_S) * (e_g * \alpha_g) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} q_E &= \text{spezifischer Endenergiebedarf Raumheizung [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_h &= \text{spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{h,TW} &= \text{spezifische Heizwärmegutschrift Trinkwarmwasser [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{h,L} &= \text{spezifische Heizwärmegutschrift Lüftung [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{ce} &= \text{spezifische Wärmeverluste bei Wärmeübergabe an Raum [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_d &= \text{spezifische Wärmeverluste Verteilung [kWh/m}^2\text{*a]} \\ \varnothing q_S &= \text{Wärmeverluste Speicherung [kWh/m}^2\text{*a]} \\ e_g &= \text{Wärmeerzeugeraufwandszahl [-]} \\ \alpha_g &= \text{Heizwärme-Deckungsanteil [-]} \end{aligned}$$

Alle weiteren Parameter zur Berechnung definieren sich nach der Norm und dem „worst-case“-Ansatz wie folgt:

- $q_{h,TW} = 0,0 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$
- $q_{h,L} = 0,0 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$
- $q_{ce} = 1,61 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$
- $q_d$  = flächenbezogene Durchschnittswerte (siehe Tabelle A.26, Anhang A, Seite 262)
- $q_s$  = flächenbezogene Durchschnittswerte (siehe Tabelle A.27 und A.28, Anhang A, Seiten 262 und 263)
- $\alpha_g = 1,0$

Die Wärmeerzeugeraufwandszahl  $e_g$  errechnet sich durch die Multiplikation der prozentualen Angaben zu den Energiesystemen mit der jeweiligen Wärmeerzeugeraufwandszahl (siehe Tabellen A.29, A.30 und A.31, Anhang A, Seiten 263 ff.). Diese Durchschnittswerte basieren auf Werten aus der DIN V 4701-10:2003-08.

Die Multiplikation des spezifischen Endenergiebedarfs der Raumheizung  $q_E$  mit dem spezifischen Primärenergiefaktor  $f_P$  ergibt den spezifischen Primärenergiebedarf  $q_P$ , analog zu Formel 3.14. Der spezifische Primärenergiefaktor errechnet sich aus der Summe der Produktwerte aus der Multiplikation der prozentualen Anteile der Energiesysteme für die Heizung mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor des vom Energiesystem genutzten Primärenergieträgers, z. B. Öl, Gas, Holz etc.

$$q_P = q_E * f_P \quad (3.14)$$

- $q_P$  = spezifischer Primärenergieaufwand [ $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ ]
- $q_E$  = spezifischer Endenergiebedarf [ $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ ]
- $f_P$  = spezifischer Primärenergiefaktor [-]

Weiterführend werden erst der spezifische Endenergiebedarf und dann der spezifische Primärenergieaufwand der Raumheizungs-Hilfsenergie  $q_{E,HE}$  und  $q_{P,HE}$  errechnet. Der Endenergiebedarf der Raumheizungs-Hilfsenergie  $q_{E,HE}$  errechnet sich aus der Formel 3.15 auf Seite 45.

$$q_{E,HE} = q_{ce,HE} - q_{d,HE} - q_{S,HE} + (q_{g,HE} * \alpha_g) \quad (3.15)$$

- $q_{E,HE}$  = spezifischer Endenergiebedarf Raumheizungs-Hilfsenergie [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{ce,HE}$  = spezifische Hilfsenergie Wärmeübergabe an Raum [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{d,HE}$  = spezifische Hilfsenergie Wärmeverteilung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{S,HE}$  = spezifische Hilfsenergie Wärmespeicherung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{g,HE}$  = spezifische Hilfsenergie Wärmeerzeugung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $\alpha_g$  = Heizwärme-Deckungsanteil [-]

Folgende Werte werden aus der Norm für die Berechnungen übernommen:

- $q_{ce,HE} = 0$  kWh/m<sup>2</sup>a: kein zusätzlicher Antrieb (z. B. Luftumwälzungs-Ventilatoren) zur Wärmeübergabe in den Raum berücksichtigt
- $q_{d,HE}$  = flächenbezogener Durchschnittswert (siehe Tabelle A.32, Anhang A, Seite 264)
- $q_{S,HE}$  = flächenbezogener Durchschnittswert basierend auf den in der GUI getroffenen Entscheidungen zu den Energiesystemverteilungen für die Raumheizung. Die prozentualen Angaben zu den Energiesystemen werden mit dem jeweiligen wärmeerzeugerspezifischen Hilfsenergiebedarf multipliziert (siehe Tabellen A.29, A.30 und A.31, Anhang A, Seiten 263 ff.).
- $\alpha_g = 1,0$

Der Primärenergieaufwand der Hilfsenergie für die Raumheizung  $q_{P,HE}$  errechnet sich unter Verwendung der heizwärmebezogenen Werte nach der Formel 3.16.

$$q_{HE,P} = q_{HE,E} * f_P \quad (3.16)$$

- $q_{HE,P}$  = spezifischer Primärenergieaufwand Raumheizung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{HE,E}$  = spezifischer Endenergiebedarf Raumheizung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $f_P$  = spezifischer Primärenergiefaktor [-]

Der Gesamtprimär- und Gesamtendenergiebedarf für die Raumheizung  $Q_{H,E}$ ,  $Q_{H,P}$  berechnet sich aus der Formel 3.17 auf Seite 46.

$$Q_{H,E/P} = (q_{H,E/P} + q_{E/P,HE}) * A_N \quad (3.17)$$

- $Q_{H,P}$  = Gesamtend-/Primärenergiebedarf Raumheizung [kWh/a]  
 $q_{H,P}$  = spezifischer End-/Primärenergieaufwand Raumheizung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{P,HE}$  = spezifischer End-/Primärenergieaufwand Hilfsenergien Raumheizung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $A_N$  = Nutz- bzw. Wohnfläche [m<sup>2</sup>]

### 3.4.2. Energiebedarf für Trinkwarmwasser

Grundlage für die Berechnung des Energiebedarfs für TWW ist der nach der DIN V 4701-10:2003-08 [114] vordefinierte spezifische bzw. nutzflächenbezogene Energiebedarf für TWW  $q_{tW}$  von 12,5 kWh/m<sup>2</sup>\*a (Nutzenergie). Zusätzlich hierzu werden je nach Energiesystem verschiedene Übergabe- und Verteilungsverluste sowie Wärmegewinne etc. nach der DIN V 4701-10:2003-08 berücksichtigt. Hieraus resultiert der TWW-bezogene Endenergiebedarf. Aus Formel 3.18 errechnet sich der nutzflächenbezogene jährliche Endenergiebedarf für TWW  $q_{TWE}$ .

$$q_{TWE} = (q_{tW} + q_{TW,ce} + q_{TW,d} + q_{TW,s}) * (e_{TW,g} * \alpha_{g,W}) \quad (3.18)$$

- $q_{TWE}$  = spezifischer Endenergiebedarf [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{tW}$  = spezifischer Nutzenergiebedarf [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{TW,ce}$  = spezifische Wärmeverluste Übergabe [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{TW,d}$  = spezifische Wärmeverluste Verteilung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $q_{TW,s}$  = spezifische Wärmeverluste Speicherung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]  
 $e_{TW,g}$  = Wärmeerzeugeraufwandszahl [-]  
 $\alpha_{g,W}$  = Deckungsanteil Erwärmung [-]

Die hierfür notwendigen Berechnungsparameter werden nach der DIN V 4701-10:2003-08 und dem „worst-case“-Ansatz wie folgt definiert:

- $q_{TW,ce} = 0$  kWh/m<sup>2</sup>\*a
- $q_{TW,d}$  = flächenbezogene Durchschnittswerte (siehe Tabelle A.22, Anhang A, Seite 260).
- $q_{TW,s}$  = flächenbezogene Durchschnittswerte (siehe Tabelle A.23, Anhang A, Seite 260).
- $e_{TW,g}$  = basierend auf der Definition der Wärmeerzeuger über die GUI (siehe Tabellen A.24 und A.25, Anhang A, Seite 261).
- $\alpha_{g,W} = 1,0$

Um weiterführend den nutzflächenbezogenen Primärenergieaufwand für die Trinkwassererwärmung  $q_{TW,P}$  [kWh/m<sup>2</sup>\*a] zu errechnen, wird der Endenergiebedarf für das TWW  $q_{TW,E}$  mit dem spezifischen Primärenergiefaktor  $f_P$  der Primärenergieträger der definierten Wärmeerzeuger multipliziert (siehe Formel 3.19). Der spezifische Primärenergiefaktor errechnet sich aus der Summe der Produktwerte aus der Multiplikation der prozentualen Anteile der Energiesysteme für die Bereitstellung von TWW mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor des vom Wärmeerzeuger genutzten Primärenergieträgers (z. B. Öl, Gas, Holz etc.).

$$q_{TW,P} = q_{TW,E} * f_P \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} q_{TW,P} &= \text{spezifischer Primärenergieaufwand [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{TW,E} &= \text{spezifischer Endenergiebedarf TWW [kWh/m}^2\text{*a]} \\ f_P &= \text{spezifischer Primärenergiefaktor [-]} \end{aligned}$$

Hinzu kommen weiterführend die Hilfsenergien zur Trinkwarmwasserbereitstellung. Zunächst wird hierfür der flächenbezogene Endenergiebedarf für die Hilfsenergien  $q_{TW,HE,E}$  in der Formel 3.20 berechnet.

$$q_{TW,HE,E} = q_{TW,ce,HE} + q_{TW,d,HE} + q_{TW,s,HE} + (\alpha_{TW,g} * e_{TW,g}) \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} q_{TW,HE,E} &= \text{spezifischer Endenergiebedarf Hilfsenergien [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{TW,ce,HE} &= \text{spezifischer Hilfsenergiebedarf Übergabe [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{TW,d,HE} &= \text{spezifischer Hilfsenergiebedarf für Trinkwarmwasser} \\ &\quad \text{und Zirkulationsleitungen [kWh/m}^2\text{*a]} \\ q_{TW,s,HE} &= \text{spezifischer Wärmeverlust Verteilung [kWh/m}^2\text{*a]} \\ \alpha_{g,W} &= \text{Deckungsanteil Trinkwarmwassererwärmung [-]} \\ e_{TW,g} &= \text{Wärmeerzeugeraufwandszahl [-]} \end{aligned}$$

Für die Berechnung nach der Formel 3.20 werden die hierfür notwendigen Parameter wie folgt nach der DIN V 4701-10:2003-08 definiert:

- $q_{TW,ce,HE} = 0$  [kWh/m<sup>2</sup>\*a]
- $q_{TW,d,HE}$  = flächenbezogener Durchschnittswert (siehe Tabelle A.22, Anhang A, Seite 260)
- $q_{TW,s,HE}$  = flächenbezogener Durchschnittswert (siehe Tabelle A.23 im Anhang A auf Seite 260)
- $q_{TW,g,HE}$  = basierend auf der Definition der Wärmeerzeuger über die GUI (siehe Tabellen A.24 und A.25, Anhang A, Seite 261)
- $\alpha_{g,W} = 1,0$

Um weiterführend den spezifischen Primärenergieaufwand für die Hilfsenergien  $q_{TW,HE,P}$  in  $[\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}]$  zu errechnen, wird der Endenergiebedarf für die Hilfsenergien zur Trinkwarmwasserbereitstellung  $q_{TW,HE,E}$  mit dem spezifischen Primärenergiefaktor  $f_P$  multipliziert. Das passiert analog zu der Formel 3.19 auf Seite 47. Der Gesamtendenergiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitstellung  $Q_{TW,E}$  eines Gebäudes ergibt sich folglich aus der Summe des Endenergieaufwands für die Trinkwassererwärmung  $q_{TW,E}$  und des spezifischen Endenergieaufwands für die Hilfsenergien  $q_{TW,HE,E}$ , multipliziert mit der in Kapitel 3.2 beschriebenen Nutz- bzw. Wohnfläche  $A_N$  (siehe Formel 3.21). Die Berechnung des Gesamtprimärenergiebedarfs  $Q_{TW,P}$  ergibt sich analog zur Berechnung des Gesamtendenergiebedarfs aus der Formel 3.21.

$$Q_{TW,E/P} = (q_{TW,E/P} + q_{TW,HE,E/P}) * A_N \quad (3.21)$$

- $Q_{TW,E/P}$  = Gesamtprimär-/Endenergiebedarf Trinkwarmwasserbereitstellung  $[\text{kWh}/\text{a}]$
- $q_{TW,E/P}$  = spezifischer Primär-/Endenergieaufwand Trinkwarmwasserbereitstellung  $[\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}]$
- $q_{TW,HE,E/P}$  = spezifischer Primär-/Endenergieaufwand Hilfsenergien  $[\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}]$
- $A_N$  = Nutz- bzw. Wohnfläche  $[\text{m}^2]$

Der Gesamtprimär- und Endenergiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitstellung  $Q_{TW,E/P}$  fließt als Bestandteil in die Berechnung des Gesamtend- und Gesamtprimärenergiebedarfs des Gebäudes ein und bildet zudem einen Teil des Energiebedarfs der Nutzungsphase der Gebäude. Aufbauend darauf werden weiterführend die im Bezug auf den Energiebedarf anfallenden Emissionen und Kosten berechnet.

### 3.4.3. Gebäudebezogener Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf

Zur Berechnung des gebäudebezogenen Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarfs  $Q_E$ ,  $Q_P$   $[\text{kWh}/\text{a}]$  wird der Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitstellung  $Q_{TW,E}$ ,  $Q_{TW,P}$   $[\text{kWh}/\text{a}]$  aus Kapitel 3.4.2 mit dem Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf für die Raumheizung  $Q_{E,P}$ ,  $Q_{H,P}$   $[\text{kWh}/\text{a}]$  aufsummiert (siehe Formel 3.22).

$$Q_{E/P} = Q_{H,E/P} + Q_{TW,E/P} \quad (3.22)$$

- $Q_{E/P}$  = gebäudebezogener Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf  $[\text{kWh}/\text{a}]$
- $Q_{H,E/P}$  = Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf Raumheizung  $[\text{kWh}/\text{a}]$
- $Q_{TW,E/P}$  = Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf TWWbereitstellung  $[\text{kWh}/\text{a}]$

Der spezifische gebäudebezogene Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarf  $q_E$ ,  $q_P$   $[\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}]$  ist der Wert des Quotienten aus der Division des gebäudebezogenen Gesamtendenergie- und Gesamtprimärenergiebedarfs  $Q_E$ ,  $Q_P$  durch die *Nutz- bzw. Wohnfläche*  $A_N$ . Diese Werte bilden

somit die Nutzungsphase der Gebäude im Lebenszyklus ab; immer bezogen auf ein Jahr bzw. im Falle der Heizwärme bezogen auf eine Heizperiode.

Die Ergebnisse können z. B. als numerische Werte gebäudespezifisch im *3DCityDB Web-Map-Viewer* angezeigt und für die Bestimmung des Farbschemas (siehe Kapitel 3.9.2) für die Einfärbung der Gebäude im *3DCityDB Web-Map-Viewer* verwendet werden (siehe Abbildung 3.7 auf Seite 93).

#### 3.4.4. Heizlast Raumheizung

Die Heizlastberechnung erfolgt nach den Normen DIN EN 12831-1:2017-09 [110] und DIN EN 12831-3:2017-09 [111]. Diese Normen definieren ein Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast<sup>2</sup> für Raumheizung und TWW von Gebäuden. Dabei definiert sich die Heizlast als Wärmezufuhr (Leistung), die benötigt wird, um die geforderte Norm-Innentemperatur unter Norm-Außenbedingungen zu gewährleisten. Die Heizlast dient als Referenzwert für die Dimensionierung und Auslegung der Wärmeerzeuger im folgenden Kapitel 3.5.1.

Bei der Berechnung der Heizlast wird ebenso von einem Ein-Zonen-Modell ausgegangen. Die Heizlast für die Raumheizung  $\Phi_{HL,build}$  eines Gebäudes errechnet sich in Anlehnung an die DIN EN 12831-1:2017-09 (siehe Formel 3.23). Die Summe der Aufheizleistungen  $\Phi_{hu,i}$  und die Summe der Wärmegewinne  $\Phi_{gain,i}$  sind bei der Berechnung der Heizlast laut Norm optionale Größen. Wärmegewinne sind nach Unterkapitel B.2.18 der DIN EN 12831-1:2017-09 zu vernachlässigen, wenn auf nationaler Ebene keine Werte zur Berechnung verfügbar sind. Das vermag beim ersten Gedanken eine Inkonsistenz zur Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs (siehe Kapitel 3.4.1) darstellen, jedoch führt die Nichtberücksichtigung der Wärmegewinne zu einer gewünschten Überdimensionierung der Wärmeerzeuger, die an den kältesten Tagen eines Jahres hilfreich sein kann.

$$\Phi_{HL,build} = \sum(\Phi_{T,i}) + \Phi_{V,build} + \sum(\Phi_{hu,i}) - \sum(\Phi_{gain,i}) \quad (3.23)$$

$\Phi_{HL,build}$	=	Heizlast Gebäude Raumheizung [W]
$\Phi_{T,i}$	=	Summe der Transmissionswärmeverluste [W]
$\Phi_{V,build}$	=	Lüftungswärmeverluste des Gebäudes [W]
$\Phi_{hu,i}$	=	Summe Aufheizleistungen [W]
$\Phi_{gain,i}$	=	Summe Wärmegewinne [W]

Die Transmissionswärmeverluste  $\Phi_{T,i}$  durch die Wand-, Boden- und Dachflächen errechnen sich aus der Formel 3.24. Die Formel unterscheidet zwischen dem Wärmeübertragungskoeffizienten für Bauteile gegen Außenluft  $H_{T,ie}$ , angrenzende Räume  $H_{T,ia}$  und gegen Erdreich  $H_{T,ig}$ . Angrenzende Bereiche werden anhand der Soll-Innentemperatur unterschieden. Bei dem Wärmeübertragungskoeffizienten an angrenzende Räume  $H_T$  wird nochmals zwischen unterschiedlichen angrenzenden Räumen

<sup>2</sup> Im Folgenden wird zur Vereinfachung der Begriff „Heizlast“, anstatt „Norm-Heizlast“ verwendet

differenziert. Dabei beschreibt der Wärmeübertragungskoeffizient  $H_{T,ia}$  die Wärmeübertragung in einen weiteren beheizten Raum innerhalb desselben Gebäudes, der Wärmeübertragungskoeffizient  $H_{T,iaBE}$  die Wärmeübertragung in eine weitere Gebäudeeinheit innerhalb desselben Gebäudes und der Wärmeübertragungskoeffizient  $H_{T,iae}$  die Wärmeübertragung in ein benachbartes Gebäude. Da bei der Berechnung der Heizlast von einem Ein-Zonen-Modell ausgegangen wird, werden die Wärmeübertragungskoeffizienten  $H_{T,ia}$  und  $H_{T,iaBE}$  nicht mitberücksichtigt. Der Wärmeübertragungskoeffizient  $H_{T,iae}$  wird für die Wärmeübertragung zu unbeheizten Dachgeschossen oder Kellern und zu benachbarten Gebäuden berechnet.

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,ia} + H_{T,iaBE} + H_{T,iae} + H_{T,ig}) * (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad (3.24)$$

- $\Phi_{T,i}$  = Transmissionswärmeverluste [W]
- $H_{T,ie}$  = Wärmeübertragungskoeffizient gegen Außenluft [W/K]
- $H_{T,ia}$  = Wärmeübertragungskoeffizient zu angrenzenden Räumen [W/K]
- $H_{T,iaBE}$  = Wärmeübertragungskoeffizient zu weiteren beheizten Gebäudeeinheiten [W/K]
- $H_{T,iae}$  = Wärmeübertragungskoeffizient an einen unbeheizten Raum/  
eines benachbarten Gebäudes [W/K]
- $\theta_{int,i}$  = Norm-Innentemperatur [°C]
- $\theta_e$  = Norm-Außentemperatur [°C]

Der Wärmeübertragungskoeffizient gegen Außenluft  $H_{T,ie}$  berechnet sich aus der Formel 3.25 (siehe Seite 51). Als Bauteilflächen  $A_k$ , die direkt an den Außenraum grenzen, werden alle Dach-, Fenster- und Wandflächen, abzüglich der sich überschneidenden Wandflächen der Gebäude, herangezogen. Die spezifischen U-Werte  $U_k$  werden aus den bereits in Kapitel 3.2 beschriebenen baualtersklassenbezogenen Tabellen in der LCA-Datenbank entnommen. Für die pauschale Zusatzwärmeleistung zur Kompensation von Wärmebrücken  $\Delta U_{TB}$  wird nach der DIN EN 12831-1:2017-09 ein fixer Wert von  $\Delta U_{TB} = 0,10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  für alle Berechnungen angenommen. Der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses von Bauteileigenschaften  $f_{U,k}$  (Korrektur U-Wert: Einfluss Bauteileigenschaften und meteorologische Bedingungen) wird laut Norm ebenfalls auf  $f_{U,k} = 1$  gesetzt. Der Temperaturanpassungsfaktor  $f_{ix,k}$  errechnet sich weiterführend aus der Formel 3.26, 3.27 und 3.28 auf Seite 51.

$$H_{T,ie} = \sum_k (A_k * (U_k + \Delta U_{TB}) * f_{U,k} * f_{ix,k}) \quad (3.25)$$

- $H_{T,ie}$  = Wärmeübertragungskoeffizient direkt nach außen [W/K]  
 $A_k$  = Fläche des Bauteils (k) [m<sup>2</sup>]  
 $U_k$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) [W/m<sup>2</sup>\*K]  
 $\Delta U_{TB}$  = Pauschale Zusatzwärmeleistung Wärmebrücken [W/m<sup>2</sup>\*K]  
 $f_{U,k}$  = Korrekturfaktor Einfluss Bauteileigenschaften [-]  
 $f_{ix,k}$  = spezifischer Temperaturanpassungsfaktor [-]

$$f_{ix,k} = f_1 + f_2 \quad (3.26)$$

- $f_{ix,k}$  = Temperaturanpassungsfaktor [-]  
 $f_1$  = Anpassung Abweichung Temperatur Raum (x) zu Außentemperatur [-]  
 $f_2$  = Anpassung Abweichung Innentemperatur Raum (i) zu Oberflächentemperatur Bauteil (k) [-]

$$f_1 = \frac{\theta_{int,i} - \theta_x}{\theta_{int,i} - \theta_e} \quad (3.27)$$

- $f_1$  = Anpassung Abweichung Temperatur Raum (x) zu Außentemperatur [-]  
 $\theta_{int,i}$  = Innentemperatur des beheizten Raumes (i) [°C]  
 $\theta_x$  = Temperatur des angrenzenden Raumes/Erdreichs (x) [°C]  
 $\theta_e$  = Außentemperatur [°C]

$$f_2 = \frac{\theta^*_{int,k} - \theta_{int,i}}{\theta_{int,i} - \theta_e} \quad (3.28)$$

- $f_2$  = Anpassung Abweichung Innentemperatur Raum (i) zu Oberflächentemperatur Bauteil (k) [-]  
 $\theta^*_{int,i}$  = Mittlere Temperatur der Bauteilinnenfläche (k) [°C]  
 $\theta_x$  = Temperatur des angrenzenden Raumes/Erdreich (x) [°C]  
 $\theta_e$  = Außentemperatur [°C]

In den Formeln 3.27 und 3.28 wird die Norm-Innentemperatur  $\theta_{int,i}$  nach der DIN EN 12831-1:2017-09 auf  $\theta_{int,i} = 20$  °C für Wohn- und Schlafräume gesetzt.

Die Temperatur des angrenzenden Raumes/Erdreichs  $\theta_x$  wird nach der DIN EN 12831-1:2017-09 bestimmt. Für Wärmeverluste an das Erdreich wird das ortsspezifische Jahresmittel der Außentemperatur ermittelt und eingesetzt. Das Jahresmittel der Außentemperatur  $\theta_{m,e}$  ergibt sich aus der DIN EN 12831-1:2017-09. Die Werte für das Jahresmittel der Außentemperatur  $\theta_{m,e}$  und die Norm-Außentemperatur  $\theta_e$  werden, spezifisch zur in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Eingabe der Postleitzahl, standortbezogen ermittelt und für die Berechnung verwendet. Die Temperatur des angrenzenden Raumes oder Erdreichs  $\theta_x$  wird bei der Berechnung der Wärmeverluste an angrenzende beheizte und unbeheizte Gebäude als  $\theta_{m,e}$  bezeichnet. Liegt dieser Wert über 5 °C, dann werden 5 °C als Temperatur bestimmt. Die mittlere Temperatur der Innenflächen des Bauteils (k)  $\theta_{int,i}$  ergibt sich aus der DIN EN 12831-1:2017-09. Diese besagt, dass bei Raumhöhen unter vier Metern die Anpassung der Innentemperatur Raum (i) zur Oberflächentemperatur des Bauteils (k)  $f_2$  mit  $f_2 = 0$  angenommen wird. Im Rahmen der Studie „Optimierte Wohnungsbau-Untersuchung und Umsetzungsbetrachtung zum bautechnisch- und kostenoptimierten Mietwohnungsbau in Deutschland“ der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. [133] wurden statistische Marktbeobachtungen für den Wohnungsbau durchgeführt. Resultat dieser Studie ist unter anderem die Definition eines „Wohnungsbau-Typengebäudes“. Für dieses Typengebäude wird eine lichte Raumhöhe von 2,50 m angegeben. Ergeben sich aus den Informationen aus dem 3D-Stadtmodell gebäudespezifische Raumhöhen über vier Meter, dann berechnet urbi+ die Geschossanzahl neu und gibt dabei eine mittlere Geschosshöhe von drei Metern an. Diese Korrektur wird gewählt, um bei der Betrachtung großer Wohngebäudebestände der durchschnittlichen Wohngebäudetypologie zu entsprechen. Zudem können fälschlich über- und unterdimensionierte Geschosshöhen zu unkorrekten Berechnungsergebnissen führen.

Der Wärmeübertragungskoeffizient an angrenzende Gebäude  $H_{T,iae}$  errechnet sich weiterführend nach der Formel 3.29. Er gilt für angrenzende Gebäude  $H_{T,iae}$  nur für die Bauteilflächen (k), die anhand der *SharedWallSurfaces*-Berechnung errechnet wurden, also für Wandflächen, die sich zwei oder mehrere Gebäude „teilen“. Die Ermittlung des U-Werts  $U_k$  des spezifischen Bauteils (k) verläuft analog zu dem schon beim „Wärmeübertragungskoeffizienten direkt nach außen“  $H_{T,ie}$  beschriebenen Verfahren. Der spezifische Temperaturanpassungsfaktor  $f_{ia,k}$  errechnet sich aus den bereits genannten Formeln 3.26, 3.27 und 3.28 auf Seite 51.

$$H_{T,iae} = \sum_k (A_k * (U_k * f_{ia,k})) \quad (3.29)$$

- $H_{T,iae}$  = Wärmeübertragungskoeffizient an angrenzende Räume [W/K]
- $A_k$  = Fläche des Bauteils (k) [m<sup>2</sup>]
- $U_k$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) [W/m<sup>2</sup>\*K]
- $f_{ia,k}$  = spezifischer Temperaturanpassungsfaktor [-]

Der Wärmeübertragungskoeffizient an das Erdreich  $H_{T,ig}$  wird nach der Formel 3.30 auf Seite 53 berechnet. Das gilt jedoch nur für Gebäude ohne Unterkellerung. Besitzt ein Gebäude eine Unterkellerung, dann wird für die Bodenplatte der Wärmeübertragungskoeffizient an angrenzende unbeheizte

Räume  $H_{T,iae}$  berechnet.

Für den Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der jährlichen Schwankungen der Außentemperatur  $f_{\theta_{ann}}$  wird nach der DIN EN 12831-1:2017-09 ein fixer Wert von  $f_{\theta_{ann}} = 1,45$  für alle Berechnungen bestimmt. Der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses von Grundwasser  $f_{GW,k}$  ergibt sich ebenfalls aus der DIN EN 12831-1:2017-09 und wird nach dem „worst-case“ mit  $f_{GW,k} = 1,15$  für alle Berechnungen angenommen. Der Wert spiegelt einen Abstand zwischen dem angenommenen Wasserspiegel und der Bodenplatte von  $\leq 1$  m wieder. Der spezifische Temperaturanpassungsfaktor  $f_{ig,k}$  ermittelt sich aus dem bereits genannten Wärmedurchgangskoeffizienten. Der äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) zum Erdreich errechnet sich nach der Formel 3.31.

$$H_{T,ig} = f_{\theta_{ann}} * \sum_k (A_k * (U_{\text{äquiv},k} * f_{ig,k} * f_{GW,k})) \quad (3.30)$$

- $H_{T,ig}$  = Wärmeübertragungskoeffizient an angrenzende Räume [W/K]
- $f_{\theta_{ann}}$  = Korrekturfaktor für jährliche Schwankung der Außentemperatur [-]
- $A_k$  = Fläche des Bauteils (k) [m<sup>2</sup>]
- $U_{\text{äquiv},k}$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) zum Erdreich [W/m<sup>2</sup>\*K]
- $f_{ig,k}$  = spezifischer Temperaturanpassungsfaktor [-]
- $f_{GW,k}$  = Korrekturfaktor Einfluss von Grundwasser [-]

$$U_{\text{äquiv},k} = \frac{a}{b + (c_1 + B')^{n_1} + (c_2 + z)^{n_2} + (c_3 + U_k + \Delta U_{TB})^{n_3}} + d \quad (3.31)$$

- $U_{\text{äquiv},k}$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) zum Erdreich [W/m<sup>2</sup>\*K]
- $a, b, c, d, n$  = Fallspezifische Parameter [-]
- $B'$  = Geometrischer Parameter der Bodenplatte [m]
- $z$  = Tiefe Oberkante der Bodenplatte [m]
- $U_k$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) in Kontakt mit Erdreich [W/m<sup>2</sup>\*K]
- $\Delta U_{TB}$  = Pauschaler Wärmebrückenzuschlag [W/m<sup>2</sup>\*K]

Die fallspezifischen Parameter  $a, b, c, d, n$  können der Tabelle A.11 und A.12 im Anhang A (siehe Seite 254) entnommen werden. Der geometrische Parameter der Bodenplatte  $B'$  errechnet sich wiederum aus Formel 3.32 auf Seite 54. Dabei wird die Fläche der Bodenplatte  $A_g$  und der exponierte Umfang der Bodenplatte  $P$  mit der bereits in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Methode ermittelt. Die Tiefe der Oberkante der Bodenplatte unterhalb der Erdoberkante  $z$  ergibt sich aus dem gebäudespezifischen Parameter *StoreysBelowGround* der aus dem 3D-Stadtmodell gelesen wird. Die Anzahl der Geschosse der Unterkellerung wird mit dem angenommenen Wert von 2,50 m für die Raumhöhe jedes Geschosses der Unterkellerung multipliziert. Der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils (k) in Kontakt mit dem Erdreich  $U_k$  wird gleich wie die U-Werte für die Berechnung der bereits beschrie-

benen Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt. Der pauschale Wärmedurchgangskoeffizient für Wärmebrücken  $\Delta U_{TB}$  wird mit  $\Delta U_{TB} = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  als „worst-case“ für nicht beschädigte Gebäude nach der DIN EN 12831-1:2017-09 angenommen.

$$B' = \frac{A_g}{0,5 * P} \quad (3.32)$$

$B'$  = geometrischer Parameter der Bodenplatte [m]

$A_g$  = Fläche der Bodenplatte [m<sup>2</sup>]

$P$  = exponierter Umfang der Bodenplatte [m]

Die für die Heizlastberechnung noch fehlende Ermittlung der Norm-Lüftungswärmeverluste  $\Phi_{V,build}$  eines Gebäudes richtet sich nach der Formel 3.33. Das Volumen des Gebäudes  $V_{build}$  erschließt sich als Ergebnis aus der Volumenberechnung im *Voluminator 2.0* (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.3.4) und wird für die Berechnung der Norm-Lüftungswärmeverluste  $\Phi_{V,build}$  herangezogen. Die Luftwechselrate des Gebäudes  $n_{build}$  ergibt sich direkt aus der DIN EN 12831-1:2017-09 und richtet sich nach dem jeweiligen Baujahr des betrachteten Gebäudes:

- Baujahr  $\geq 1995$ :  $n_{build} = 0,15 \text{ h}^{-1}$
- Baujahr  $< 1995$ :  $n_{build} = 0,5 \text{ h}^{-1}$
- Baujahr  $< 1977$ :  $n_{build} = 1,0 \text{ h}^{-1}$

Die Stoffkonstante der Luft  $\rho_L * c_{p,L}$  wird mit  $\rho_L * c_{p,L} = 0,34 \text{ Wh/m}^3\text{K}$  für die Berechnung ebenfalls nach der Norm festgesetzt. Die Norm-Innentemperatur  $\theta_{int,build}$  definiert sich nach der DIN EN 12831-1:2017-09 auf einen Wert von  $\theta_{int,build} = 20 \text{ °C}$  für Wohn- und Schlafräume.

$$\Phi_{V,build} = V_{build} * n_{build} * \rho_L * c_{p,L} * (\theta_{int,build} - \theta_e) \quad (3.33)$$

$\Phi_{V,build}$  = Norm-Lüftungswärmeverluste [W]

$V_{build}$  = Innenvolumen Gebäude [m<sup>3</sup>]

$n_{build}$  = Luftwechselrate Gebäude [h<sup>-1</sup>]

$\rho_L * c_{p,L}$  = Stoffkonstante Luft [Wh/m<sup>3</sup>\*K]

$\theta_{int,build}$  = Innentemperatur Gebäude [°C]

$\theta_e$  = Außentemperatur [°C]

Mit der Summe der Transmissionswärme-  $\Phi_{T,i}$  und Lüftungswärmeverluste des Gebäudes  $\Phi_{V,build}$  kann folglich die gesamte Heizlast zur Raumheizung  $\Phi_{HL,build}$  errechnet werden. Die Heizlast des Gebäudes dient weiterführend zur Dimensionierung der Heizungsanlage und weiterer Komponenten der TGA in Kapitel 3.5.1 auf Seite 56.

### 3.4.5. Heizlast Trinkwarmwasserbereitstellung

Die Heizlast für TWW wird nach dem vereinfachten Verfahren mittels Jahresendenergieverbrauch ermittelt. Hierfür wird der Jahresendenergieverbrauch für die Trinkwassererwärmung des Gebäudes [kWh/a] aus Kapitel 3.4.2 auf Seite 46 herangezogen. Die Heizlast für TWW ergibt sich weiterführend aus der Formel 3.34. Dabei werden die täglichen Volllaststunden der Wärmeerzeuger für die Trinkwarmwasserbereitstellung  $t_d$  nach der DIN EN 12831-3:2017-09 mit vier Stunden angenommen. Die Tage der Trinkwarmwasserperiode  $d_w$  beziehen sich auf ein gesamtes Jahr mit 365 Tagen.

$$\Phi_{HL,TWW} = \frac{Q_{TW,E}}{t_d * d_w} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{HL,TWW} &= \text{Heizlast TWW [W]} \\ Q_{TW,E} &= \text{Gesamtendenergiebedarf [kWh/a]} \\ t_d &= \text{tägliche Vollbenutzungsstunden Wärmeerzeuger [h]} \\ d_w &= \text{Tage Trinkwarmwasserperiode [d]} \end{aligned}$$

### 3.4.6. Gebäudebezogene Gesamtheizlast

Die Addition der Heizlast für Raumheizung und TWW resultiert in der Gesamtheizlast des Gebäudes  $\Phi_{HL,G}$  (siehe Formel 3.35), die von den gewählten Wärmeerzeugern für die Raumheizung und das TWW gedeckt werden. Diese Auslegung bzw. Dimensionierung der Wärmeerzeuger und aller zudem berücksichtigten TGA-Komponenten wird in Kapitel 3.5.1 weiter ausgeführt.

$$\Phi_{HL,G} = \Phi_{HL,build} + \Phi_{HL,TWW} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{HL,G} &= \text{Gebäudebezogene Gesamtheizlast [W]} \\ \Phi_{HL,build} &= \text{Heizlast Gebäude Raumheizung [W]} \\ \Phi_{HL,TWW} &= \text{Heizlast Trinkwarmwasser [W]} \end{aligned}$$

## 3.5. Dimensionierung und Auslegung der betrachteten TGA-Komponenten

In den folgenden Unterkapiteln wird die Dimensionierung und Auslegung der in Kapitel 3.2.1 und Tabelle A.6 im Anhang A (siehe Seite 251) aufgeführten TGA-Komponenten beschrieben. Die Dimensionierung dient in einem weiteren Schritt der direkten Verrechnung mit den LCA- und LCC-Datensätzen aus der LCA- und LCC-Datenbank.

### 3.5.1. Dimensionierung der Wärmeerzeuger

Die Dimensionierung der Wärmeerzeuger lässt sich anhand der aus der Berechnung der Heizlast für Raumheizung und TWW resultierenden Ergebnisse vornehmen. Die in Tabelle A.6 im Anhang A (siehe Seite 251) aufgeführten Wärmeerzeuger werden bei der Dimensionierung berücksichtigt. Da bei der Berechnung der Heizlast bzw. bei der Definition der Annahmen zur Berechnung der Heizlast bereits vom „worst-case“ ausgegangen wurde, werden keine weiteren Aufschläge bei der Dimensionierung der Wärmeerzeuger berücksichtigt. Um jedoch die Effizienz des Wärmeerzeugers überschlägig mit zu bilanzieren, wird die Heizlast mit den bereits für die Berechnung der Endenergie verwendeten Wärmeerzeugeraufwandszahlen aus Kapitel 3.4.1 multipliziert (siehe Tabellen A.29, A.30 und A.25, Anhang A, Seiten 263 ff.).

Eine Wärmepumpe hat somit nach der Norm einen besseren Wirkungsgrad als ein Gas-Kessel oder eine gebäudeseitige Fernwärmeabnahmestation. Die Dimensionierung einer Wärmepumpe fällt also für ein und dasselbe Haus kleiner aus als die Dimensionierung einer Fernwärmeabnahmestation. Der sich aus der Multiplikation der Heizlast mit der Wärmeerzeugeraufwandszahl ergebende Wert stellt somit eine wirkungsgradbezogene Dimensionierung des jeweiligen Wärmeerzeugers dar.

Wärmeerzeuger lassen sich herstellerepezifisch in bestimmte Leistungsbereiche einordnen. Das bedeutet, dass ein Gerät mit einer Nennleistung von z. B. 25 kW sowohl in einem Gebäude mit einer Heizlast von 20 kW als auch in einem Gebäude mit einer Heizlast von 25 kW eingesetzt werden kann. Dies kann dazu führen, dass ein Gerät in Bezug auf die Heizlast unter Umständen überdimensioniert ist. Es kann somit sein, dass ein Gebäude mit geringerer Heizlast möglicherweise keine geringeren Grauen Energien und Emissionen aufweist als ein Gebäude mit einer höheren Heizlast, da derselbe Wärmeerzeuger eingesetzt wird. Im Falle der in dieser Dissertation durchgeführten Dimensionierung werden diese hersteller- und wärmeerzeugerbezogenen Spezifika nicht mitberücksichtigt. Denn werden Berechnungen und Analysen auf der Basis großer Gebäudebestände mit einer Wärmeerzeugerverteilung von 80 % durch einen Gas-Kessel und 20 % durch einen Öl-Kessel durchgeführt, dann wird diese prozentuale Aufteilung für alle spezifischen Gebäudeberechnungen angenommen. Das liegt daran, dass keine gebäudespezifischen Informationen zu verbauten Wärmeerzeugern in den zur Verfügung stehenden 3D-Stadtmodellen vorliegen. Dies muss bei der Dimensionierung von Wärmeerzeugern auf der Basis großer Gebäudebestände, speziell bei der Betrachtung von gebäudebezogenen Einzelergebnissen, beachtet werden.

Die Ergebnisse zu wärmeerzeugerspezifischen Dimensionierungen dienen zur übergeordneten Entscheidungsfindung und zum Szenarienvergleich, nicht jedoch für die gebäudespezifische Planung und Auslegung von Wärmeerzeugern. Die gleiche Herausforderung ergibt sich bei der Dimensionierung der Warmwasserspeicher (siehe Kapitel 3.5.9 auf Seite 66). Auch hier werden keine herstellerbezogenen Spezifika bei der Dimensionierung berücksichtigt.

### 3.5.2. Dimensionierung Öl-Tank

Wenn Öl-Kessel als Wärmeerzeuger herangezogen werden, dann müssen zusätzlich dazu auch die Öl-Tanks mit dimensioniert und betrachtet werden. Die Dimensionierung des Öl-Tanks berechnet sich nach der folgenden Formel 3.36.

$$V_{\text{Tank}} = \frac{Q_E}{E_{\text{Öl}}} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{Tank}} &= \text{Volumen Öl-Tank [l]} \\ Q_E &= \text{Gebäudebezogener Gesamtenergiebedarf [kWh/a]} \\ E_{\text{Öl}} &= \text{Energieinhalt Heizöl [kWh/l]} \end{aligned}$$

Dabei wird der gebäudebezogene Gesamtenergiebedarf  $Q_E$  aus Kapitel 3.4.3 auf Seite 48 herangezogen und der Energieinhalt des Öls  $E_{\text{Öl}}$  mit 10 kWh/l angenommen [134].

### 3.5.3. Dimensionierung der Fläche der Solarthermieanlage

Als Ausführungsvarianten für die Solarthermieanlagen werden Flach- und Vakuumröhrenkollektoren berücksichtigt. Zur Berechnung der Fläche der Solarthermie-Anlage, die zur Deckung der Heizlast für die Bereitstellung von TWW benötigt wird, muss zunächst der durchschnittliche Wirkungsgrad der Ausführungsvarianten ermittelt werden. Der Wirkungsgrad des Vakuumröhrenkollektors  $\eta_{VR}$  und der des Flachkollektors  $\eta_{FK}$  berechnet sich nach der Formel 3.38 auf Seite 58. Dabei werden die Wärmeverlustbeiwerte  $k_1$  und  $k_2$  für die Berechnung des Wirkungsgrades des Vakuumröhrenkollektors mit  $k_1 = 1,5$  und  $k_2 = 0,005$  angenommen. Für die Berechnung des Wirkungsgrades des Flachkollektors sind die Werte mit  $k_1 = 4$  und  $k_2 = 0,02$  definiert. Der optische Wirkungsgrad  $\eta_0$  wird für den Vakuumröhrenkollektor mit 84 % und für den Flächenkollektor mit 80 % angenommen [135]. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ergibt sich aus der Formel 3.39 auf Seite 58, wobei die Mindesttemperatur für Warmwasser  $\theta_{TWW}$  60 °C beträgt. Dieser Wert orientiert sich an den Angaben aus der DIN 1988-200:2012-05 [136]. Hinzu kommen Wärmeverluste durch Übergabe und Transport. Die Bestrahlungsstärke  $E_g$  wird für beide Kollektoren mit  $E_g = 274 \text{ W/m}^2$  angegeben. Dieser Wert ist als die durchschnittlich tagsüber anfallende Leistung der Globalstrahlung in Deutschland festgelegt [137].

$$A_{\text{Solarthermie}} = \frac{\Phi_{\text{HL,TWW}}}{\eta_{\text{VR/FK}} * E_g} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Solarthermie}} &= \text{Fläche Solarthermieanlage [m}^2\text{]} \\ \Phi_{\text{HL,TWW}} &= \text{Heizlast TWW [W]} \\ \eta_{\text{VR/FK}} &= \text{Wirkungsgrad [-]} \\ E_g &= \text{Bestrahlungsstärke [W/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{VR/FK}} = \eta_0 - \frac{k_1 * \Delta\theta}{E_g} - \frac{k_2 * \Delta\theta^2}{E_g} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{VR/FK}} &= \text{Wirkungsgrad [-]} \\ \eta_0 &= \text{optischer Wirkungsgrad [-]} \\ k_1 &= \text{Wärmeverlustbeiwert [W/m}^2\text{*K]} \\ k_2 &= \text{Wärmeverlustbeiwert [W/m}^2\text{*K}^2\text{]} \\ \Delta\theta &= \text{Temperaturdifferenz [}^\circ\text{C]} \\ E_g &= \text{Bestrahlungsstärke [W/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

$$\Delta\theta = \theta_{\text{TWW}} - \theta_{\text{m,e}} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \text{Temperaturdifferenz [}^\circ\text{C]} \\ \theta_{\text{TWW}} &= \text{Mindesttemperatur Warmwasser [}^\circ\text{C]} \\ \theta_{\text{m,e}} &= \text{Jahresmittel der Außentemperatur [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

Nach der Formel 3.37 errechnet sich folglich überschlägig die benötigte Fläche der Solarthermieanlage zur Deckung des TWW-Bedarfs. Der Wirkungsgrad  $\eta_{\text{VR/FK}}$  wird als Durchschnittswert aus den Wirkungsgraden der beiden Ausführungsvarianten der Solarthermieanlagen definiert. Die Heizlast für TWW ergibt sich aus Kapitel 3.4.5 auf Seite 55.

### 3.5.4. Dimensionierung der Sondenlänge der Erdwärmesonden

Die Berechnung der Sondenlänge von Erdwärmesonden richtet sich maßgeblich nach der Heizlast des Gebäudes für Heizung und TWW  $\Phi_{\text{HL,G}}$  (siehe Kapitel 3.4.6 auf Seite 55) und somit nach der Entzugsleistung der Wärmepumpe  $P_E$  und deren spezifischer Entzugsleistung bei unterschiedlichen Bodenarten  $P_s$  (siehe Formel 3.40 auf Seite 59). Die Entzugsleistung der Wärmepumpe  $P_E$  errechnet sich aus Formel 3.41 auf Seite 59. Die Leistungszahl (Coefficient of Performance (COP)) der Wärmepumpen wird pauschal mit 3,1 (bei 2 °C Außenlufttemperatur und 35 °C Vorlauftemperatur) angenommen. Dieser Wert ermittelt sich aus den Wärmepumpen-Definitionen der Ökobaudat [59].

Die spezifische Entzugsleistung  $P_s$  wird aus der Übersicht der spezifischen Entzugsleistung unterschiedlicher Bodenarten nach VDI-Richtlinie 4640 [138] ermittelt (siehe Tabelle A.34, Anhang A, Seite 265). Hieraus lässt sich über alle Bodenarten hinweg eine mittlere Entzugsleistung von 50 W/m errechnen.

$$l_{\text{Sonde}} = \frac{P_E}{P_s} \quad (3.40)$$

- $l_{\text{Sonde}}$  = Sondenlänge [m]
- $P_E$  = Entzugsleistung Wärmepumpe [W]
- $P_s$  = spezifische Entzugsleistung [W/m]

$$P_E = \Phi_{\text{HL,build}} * \left(1 - \frac{1}{\text{COP}}\right) \quad (3.41)$$

- $P_E$  = Entzugsleistung Wärmepumpe [W]
- $\Phi_{\text{HL,build}}$  = Heizlast TWW [W]
- $\text{COP}$  = Leistungszahl Wärmepumpe [-]

Zudem kann die Materialmasse der Erdsonden berechnet werden. Die Berechnung basiert auf der Massendefinition in den Ökobaudat-Datensätzen für Strom-Wärmepumpenrohre (Sole-Wasser, Erdsonde). Dazu wird ein Wert von 24,3 kg/kW Wärmepumpenleistung angenommen. Die Berechnung der Materialmasse der Erdsonden ist für die spätere Validierung der Methode vonnöten und wird aufgrund dessen an dieser Stelle mit aufgeführt.

### 3.5.5. Dimensionierung Erdwärmekollektoren

Die Dimensionierung von Erdwärmekollektoren (Flächenkollektoren) richtet sich nach den in der Ökobaudat definierten Werten [139] für die Schlauchlängen der Kollektoren (inklusive der Zuleitungen) und deren Gewicht. Diese lassen sich auf jeweils 1 Kilowatt [kW] Wärmepumpenleistung beziehen und für die Dimensionierungen verwenden. Pro kW Wärmepumpenleistung werden 50 m Schlauchlänge der Kollektoren angenommen. Dabei wiegt 1 m Kollektorschlauch 0,282 kg.

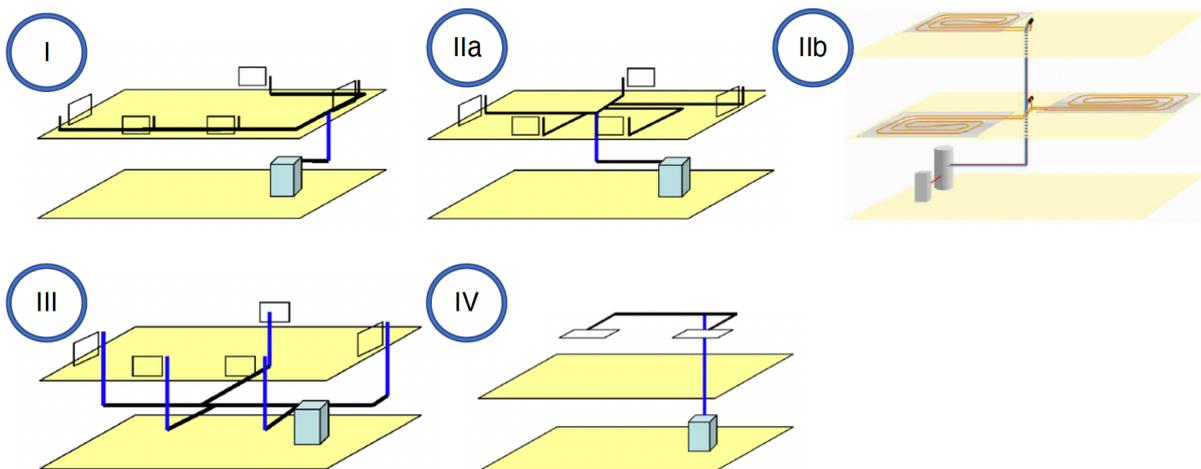
### 3.5.6. Dimensionierung Brunnensystem

Die Dimensionierung von Brunnensystemen der Wasser-Wasser-Wärmepumpe erfolgt nach den Angaben in der Ökobaudat [139]. Daraus ergibt sich eine Dimensionierung des Brunnensystems (Sonden/Kollektoren inklusive der Zuleitungen) anhand der Wärmepumpenleistung. Pro Kilowatt Wärmepumpenleistung werden 1,5 kg Polyethylen-Rohr, das als Sonde in den Boden führt, angenommen.

### 3.5.7. Dimensionierung Rohrleitungen

Die Dimensionierung der Leitungslängen für das Warmwasserheizungs-Rohrnetz erfolgt nach der DIN V 18599-5:2018-09 [85] und dem Bericht zur *Vereinfachung des Berechnungsverfahrens von Rohrleitungslängen für eine Fortschreibung der DIN V 18599 Teil 5 und 8* von Jagnow et al. [140]. Die darin beschriebene, vereinfachte Methode wird laut der Norm zur Dimensionierung herangezogen, wenn keine detaillierten Rohrnetzpläne vorliegen. Für die Berechnungen müssen die Leitungslänge zwischen den Wärmeerzeugern und vertikalen Steigleitungen  $L_{V, heiz}$ , die Leitungslänge der Strangleitungen  $L_{S, heiz}$  und die Leitungslänge der Anbindeleitungen zwischen den zirkulierenden Leitungsabschnitten und Heizkörpern  $L_{A, heiz}$  für fünf verschiedene Heizungsverteilsysteme berücksichtigt werden (siehe Abbildung 3.5 auf Seite 60):

- Etagenringtyp (I)
- Etagenverteiltertyp Heizkörper (IIa)
- Etagenverteiltertyp Fußbodenheizung (IIb)
- Steigestrangtyp (III)
- Strahlungs- und Luftheizung (IV)



**Abbildung 3.5.:** Leitungssysteme für die Raumheizung (Quelle: [85])

Die Berechnungen der Leitungslängen für den *Etagenringtyp (I)* ergeben sich aus den Formeln 3.42, 3.43 und 3.44 auf Seite 61. Die fixen Berechnungsparameter  $c_{1-8}$  für alle Heizungsverteilsysteme sind der Tabelle A.35 im Anhang A (siehe Seite 266) zu entnehmen.

$$L_{V, I} = c_1 + c_2 * A^{c_3} \quad (3.42)$$

- $L_{V, I}$  = Länge zwischen Wärmeerzeuger und vertikalen Steigleitungen [m]  
 $c_{1-3}$  = Fixe Berechnungsparameter [-]  
 $A$  = Netto-Grundfläche [m<sup>2</sup>]

$$L_{S, I} = c_4 * A^{c_5} + c_6 * A * H * N \quad (3.43)$$

- $L_{S, I}$  = Länge Strangleitungen [m]  
 $c_{4-6}$  = Fixe Berechnungsparameter [-]  
 $A$  = Netto-Grundfläche [m<sup>2</sup>]  
 $H$  = Mittelwert der Geschosshöhe [m]  
 $N$  = Anzahl versorgter Geschosse [-]

$$L_{A, I-IV} = c_7 * A^{c_8} \quad (3.44)$$

- $L_{A, I-IV}$  = Länge Strangleitungen [m]  
 $c_{7, 8}$  = Fixe Berechnungsparameter [-]  
 $A$  = Netto-Grundfläche [m<sup>2</sup>]

Die Berechnungen der Leitungslängen für den *Etagenverteiltertyp Heizkörper (IIa)*, *Etagenverteiltertyp Fußbodenheizung (IIb)* und *Steigestrangtyp (III)* ergeben sich aus den folgenden Formeln 3.45, 3.46 und 3.44:

$$L_{V, II-III} = c_1 + c_2 * (A/N)^{c_3} \quad (3.45)$$

- $L_{V, II-III}$  = Länge zwischen Wärmeerzeuger und vertikalen Steigleitungen [m]  
 $c_{1-3}$  = Fixe Berechnungsparameter [-]  
 $A$  = Netto-Grundfläche [m<sup>2</sup>]  
 $N$  = Anzahl versorgter Geschosse [-]

$$L_{S, II-III} = c_5 * A^{c_6} + c_6 * A * H * N \quad (3.46)$$

$L_{S, II-III}$	=	Länge Strangleitungen [m]
$c_{5, 6}$	=	Fixe Berechnungsparameter [-]
$A$	=	Netto-Grundfläche [m <sup>2</sup> ]
$H$	=	Mittelwert der Geschosshöhe [m]
$N$	=	Anzahl versorgter Geschosse [-]

Ein arithmetischer Durchschnittswert wird aus den vier relevanten Heizungsverteilsystemen (siehe Abbildung 3.5 auf Seite 60) für  $L_{V, heiz}$ ,  $L_{S, heiz}$  und  $L_{A, heiz}$  errechnet, der zur weiterführenden Berechnung der LCA herangezogen wird.

Die Dimensionierung der Rohrleitungen des Trinkwarmwassernetzes wird nach der DIN V 18599-8:2018-09 bestimmt. Dabei wird ebenfalls zwischen der Leitungslänge zwischen den Wärmeerzeugern und den vertikalen Steigleitungen  $L_V$ , der Leitungslänge der Strangleitungen  $L_S$  und der Leitungslänge der Anbindeleitungen zwischen den zirkulierenden Leitungsabschnitten und den Zapfstellen  $L_A$  unterschieden. Hierbei werden drei verschiedene Trinkwarmwassersysteme berechnet. Bei der Kalkulation der Leitungslängen für die Trinkwarmwassersysteme im Gebäude wird ebenfalls von einem Ein-Zonen-Modell ausgegangen. Es wird zwischen folgenden drei Trinkwarmwassersystemen unterschieden:

- Steigstrangtyp (I)
- Ebenentyp (II)
- Dezentrale Versorgung (III)

Die Berechnung der Leitungslängen  $L_V$ ,  $L_S$  und  $L_A$  für den *Steigstrangtyp (I)* ergibt sich aus der Formel 3.47. Ebenso wie bei der Errechnung der Leitungslängen für den *Etagenverteiltertyp Heizkörper (IIa)*, *Etagenverteiltertyp Fußbodenheizung (IIb)* und *Steigstrangtyp (III)* werden die Formeln 3.46 und 3.44 verwendet. Die fixen Berechnungsparameter  $c_{1-8}$  für alle Trinkwarmwassersysteme ergeben sich dabei aus Tabelle A.36 im Anhang A (siehe Seite 266).

$$L_{V, I, ww} = c_2 * (A/N)^{c_3} \quad (3.47)$$

$L_{V, I, ww}$	=	Länge zwischen Wärmeerzeuger und vertikalen Steigleitungen [m]
$c_{2, 3}$	=	Fixe Berechnungsparameter [-]
$A$	=	Netto-Grundfläche [m <sup>2</sup> ]

Die Ermittlung der Leitungslängen für den *Ebenentyp (II)* ergeben sich aus der Formel 3.47 und den bereits definierten Formeln 3.46 und 3.44.

Im Falle der *Dezentralen Versorgung (III)* (z. B. durch elektrische Durchlauferhitzer) werden die Leitungslängen der Anbindeleitungen  $L_A$  zwischen dem dezentralen Warmwassererzeuger und der Zapfstelle sowie den Strangleitungen  $L_A$  berücksichtigt, welche nach der Formel 3.44 und 3.46 zu berechnen sind. Zusätzlich zur Länge der Rohrleitungen muss auch das für die LCA notwendige Volumen bzw. die Masse des Materials der Rohrleitungen ermittelt werden. Dafür wird zunächst der Rohrinne Durchmesser  $d_i$ , siehe Formel 3.48, ermittelt. Die Fließgeschwindigkeit  $v$  wird nach der DIN EN 806-3-2006-07 [141] mit einem Maximalwert von 2 m/s für Sammel-, Zu-, Steig- und Stockwerkleitungen der Heizungs- sowie Trinkwasserrohre angenommen. Dieser Maximalwert wird im Rahmen dieser Methode ebenfalls für alle Berechnungen herangezogen.

$$d_i = \sqrt{\frac{4 * \dot{V}}{v * \pi}} \quad (3.48)$$

- $d_i$  = Rohrinne Durchmesser [m]
- $\dot{V}$  = Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]
- $v$  = Fließgeschwindigkeit [m/s]

Aus der Formel 3.49 wird der Volumenstrom  $\dot{V}$  errechnet [142]. Die Wärmeleistung  $\dot{Q}$  für die Bestimmung der Heizungsleitungen, entspricht der bereits in Kapitel 3.23 aufgeführten Heizlast des Gebäudes  $\Phi_{HL,build}$  (siehe Formel 3.23). Für die Ermittlung der Trinkwarmwasserleitungen für die Bereitstellung des TWW  $\Phi_{HL,TWW}$  wird die Heizlast für TWW (siehe Formel 3.34) herangezogen. Für Wasser, das als Medium innerhalb der Rohrleitungen angenommen wird, wird eine spezifische Wärmekapazität von  $\rho * c_p = 1,16 \text{ kWh/m}^3\text{K}$  festgesetzt. Die Temperaturdifferenz  $\Delta\theta_H$  ergibt sich aus der in Kapitel 3.5.8 ermittelten Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf im Heizungssystem. Für die Plattenheizkörper werden die Temperaturspreizungen 70/55/20 °C und 55/45/20 °C verwendet. Die Temperaturspreizungen 55/45/20 °C, 50/40/20 °C und 45/35/2 °C, jeweils mit einer Temperaturdifferenz von 10 °C, werden bei den Fußbodenheizungen berücksichtigt [143]. Daraus ergeben sich Durchschnittswerte für Vor- und Rücklauftemperaturen, die sich an den in der GUI gewählten Energiesystemen orientieren.

Bei der Berechnung der Trinkwarmwasserleitungen wird rechnerisch die Temperaturdifferenz  $\Delta\theta_W$  des Warmwassers entlang aller Strömungswege nach der DIN 1988-300:2012-05 bestimmt (siehe Formel 3.50 auf Seite 64) [144]. Die Temperaturdifferenz des Warmwassers am Trinkwassererwärmer  $\Delta\theta_{TE}$  wird laut der Norm mit 4 - 5 K angegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Durchschnittswert von 4,5 K für die Berechnungen angesetzt.

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{\rho * c_p * \Delta\theta} \quad (3.49)$$

- $\dot{V}$  = Volumenstrom [l/h]  
 $\dot{Q}$  = Wärmeleistung [W]  
 $\rho$  = Dichte [kg/l]  
 $c_p$  = Wärmespeicherkapazität [Wh/kg\*K]  
 $\Delta\theta_{H/W}$  = Temperaturdifferenz Heizung/Warmwasser [K]

$$\Delta\theta_W = \frac{\Delta\theta_{TE}}{2} \quad (3.50)$$

- $\Delta\theta_W$  = Temperaturdifferenz Warmwasser [K]  
 $\Delta\theta_{TE}$  = Temperaturdifferenz TWW am Trinkwarmwassererwärmer [K]

Der sich aus den vorangegangenen Formeln ergebene Volumenstrom  $\dot{V}$  wird von der Einheit [l/h] in die Einheit [m<sup>3</sup>/s] durch die Multiplikation mit dem Faktor 2,75E<sup>-07</sup> umgerechnet und kann in der Formel 3.48 zur Bestimmung des Rohrinnehdurchmessers  $d_i$  verwendet werden. Anhand des Rohrinnehdurchmessers  $d_i$  kann aus der Tabelle A.33 (siehe Anhang A auf Seite 264) die durchschnittliche Material-Rohrstärke sowie der Rohraußendurchmesser  $d_a$  die sich daraus ergebenden Radien  $r_i$  (Radius innen) und  $r_a$  (Radius außen) ermittelt werden. Mithilfe der Formel 3.51 kann folglich das Material-Volumen der Rohrleitungen  $V_{Material, Rohr}$  errechnet werden. Für die Summe der Leitungslängen  $\sum L$  werden alle bereits in den Formeln 3.42 bis 3.47 auf Seite 61 errechneten Leitungslängen separat für das Heizungs- und Trinkwarmwassersystem aufsummiert.

$$V_{Material, Rohr} = \pi(r_a^2 - r_i^2) \sum L \quad (3.51)$$

- $V_{Material, Rohr}$  = Material-Volumen Rohrleitungen [m<sup>3</sup>]  
 $r_a$  = Radius Rohrleitung außen [m]  
 $r_i$  = Radius Rohrleitung innen [m]  
 $\sum L$  = Summe Leitungslängen [m]

Zur Errechnung der **Materialmasse der Rohrleitungen** wird das errechnete Volumen mit einer durchschnittlichen Dichte für Rohrleitungsmaterialien  $\varnothing \rho_{\text{Rohrleitung}} = 3.250 \text{ kg/m}^3$  multipliziert (die Materialauswahl beschränkt sich auf die in der Ökobaudat verfügbaren Rohrleitungs-Datensätze):

- Polybutadien:  $\varnothing \rho_{\text{Polybutadien}} = 992,5 \text{ kg/m}^3$  [145]
- Polypropylen:  $\varnothing \rho_{\text{Polypropylen}} = 907,5 \text{ kg/m}^3$  [146]
- Stahl:  $\varnothing \rho_{\text{Stahl}} = 7850 \text{ kg/m}^3$  [147]

Zusätzlich zum Materialvolumen und der Materialmasse der Rohrleitungen muss ergänzend das Materialvolumen und die Materialmasse für die verwendete **Dämmung der Rohrleitungen** Berücksichtigung finden. Es wird pauschal bei allen betrachteten Leitungslängen davon ausgegangen, dass sie mit Wärmedämmung ummantelt sind (Wärmeleitfähigkeit  $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Die Mindestdicke der Dämmschicht wird in Bezug auf den Rohrrinnendurchmesser  $d_i$  aus der Tabelle A.13 im Anhang A (siehe Seite 255) [12] angenommen.

Hieraus ergeben sich neue Werte für den inneren Radius  $r_{i, \text{Dämmung}}$  und äußeren Radius  $r_{a, \text{Dämmung}}$  der Dämmschicht. Diese werden dann erneut in die Formel 3.51 zusammen mit der bereits definierten Summe der Leitungslängen  $\sum L$  eingesetzt, um das Materialvolumen der Rohrleitungsdämmung  $V_{\text{Material, Rohrdämmung}}$  zu errechnen. Für die Errechnung der Materialmasse der Rohrleitungsdämmung wird das Material-Volumen  $V_{\text{Material, Rohrdämmung}}$  mit dem Wert für die durchschnittliche Dichte des Dämmmaterials der Rohrleitungen  $\varnothing \rho_{\text{Rohrleitung, Dämmung}} = 42,5 \text{ kg/m}^3$  multipliziert (durchschnittliche Dichte EPDM-Schaum [Rohrisolierung]  $\varnothing \rho_{\text{EPDM-Schaum}} = 55 \text{ kg/m}^3$  und Steinwolle Heizungsrohrschale  $\varnothing \rho_{\text{SW-Heizungsrohrschale}} = 30 \text{ kg/m}^3$  [59]).

### 3.5.8. Dimensionierung Wärmeübergabesysteme

Bei den Wärmeübergabesystemen wird zwischen den zwei Systemen Radiatoren und Flächen- bzw. Fußbodenheizungen unterschieden. Dabei verläuft die Auslegung auf der Grundlage durchschnittlicher herstellerspezifischer Angaben zu den einzelnen Produkten, da keine Informationen zu Wärmeübergabesystemen aus dem verwendeten 3D-Stadtmodell hervorgehen.

#### Radiatoren

Bei der Dimensionierung wird der Mittelwert der Wärmeleistung der Plattenheizkörper-Typen 10, 11, 20, 21, 22, 30, 33 mit jeweils den Höhen von 300, 400, 500, 600 und 900 mm bei  $70/55/20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Vorlauf-/Rücklauf-/Raumtemperatur) und  $55/45/20 \text{ }^\circ\text{C}$  errechnet und für alle Berechnungen angenommen.

Für die Temperaturspreizung  $70/55/20 \text{ }^\circ\text{C}$ , die in Verbindung mit Niedertemperaturkesseln definiert wird, bedeutet das eine mittlere Wärmeleistung pro Meter Plattenheizkörper von  $965 \text{ W/m}$ . Eine Temperaturspreizung von  $55/45/20 \text{ }^\circ\text{C}$ , die für Brennwertkessel angenommen wird, führt zu einem Wert von  $614 \text{ W/m}$  [148]. Die Heizlast  $\Phi_{\text{HL,build}}$  des Gebäudes (siehe Kapitel 3.23) wird durch die

mittlere Wärmeleistung dividiert. Das ergibt die erforderliche Länge an Plattenheizkörpern, die für die Übertragung der Wärme in den Raum notwendig ist. Zudem wird die Temperaturspreizung 70/55/20 °C nur für die Berechnung der LCA der Gas- und Öl-Wärmeerzeuger in Kombination mit Radiatoren im Bestand herangezogen. Für alle weiteren Wärmeerzeuger in Kombination mit Radiatoren im Bestand und für alle Wärmeerzeuger in Kombination mit Radiatoren nach Sanierung wird die Temperaturspreizung 55/45/20 °C angenommen. Durch die Multiplikation der Gesamtlänge an Radiatoren mit der über alle Radiatoren hinweg errechneten durchschnittlichen Materialmasse von 33,74 kg/m wird die Materialmasse der Radiatoren festgelegt.

## Fußbodenheizung

Bei der Dimensionierung der Fußbodenheizung wird davon ausgegangen, dass die Wohnfläche beheizt wird, die sich aus der Multiplikation der Wohnfläche mit dem in der GUI definierten Prozentsatz für Fußbodenheizungen ergibt. Die Differenzierung bei der Dimensionierung der Fußbodenheizung folgt aus dem Verlegeabstand der Rohre zwischen 100 mm und 300 mm in 50 mm Schritten. Dieser resultiert aus einem spezifischen Faktor, der angibt, welcher Anteil der Heizlast von der Fußbodenheizung getragen werden muss. Liegt dieser Faktor bei einem Wert von  $\geq 60\%$ , wird ein Verlegeabstand von 300 mm angenommen. Liegt der Faktor zwischen 60 und 50 %, dann resultiert daraus ein Verlegeabstand von 250 mm, zwischen 50 % und 40 % sind es 200 mm, zwischen 40 % und 30 % 150 mm und  $< 30\%$  sind es 100 mm. Diese Staffelung wurde getroffen, um zwischen den Verlegeabständen der Fußbodenheizungsrohre in der Ökobaudat zu unterscheiden (siehe Ökobaudat [59]).

Der Querschnitt der Fußbodenheizungsrohre liegt zwischen 14 und 20 mm. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde ein Mittelwert von 17 mm verwendet (siehe Ökobaudat [59]). Daraus ergeben sich die in Tabelle A.14 im Anhang A (siehe Seite 255) aufgeführten Massenwerte je Verlegeabstand und Quadratmeter Wohnfläche. Der Verlegeabstand, multipliziert mit der zu beheizenden Wohnfläche und mit dem Massenwert je Verlegeabstand, ergibt die Materialmasse für die Fußbodenheizungen.

### 3.5.9. Dimensionierung der Wärmespeicherung

Bei der Speicherung bzw. Dimensionierung des Warmwasserspeichers wird zwischen dem Warmwasser für die Raumheizung (Pufferspeicher) und dem Trinkwarmwasser (Trinkwarmwasserspeicher) unterschieden.

Der **Pufferspeicher** zur Unterstützung der **Raumheizung** wird dabei nach der DIN V 18599-5:2018-09 dimensioniert (siehe Formel 3.52) [85]. Der errechnete Pufferspeicher-Nenninhalt  $V_{S, Heiz}$  wird in Liter [l] angegeben, da dieser Wert für die weiterführende Berechnung der LCA ohne weitere Umrechnung herangezogen werden kann. Der für die Berechnung notwendige tägliche Bereitschaftswärmeverlust  $Q_{P0,s,day}$  basiert unter anderem auf den Werten für die Wärmeverluste bei der Speicherung des Warmwassers für die Heizungsanlage  $q_S$  kWh/m<sup>2</sup>\*a (siehe Tabellen A.27 und A.28, Anhang A, Seiten 262 und 263). Diese Werte stützen sich auf der DIN V 4701-10:2003-08 [114] und werden je nach der in Kapitel 3.5.8 errechneten Temperaturspreizung des Heizsystems für die

Ermittlung des Bereitschafts-Wärmeverlustes herangezogen. Die Werte werden differenziert für die Vorlauftemperaturen  $\geq 40\text{ °C}$  und  $< 40\text{ °C}$  ausgegeben. Dabei wird die in der Formel 3.1 berechnete Nutz- bzw. Wohnfläche  $A_N$  mit dem Wert für  $q_S$  multipliziert und durch die Anzahl der Tagen einer durchschnittlichen Heizperiode (185 Tage) dividiert (siehe Formel 3.53).

$$V_S = \left( \frac{Q_{P0,s,day} - 0,4}{0,14} \right)^2 \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} V_{S, \text{Heiz}} &= \text{Pufferspeicher-Nenninhalt [l]} \\ Q_{P0,s,day} &= \text{täglicher Bereitschafts-Wärmeverlust [kWh/d]} \end{aligned}$$

$$Q_{P0,s,day} = \frac{q_S * A_N}{HP} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} Q_{P0,s,day} &= \text{täglicher Bereitschafts-Wärmeverlust [kWh/d]} \\ q_S &= \text{Wärmeverluste Speicherung [kWh/m}^2\text{*a]} \\ A_N &= \text{Nutz- bzw. Wohnfläche [m}^2\text{]} \\ HP &= \text{Anzahl Tage Heizperiode [d]} \end{aligned}$$

Der Trinkwarmwasserspeicher definiert sich nach der DIN V 18599-08:2018-09 (siehe Formel 3.54 auf Seite 68). Der errechnete Nenninhalt des **Trinkwarmwasserspeichers**  $V_{S, TWW}$  wird ebenfalls in Liter angegeben. Der für die Berechnung notwendige Wert für den täglichen Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser  $Q_{w,b,day}$  ergibt sich aus der Formel 3.55 auf Seite 68, in Anlehnung an die Formel 3.18 aus Kapitel 3.4.2. In der Formel 3.55 zur Berechnung des Nutzenergiebedarfs für Trinkwarmwasser werden im Vergleich zu der Formel 3.18 zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Trinkwarmwasser lediglich die Wärmeerzeugeraufwandszahl  $e_{TW,g}$  für die Trinkwarmwassererzeugung und der Trinkwarmwassererwärmungs-Deckungsanteil  $\alpha_{g,W}$  nicht mit einberechnet. Der Trinkwarmwassererwärmungs-Deckungsanteil wird nach Kapitel 3.4.2 bereits mit  $\alpha_{g,W} = 1,0$  definiert und kann folglich vernachlässigt werden. Der Nutzungsfaktor  $f_N$  ergibt sich aus DIN V 18599-08:2018-09. Dabei darf die Anzahl an Wohneinheiten innerhalb eines Gebäudes  $N_{Wohnung}$  laut der Norm anhand der Formel 3.57 überschlägig berechnet werden. Die mittlere Temperatur des Speichers  $\theta_{s,av}$  und die Kaltwassertemperatur  $\theta_K$  werden laut DIN V 18599-08:2018-09 mit  $\theta_{s,av} = 55\text{ °C}$  und  $\theta_K = 11\text{ °C}$  angenommen. Für den Speichernutzungsgrad  $\eta_S$  lässt sich aus der Norm ein Durchschnittswert für liegende und stehende Speicher von  $\eta_S = 0,925$  errechnen.

Pro Liter Speichervolumen ergibt sich ein Massenwert von 0,17 kg/l aus den Ökobaudat-Datensätzen [59]. Die Umrechnung in Materialmasse muss wegen des LCA-Datensatzes durchgeführt werden, der massenbezogen vorliegt. Da im weiteren Prozess mit einem LCA-Datensatz für Warmwasserspeicher gerechnet und nicht mehr zwischen Puffer- und Trinkwarmwasserspeichern differenziert wird, wird die gesamte Materialmasse der Speicher errechnet.

$$V_S = \frac{Q_{w,b,day} * f_N * 860}{(\theta_{s,av} - \theta_K)} * \eta_S \quad (3.54)$$

- $V_{S, TWW}$  = Trinkwarmwasserspeicher-Nenninhalt [l]
- $Q_{w,b,day}$  = täglicher Nutzenergiebedarf TWW [kWh/d]
- $f_N$  = Nutzungsfaktor [-]
- $\theta_{s,av}$  = mittlere Temperatur des Speichers [°C]
- $\theta_K$  = Kaltwassertemperatur [°C]
- $\eta_S$  = Speichernutzungsgrad [-]

$$q_{TW,N} = (q_{tW} + q_{TW,ce} + q_{TW,d} + q_{TW,s}) \quad (3.55)$$

- $q_{TW,N}$  = Nutzenergiebedarf TWW [kWh/m<sup>2</sup>\*a]
- $q_{tW}$  = spezifischer Energiebedarf TWW [kWh/m<sup>2</sup>\*a]
- $q_{TW,ce}$  = Wärmeverlust Übergabe [kWh/m<sup>2</sup>\*a]
- $q_{TW,d}$  = Wärmeverlust Verteilung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]
- $q_{TW,s}$  = Wärmeverlust Speicherung [kWh/m<sup>2</sup>\*a]

$$f_N = 1,85 * N_{Wohnung}^{-0,42} \quad (3.56)$$

- $f_N$  = Nutzungsfaktor [-]
- $N_{Wohnung}$  = Anzahl Wohneinheiten innerhalb Gebäude [-]

$$N_{Wohnung} = \frac{A_N}{80} \quad (3.57)$$

- $N_{Wohnung}$  = Anzahl Wohneinheiten innerhalb Gebäude [-]
- $A_N$  = Nutz- bzw. Wohnfläche [m<sup>2</sup>]

### 3.6. Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung

Anhand der entwickelten Methode kann die Berechnung der LCA der TGA für Gebäude, Stadtquartiere und gesamte Städte durchgeführt werden. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf großen Gebäudebeständen. Bei der Berechnung der LCA wird eine lebenszyklusbasierte emissionsbezogene Bilanzierung und Bewertung der errechneten Energiebedarfe für den Betrieb des Gebäudes und für die dimensionierten TGA-Komponenten durchgeführt. Dabei definiert die DIN EN 15978:2012-10 [10] verschiedene Lebenszyklusphasen eines Gebäudes (siehe Abbildung 3.2 auf Seite 28). Im Rahmen der entwickelten Methode werden folgende Lebenszyklusphasen berücksichtigt:

- A1 (Rohstoffbeschaffung)
- A2 (Transport)
- A3 (Produktion)
- B4 (Austausch)
- B6 (Energiebedarf im Betrieb)
- C3 (Abfallbehandlung)
- C4 (Beseitigung)

Für die Lebenszyklusphase *B6* „Energiebedarf im Betrieb“ wird die gebäudebezogene Berechnung nach Kapitel 3.4.3 durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen errechnen sich weiterführend die aus dem Energiebedarf resultierenden Emissionen. Alle weiteren Lebenszyklusphasen beziehen sich auf die Energiebedarfe und die Emissionen, die bei der Herstellung, Nutzung (dem Austausch und Ersatz) und der Entsorgung der betrachteten TGA-Komponenten entstehen. Die Werte der Lebenszyklusphase *D Potenzial für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling* sind ergänzende Informationen, die außerhalb des Lebenszyklus anfallen (siehe Abbildung 3.2 auf Seite 28). Deshalb wird die Betrachtung der Phase D nicht weiterverfolgt.

Die Phasen A1-A3 werden aufgrund der Beschaffenheit der Ausgangsdaten der Ökobaudat [59] zu einem Wert aufaddiert. Die Phase B4 ergibt sich weiterführend aus den Formeln 3.58 und 3.59. Resultiert aus Formel 3.59 eine Dezimalzahl, dann wird diese auf die erste Dezimalstelle nach dem Komma gerundet. Ist die erste Dezimalzahl größer als fünf ( $> x,5$ ), wird aufgerundet und somit ein weiterer Austausch angenommen. Ist die erste Dezimalzahl jedoch kleiner oder gleich fünf ( $\leq x,5$ ), wird abgerundet und kein weiterer Austausch berechnet. Diese Annahme wird getroffen, um zu verhindern, dass gegen Ende der Gesamtlebensdauer eines Gebäudes TGA-Komponenten ausgetauscht und erneuert und mit in die Bilanz aufgenommen werden.

$$B4 = (A1 + A2 + A3 + C3 + C4) * n \quad (3.58)$$

- $B4$  = Austausch TGA-Komponente
- $A1$  = Rohstoffbeschaffung neues Produkt
- $A2$  = Transport neues Produkt
- $A3$  = Produktion neues Produkt
- $C3$  = Abfallbehandlung altes Produkt
- $C4$  = Beseitigung altes Produkt
- $n$  = Anzahl Austausche über Lebenszyklus

$$n \approx \frac{l}{t} \quad (3.59)$$

- $n$  = Gerundete Austauschzahl über Lebenszyklus [-]
- $l$  = Durchschnittliche Lebensdauer [a]
- $t$  = Lebenszyklus Gebäude [a]

### 3.6.1. Grundlagen der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung

Die Auswahl der Lebenszyklusphasen begründet sich durch die Verfügbarkeit an Daten in den LCA-Datensätzen der betrachteten TGA-Komponenten in der Ökobaudat. Die Ökobaudat ist eine frei verfügbare Onlinedatenbank, bereitgestellt durch das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) [59], die eine einheitliche Datenbasis für die Lebenszyklusanalyse von Bauwerken zur Verfügung stellt. Aus Gründen der Transparenz, Konsistenz, Nachvollziehbarkeit und vor allem der Reproduzierbarkeit, der im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten wissenschaftlichen Inhalte, wird auf die Daten der Ökobaudat zurückgegriffen. Die im Weiteren beschriebene Methode zur Berechnung der LCA lässt sich auf jede beliebige andere Lebenszyklusphase erweitern, für die, konsistent über alle betrachteten TGA-Komponenten hinweg, Daten zur Verfügung stehen.

Die Ökobaudat beinhaltet folglich Ökobilanz-Datensätze zur lebenszyklusbasierten energetischen und emissionsbezogenen Bewertung von Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen [59]. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der LCA ausgewählter Komponenten der TGA und der energetischen und emissionsbezogenen Bewertung der benötigten Energieträger (z. B. Öl, Gas, Strom etc.), die zur Bereitstellung der Energie für Heizung und TWW benötigt werden. Die LCA-Ergebnisse basieren auf der Ökobaudat-Version *ÖKOBAUDAT 2019-III (Abruf Daten: 29.05.2019)*. In dieser Version befinden sich rund 1.078 Datensätze zu den Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen. Davon fallen rund 148 Datensätze (13,5 %) unter die Kategorie der Gebäudetechnik und 15 Datensätze (1,4 %) unter die Kategorie der Energieträger. Im Rahmen der stetigen Weiterentwicklung und Erweiterung der Datenbank müssen in Zukunft ausführlichere Daten zur Gebäudetechnik zur Verfügung gestellt werden, die weiterführend in die entwickelte Methode

integriert werden können. Neben dem Trend zu „Low-Tech-Lösungen“ im Gebäudebereich entsteht parallel der Trend hin zu mehr Gebäudeautomation und komplexeren und effizienteren Energieversorgungssystemen auf der Basis Erneuerbarer Energien. Im Kontext der nachhaltigen Entwicklung des Gebäudesektors, worauf beide dieser Trends abzielen, ist eine lebenszyklusbasierte energetische und ökologische Bewertung der entwickelten technischen Lösungen und Energieverbräuche während der Nutzung von Gebäuden von elementarer Bedeutung. Hierfür ist es zwingend notwendig, eine validierte, konsistente und breite Datengrundlage zur Analyse, Bewertung und Optimierung zu schaffen und diese in Zukunft weiter auszubauen.

Die Ökobilanz-Datensätze sind folgendermaßen aufgebaut: Zu allen aufgeführten Datensätzen stehen in den Hauptkategorien *Prozess-Information*, *Modellierung und Validierung*, *Administrative Informationen* und *Umweltindikatoren* spezifische Produktinformationen zur Verfügung. Die für die Berechnung der energie- und emissionbezogenen LCA unmittelbar wichtigen Daten sind in den Kategorien *Prozess-Information* und *Umweltindikatoren* aufgeführt. Bei den Prozess-Informationen spielt die Definition des Referenzflusses, auf die sich die Werte der Umweltindikatoren beziehen, eine wichtige Rolle. Wird der Referenzfluss z. B. mit einem Kilogramm definiert, dann beziehen sich alle unter den Umweltindikatoren aufgelisteten Werte auf ein Kilogramm des betrachteten Produkts bzw. Baumaterials.

Die Hauptkategorie *Umweltindikatoren* untergliedert sich nochmals in zwei Unterkategorien. Die erste Unterkategorie führt die „Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen“, die zweite Unterkategorie die „Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen“ auf. Die Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen unterteilen sich wiederum in Input- und Output-Indikatoren (siehe Tabelle A.15, Anhang A, Seite 256). Die Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen sind in Tabelle A.16 im Anhang A (siehe Seite 256) aufgelistet. Für alle in Tabelle A.15 und A.16 aufgelisteten Indikatoren stellt die Ökobaudat in unterschiedlichem Umfang Daten für jede der genannten und im Rahmen der entwickelten Methode relevanten Lebenszyklusphasen zur Verfügung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ökobaudat in Bezug auf die Indikatoren-Werte vorschreibt, dass Werte für die Phasen A1-A3 für den spezifischen Prozess-Datensatz zur Verfügung stehen müssen, damit dieser in die Datenbank mit aufgenommen wird [149]. Dies kann zu fehlerhaften Interpretationen von Bilanzen bzw. Ergebnissen führen. An dieser Stelle ist es ebenfalls wichtig zu erwähnen, dass für alle 145 auf die Gebäudetechnik bezogenen Datensätze ein kumulierter Wert für die Phasen A1-A3 zur Verfügung steht. Es werden folglich keine einzelnen Werte für die Phasen A1, A2 und A3 in der Datenbank aufgeführt. Bei der Bewertung der Energieträger werden regulär nur für den Energieeinsatz in der Phase B6 (Energieverbrauch im Betrieb) Werte in der Ökobaudat angegeben.

Die LCA ist auf die Input-Indikatoren des Primärenergiebedarfs aus nicht-erneuerbaren Energiequellen (PENRT), des Primärenergiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen (PERT) sowie die Summe der beiden Primärenergiebedarfe (PET) fokussiert. In der Ökobaudat sind die Werte für PENRT und PERT in der Einheit Megajoule [MJ] aufgeführt und werden für die Verwendung im Rahmen der entwickelten Methode in die Einheit Kilowattstunden [kWh] umgerechnet. Dadurch wird

eine Vergleichbarkeit mit den Energiebedarfen der Nutzungsphase (Phase B6) geschaffen. Aus der Bilanzierung dieser drei Indikatoren für die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3 und C4 mit den spezifischen Werten aus der Ökobaudat resultiert das Ergebnis für die *Graue Energie*, bezogen auf die jeweils betrachtete TGA-Komponente. Diese Input-Indikatoren lassen sich für den bzw. die Energieträger für den Betrieb des Gebäudes (Phase B6) berechnen. Daraus entsteht das Ergebnis für die *Operative Energie*. Der Summenwert aus *Grauer Energie* und *Operativer Energie* wird in dieser Arbeit als lebenszyklusbasierte energetische Bilanz definiert.

Der Umweltindikator *Globales Erwärmungspotenzial (GWP)* wird für die lebenszyklusbasierte ökologische Bewertung herangezogen. Das Global Warming Potential (GWP) wird in der Einheit Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalente [kg CO<sub>2</sub>-Äq.] angegeben, spiegelt also die Wirkung aller spezifisch anfallenden Treibhausgasemissionen, normiert auf das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid, wieder. Fallen z. B. in der Phase A1-A3 für den Biomasse-Pelletkessel 5 kg Methan (CH<sub>4</sub>) und 10 kg Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) an, dann ergibt sich daraus ein GWP von 115 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Dieser Wert kommt dadurch zustande, dass Methan laut Greenpeace [150] eine 21-fach höhere Klimawirksamkeit als Kohlenstoffdioxid hat. Die emittierte Menge an Methan wird demnach mit dem Faktor 21 und Kohlenstoffdioxid mit dem Faktor 1 multipliziert. Die weiterführende Definition und Berechnung der *Grauen Emissionen* und *Operativen Emissionen* erfolgt analog zur Definition der *Grauen Energie* und *Operativen Energie*.

Obwohl diese Dissertation durch die Datenlage der Ökobaudat in ihrer Bilanzierung und Interpretation der Ergebnisse limitiert wird, wird auch weiterhin bewusst von einer lebenszyklusbasierten energetischen und emissionsbezogenen Bilanzierung gesprochen. Die entwickelte Methode beruht auf einem lebenszyklusorientierten energetischen und emissionsbezogenen Bilanzierungsansatz, der sich, insofern transparente und konsistente Datensätze zur Verfügung stehen, auf alle Lebenszyklusphasen und Input/Output- und Umwelt-Indikatoren übertragen lässt. Die gewählten Indikatoren zur lebenszyklusbasierten energetischen und emissionsbezogenen Bilanzierung (GWP, PENRT, PERT) wurden aufgrund ihrer forschungsspezifischen, gesellschaftspolitischen und medialen Relevanz gewählt. Zudem wirkt sich eine Dimensionsreduktion in Bezug auf die betrachteten Input/Output- und Umweltindikatoren positiv auf die Verringerung der Komplexität der Interpretation der Bilanzierungsergebnisse aus, trägt somit zu einem besseren Verständnis bei und erleichtert die Kommunikation.

### 3.6.2. Berechnung der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung

Basierend auf dem in Kapitel 3.6.1 erklärten grundsätzlichen Vorgehen und den dabei vorgenommenen Definitionen werden folgende praktische Schritte bei der Durchführung der LCA der TGA auf Komponenten- und Gebäudeebene und in einem iterativen Prozess für alle betrachteten Gebäude auf Stadtquartiers- und Stadtebene durchlaufen.

1. Ermittlung/Errechnung der Energiebedarfe und der Heizlast des Gebäudes für Heizung und TWW
  - **Phase B6:**
    - a) Ermittlung der Primärenergieträger zur Deckung des Energiebedarfs zum Betrieb des Gebäudes
    - b) Zuweisung spezifischer energieträgerbezogener Prozess-Datensätze aus der Ökobaudat
    - c) Umrechnung der energieträgerbezogenen Prozess-Datensätze oder des Heizenergiebedarfs/-verbrauchs in die jeweils dieselbe Einheit
    - d) Verrechnung der energieträgerbezogenen Prozess-Datensätze mit Endenergiebedarf
    - e) Ergebnis Operative Energie und Emissionen
  - **Phasen A1-A3, B4, C3 und C4:**
    - a) Dimensionierung bzw. Auslegung der zu betrachtenden TGA-Komponenten, inklusive der Berücksichtigung der Lebensdauer anhand des Heizenergiebedarfs und der Heizlast
    - b) Zuweisung der spezifischen TGA-Produkt-Datensätze aus der Ökobaudat
    - c) Umrechnung der spezifischen TGA-Produkt-Datensätze oder Dimensionierungen/Auslegungen in die jeweils gleiche Einheit
    - d) Verrechnung der spezifischen TGA-Produkt-Datensätze mit den Dimensionierungen/Auslegungen
    - e) Ergebnis Graue Energie und Emissionen
2. Verrechnung der Ergebnisse aller betrachteten Lebenszyklusphasen und Indikatoren
3. Berechnung der LCA der TGA aller betrachteten Gebäude auf Stadtquartiers- und Stadtebene
4. Szenarienbetrachtung bzw. Berechnung von Entwicklungsszenarien anhand der gleichen Systematik (Punkt 1 - 3)

## Berechnung Lebenszyklusphase B6

Die Werte der „Ermittlung des gebäudebezogenen Energiebedarfs und der Heizlast für Heizung und TWW“ ergeben sich als Ergebnisse aus den bereits in den Kapiteln 3.4.2 und 3.4.1 beschriebenen Berechnungen. Die im Rahmen der Untersuchung betrachteten Wärmeerzeuger nutzen sieben unterschiedliche Energiequellen (siehe Tabelle A.17, Anhang A, Seite 257):

- Öl (Bioöl/Heizöl)
- Gas (Biogas/Erdgas)
- Holz (Pellets/Hackschnitzel)
- Fernwärme (verschiedene Quellen: z. B. Müllverbrennung, Biogasverfeuerung, Abwärme aus der Stromproduktion)
- Elektrizität (Ökostrom/konventioneller Strom)
- Sonneneinstrahlung
- Umweltwärme (Außenluft/Erdwärme/Grundwasser)

Für die Berechnung der verschiedenen Primärenergiebedarfe (PERT, PENRT, PE) für die Lebenszyklusphase B6 wird in den bereits erwähnten Kapiteln 3.4.2 und 3.4.1 zunächst der Nutzenergiebedarf definiert (TWW) und errechnet (Raumheizung). Darauf aufbauend wird, unter Berücksichtigung von Verteilungs- und Umwandlungsverlusten sowie des Wirkungsgrades, der Endenergiebedarf und daraufhin aufbauend, unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren, der Primärenergiebedarf berechnet.

Die Nutz- und Endenergiebedarfsberechnung ergibt sich aus den in Kapiteln 3.4.2 und 3.4.1 bereits im Detail beschriebenen festen Berechnungsschritten mit zum Teil fixen, aber auch variablen Eingangsparametern, die sich jedoch alle abhängig vom betrachteten Gebäude anpassen (z. B. Nutzfläche Gebäude).

Die Berechnung des Primärenergiebedarfs (PERT, PENRT) richtet sich nach gebäudeunabhängigen Eingangsparametern: den Primärenergiefaktoren und den prozentualen Anteilen an erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energie in Bezug auf die Energiequellen. Als Beispiel kann die Fernwärme aufgeführt werden, deren Primärenergiefaktor wegen der ursprünglichen Energiequelle (z. B. aus der Müllverbrennung, aus Gas-Dampf-Kraftwerken u.a.) zwischen den Kommunen stark variiert. Der Primärenergiefaktor bildet Verluste in vorgelagerten Prozessketten (Gewinnung, Umwandlung und Verteilung) außerhalb der definierten Systemgrenze „Gebäude“ ab. Bei der Fernwärme können dies zum Beispiel Wärmeverluste beim Transport der Wärme durch das Wärmeträgermedium (meist Wasser) durch die Rohre des Fernwärmenetzes sein. Aufgrund der Variabilität der Primärenergiefaktoren sind diese Parameter frei für jede Berechnung neu anpassbar und können über die GUI bereitgestellt werden.

Um einen Anhaltspunkt zur Größenordnung zu bekommen, werden in folgender Tabelle 3.1 die nach EnEV definierten Primärenergiefaktoren aufgeführt [113].

**Tabelle 3.1.:** Primärenergiefaktoren nach EnEV [113] (aus \*erneuerbaren, \*\*nicht-erneuerbaren Quellen)

Energiequelle	Primärenergiefaktor nach EnEV 2016
Gas	1,1
Öl	1,1
Strom	1,8
Holz	0,2
Fernwärme aus Heizwerken	0,1* bzw. 1,3**
Fernwärme aus Heizkraftwerken	0,0* bzw. 0,7**
Solarenergie	0,0
Umweltenergie	0,0

Werden die Endenergiebedarfe für Raumheizung und TWW mit den Primärenergiefaktoren multipliziert, lässt sich daraus die Summe des Primärenergiebedarfs (PET) ( $Q_P$ ) für die Lebenszyklusphase B6 errechnen.

Um im Folgenden die Differenzierung zwischen PERT und PENRT vorzunehmen, muss zunächst für jede Energiequelle der Anteil an erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energie bezogen auf die Energiequelle angegeben werden. Zum Beispiel kann für die Energiequelle Gas der Anteil von Biogas und Erdgas separat über die GUI von urbi+ angeführt werden. Folglich wird der gebäudebezogene Gesamtprimärenergiebedarf (PE) mit den jeweiligen Anteilen multipliziert, um die Werte für PERT und PENRT (LCA-Phase B6) zu bestimmen. Theoretisch wäre die Berechnung von PERT und PENRT über die Ökobaudat-Datensätze möglich, da die Datensätze dafür einen festen Wert für eine Kilowattstunde Endenergie angeben. Bei der Berechnung von Entwicklungsszenarien (siehe Kapitel 3.8) lassen sich diese Werte allerdings nicht variieren. Das bedeutet, dass mit denselben festen Werten an PERT und PENRT z. B. im 20. Jahr eines Entwicklungsszenarios gerechnet werden muss und sich sowohl Primärenergiefaktoren als auch die Anteile an erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energie in Bezug auf die Energiequelle nicht anpassen lassen. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass sich diese Primärenergiefaktoren und die erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteile über die Zeit verändern. Deshalb wird von der Berechnung des PERT und PENRT über die Ökobaudat-Datensätze abgesehen und der hier beschriebene Ansatz gewählt.

Die Differenzierung wird weiterführend auch bei der Berechnung des GWP für die Lebenszyklusphase B6 relevant. Für die Berechnung werden die sich auf die Energiequelle beziehenden GWP-Werte für die Phase B6 aus der Ökobaudat entnommen. Diese beziehen sich auf den Referenzfluss von einer Kilowattstunde [kWh] Endenergie. Die Ökobaudat-Datensätze sowie die berechneten Endenergiebedarfe aus der DIN V 4108-6:2003-06 und der DIN V 4701-10:2003-08 verweisen auf den unteren Heizwert.

Die Emissionswerte errechnen sich weiterführend aus der Formel 3.60.

$$GWP_{B6} = Q_E * GWP_{B6, \text{spezifischer}} * PA_{\text{erneuerbar/nicht-erneuerbar}} \quad (3.60)$$

$GWP_{B6}$	=	GWP Phase B6
$Q_E$	=	gebäudebezogener Gesamtenergiebedarf
$GWP_{B6, \text{spezifischer}}$	=	spezifischer GWP-Wert je Energiequelle
$PA_{\text{erneuerbar/nicht-erneuerbar}}$	=	prozentualer erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Anteil

Für die Berechnung des GWP werden die GWP-Werte  $GWP_{B6, \text{spez}}$  für die unterschiedlichen Energiequellen herangezogen (siehe Tabelle A.18 im Anhang A auf Seite 257).

Beim nicht-erneuerbaren Anteil des GWP für Holz wird miteinbezogen, dass in der Prozesskette vor der Verfeuerung des Holzes (Pellets/Hackschnitzel) im Biomasse-Kessel Emissionen entstehen, da das Abholzen, der Transport oder das Pressen von Pellets etc. eventuell unter Zuhilfenahme nicht-erneuerbarer Energiequellen geschieht, z. B. durch den Betrieb der Maschinen mit Diesel. Beim erneuerbaren Anteil des Holzes wird das GWP berücksichtigt, das bei Prozessen innerhalb der Systemgrenze (Gebäude) anfällt. Damit ist z. B. das GWP gemeint, das aus der Stromnutzung (deutscher Strom-Mix) für das Saugzuggebläse des Biomassekessels entsteht. Die GWP-Werte  $GWP_{B6, \text{spez}}$  aus der Tabelle A.18 (Anhang A auf Seite 257) unterliegen generell Schwankungen und Anpassungen, wie z. B. durch sich verändernde Produktionsprozesse. Deshalb müssen diese in kurzen Abständen validiert und ggf. angepasst und daraufhin erneuert werden.

Aus den vorangegangenen Beschreibungen ergeben sich die Berechnungsergebnisse für die Lebenszyklusphase B6 für die Indikatoren Summe Primärenergiebedarf (PET), PERT, PENRT und GWP. Im folgenden Schritt werden anhand der in Kapitel 3.5 errechneten Dimensionierungen der TGA-Komponenten die Ergebnisse für die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3 und C4 für dieselben Indikatoren errechnet.

### **Berechnung Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3, C4**

Bei der Berechnung der Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3 und C4 werden in einem ersten Schritt die zu den jeweiligen TGA-Komponenten passenden LCA-Datensätze in der Ökobaudat identifiziert. Dabei kommt es vor, dass Datensätze pro TGA-Komponente nicht nur einmal, sondern gleich zu verschiedenen Ausführungsvarianten und Dimensionierungen vorliegen (z. B. Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät), Gas-Niedertemperaturgerät 120-400 kW (Standgerät), Gas-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät) etc.). Auf Stadtquartiers- bzw. Stadtebene stehen jedoch keinerlei gebäude-spezifische Informationen zum Energiesystem (Wärmeerzeuger und dessen Ausführungsvarianten) zur Verfügung. Somit werden aus den verfügbaren Datensätzen zu den verschiedenen Ausführungsvarianten Durchschnittswerte, jeweils spezifisch für jede TGA-Komponente, gebildet.

Die Liste der für die Berechnung verwendeten Datensätze findet sich aufgeschlüsselt nach den betrachteten TGA-Komponenten in der Tabelle A.37 (Anhang A, Seite 266).

Für die Heizungs- und Trinkwarmwasserleitungen werden jeweils die gleichen Durchschnittswerte für die Berechnung verwendet. Alle LCA-Werte müssen in einem weiteren Schritt auf die jeweilige Referenzgröße der TGA-Komponente, die sich aus der Dimensionierung der TGA-Komponenten ergibt, normiert werden. Die Referenzgrößen richten sich dabei nach Tabelle A.19 im Anhang A (siehe Seite 258). Für die Normierung werden die in der Ökobaudat verwendeten technischen Informationen zu den TGA-Komponenten herangezogen. Wenn in den LCA-Datensätzen (siehe Tabelle A.37, Anhang A, Seite 266) z. B. ein Leistungsbereich für einen Wärmeerzeuger (120-400 kW) angegeben ist, dann findet die Normierung jeweils in Bezug auf den höchsten Leistungswert (400 kW) statt. Die auf jeweils eine Einheit normierten LCA-Durchschnittswerte (1 kW Leistung, 1 m Rohrleitungslänge, 1 kg Materialmasse) für die Indikatoren PERT, PENRT und GWP für die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3, C4 können ebenfalls dem Anhang A entnommen werden (siehe Tabelle A.38, Seite 269). Die Werte des Indikators PET ergeben sich aus der Summe von PERT und PENRT.

Weiterführend können die auf den korrekten Referenzfluss bezogenen LCA-Werte mit den sich aus Kapitel 3.5 ergebenden Dimensionierungen der TGA-Komponenten für die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3 und C4 und für die Indikatoren PERT, PENRT und GWP berechnet werden. Somit stehen die gebäudespezifischen Ergebnisse für die lebenszyklusbasierte energetische und emissionsbezogene Bewertung (Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, B6, C3, C4) der TGA und der Nutzung des Gebäudes zur Verfügung. Diese Berechnungsschritte werden schrittweise für jedes Gebäude des betrachteten Gebäudebestandes durchgeführt.

### **3.7. Lebenszykluskostenanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung**

Das Ziel der LCC ist, die lebenszyklusbasierten Kosten der betrachteten Gebäude mit speziellem Fokus auf die TGA zu bewerten. Die Kosten der LCC beziehen sich dabei direkt auf die Kosten der betrachteten TGA-Komponenten und die Energieträgerkosten (Endenergie), die während der Nutzung des Gebäudes anfallen. Zudem werden im Rahmen der entwickelten Methode die ab dem Jahr 2021 gültige CO<sub>2</sub>-Bepreisung [151] mitberücksichtigt (siehe folgendes Kapitel 3.7.1). Weitere ökologische Kosten, die sogenannten „Eco-Costs“, werden in der Methode dieser Dissertation nicht betrachtet. Mit Eco-Costs werden die Kosten bezeichnet, die sich aus der Umweltbelastung eines Produkts bzw. der Vermeidung dieser Umweltbelastung ergeben. Es sind somit die Kosten, die angesetzt werden um die Umweltverschmutzung und den Ressourcenabbau auf ein nachhaltiges Niveau zu reduzieren.

In den aufgeführten Kostenwerten sind keine spezifischen Fördermittel (z. B. für den Einsatz von Erneuerbaren Energien) enthalten. Diese müssen bei der Kalkulation der Kosten im Einzelfall auf Gebäudeebene geprüft und mitberechnet werden.

Die lebenszyklusbasierte kostenbezogene Analyse und Bewertung (LCC) der Nutzungsphase und der TGA fußt im Rahmen dieser Dissertation auf folgenden Lebenszyklusphasen (siehe Abbildung 3.2 auf Seite 28):

- Herstellung (in Anlehnung an LCA-Phasen A1-A3)
- Austausch (in Anlehnung an LCA-Phase B4)
- Nutzung (in Anlehnung an LCA-Phase B6)
- Entsorgung (in Anlehnung an LCA-Phase C3 und C4)

Wie aus der Auflistung ersichtlich, orientieren sich die Lebenszyklusphasen der LCC an denen der LCA. Im Prinzip werden statt der LCA-Inputdaten zur lebenszyklusbasierten energetischen und emissionsbezogenen Bewertung Kostenwerte für TGA-Komponenten und Endenergiebedarfe für die Berechnung verwendet. Die *Herstellungskosten* beinhalten die Kosten aller vorgelagerten Prozessketten, die bis zur Nutzbarkeit des Produktes angefallen sind. Hierzu zählen auch die Rohstoffbeschaffung als Grundlage für die TGA-Komponentenherstellung, der Transport zur weiterverarbeitenden Firma bzw. dem produzierenden Werk und natürlich die Produktion der jeweiligen TGA-Komponente. Zudem sind in den Kosten herstellereigene Margen enthalten, die wegen des Betriebsgeheimnisses nicht öffentlich kommuniziert und somit nicht spezifisch dargestellt werden können. Die *Austauschkosten* enthalten die Entsorgungskosten für das alte, auszutauschende Produkt und die Herstellungskosten des neuen Produktes. Die *Nutzungskosten* beinhalten die Energieträgerkosten, die während der Nutzung des Gebäudes entstehen. Diese Kosten beziehen sich z. B. auf die Menge an Strom, bezogen auf die Endenergie, die für den Betrieb einer Wärmepumpe über den Lebenszyklus hinweg benötigt wird. Die *Entsorgungskosten* beinhalten, ähnlich wie bei den Herstellungskosten, die Kosten für die Entsorgung einer spezifischen TGA-Komponente sowie die Kosten aller nachgelagerten Prozessketten, die vom Gebäudeeigentümer getragen werden müssen. Etwaige Gutschriften für das Recycling, die Wiederverwendung bzw. -verwertung (in Anlehnung an LCA-Phase D) werden bei der LCC nicht mitberücksichtigt.

Ebenso wie bei der LCA kann auch bei der LCC ein zusätzlicher Faktor über die GUI definiert werden, der nicht im Detail mitbetrachtete TGA-Komponenten sowie z. B. Personal- und Arbeitsmittelkosten für An- und Abfahrten und Ein- und Ausbau von TGA-Komponenten abbilden kann.

Die Definitionen der LCC-Lebenszyklusphasen ermöglichen eine Vergleichbarkeit der für die Lebenszyklusphasen errechneten kostenbezogenen Ergebnisse mit den Ergebnissen der lebenszyklusbasierten energetischen und emissionsbezogenen Bewertung der Gebäude.

## Berechnung Lebenszyklusphase Nutzung

Die durchschnittlichen Kostenwerte für die LCC-Phase *Nutzung* für die nachfolgend aufgelisteten Energiequellen können für jede Berechnung [€/kWh] über die GUI neu bestimmt werden.

- Öl
- Gas
- Holz (ungewichteter Durchschnitt für Hackschnitzel und Pellets)
- Fernwärme
- Strom

Die Kostenwerte werden jeweils mit den Endenergiebedarfen der unterschiedlichen Energiequellen multipliziert und ergeben daraufhin den durchschnittlichen jährlichen Kostenwert. Auch Kostenwerte unterliegen hohen Schwankungen. Wird die LCA z. B. über einen Zeitraum von 50 Jahren gerechnet, müssen anfallende Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze berücksichtigt werden. Diese Thematik wird im Kapitel 3.7.2 auf Seite 82 nochmals detaillierter aufgegriffen.

## Berechnung Lebenszyklusphasen Herstellung, Austausch und Entsorgung

Grundlage für die Ermittlung von Kostenwerten für die LCC-Phasen *Herstellung, Austausch und Entsorgung* sind die SIRADOS Baupreisdaten für Gebäudetechnik 2020 [152], die BKI Baukosten Positionen Neubau und Altbau 2019 [153][154] und in Einzelfällen, insofern keine Werte in den zuvor genannten Quellen zur Verfügung stehen, Werte aus Internetrecherchen.

Hierarchie für die Recherche von LCC-Werten:

1. SIRADOS Baupreishandbuch
2. BKI Baukostentabellen
3. Internetrecherche

Eine Vermischung der Informationsquellen wurde zu vermeiden versucht, da sich die Methoden der Erarbeitung der LCC-Durchschnittsdaten zwischen den verschiedenen Informationsquellen unterscheiden können. Generell muss festgehalten werden, dass die für die Berechnungen verwendeten LCC-Inputdaten und die aus der Methode resultierenden Ergebnisse Orientierungswerte für die Kostenberechnung darstellen. Im Einzelfall müssen die errechneten Kostenwerte nochmals spezifisch auf Gebäudeebene ermittelt werden. Außerdem können Kostenwerte ortsspezifischen Schwankungen unterliegen. Aufgrund dessen werden sowohl von SIRADOS als auch von der BKI ortsspezifische Faktoren zur Verfügung gestellt. Da diese Faktoren variieren können, können sie für jeden Berechnungsdurchlauf über die GUI von urbi+ neu definiert und angepasst werden. Zudem haben weitere Faktoren wie z. B. die Gesamtgröße des Bauprojekts und sich gegebenenfalls daraus resultierende Mengenrabatte auf Komponenten oder der vorgegebene Zeitrahmen einer Baumaßnahme einen Einfluss auf den Preis [152]. Um Kostenwerte für Entwicklungsszenarien z. B. in Bezug auf zukünftige Sanierungen und Endenergiebedarfe abzubilden, müssen die Bau-, Komponenten- und Energiekosten sowie die Kosten für die Energieversorgung in der Nutzungsphase zeitbezogen verzinst

und mit Preissteigerungen versehen werden (siehe Kapitel 3.7.2). Grundsätzlich wird jedoch davon ausgegangen, dass alle Installationen und Ausbauten von einem Fachbetrieb bzw. -handwerker durchgeführt werden und keine Selbstinstallation vorgenommen wird.

Alle LCC-Inputdaten werden darüber hinaus als Nettowert nach Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) [155] inklusive Lohn und Material (abgebildet über zusätzlichen Faktor) in der Währung Euro [€] im Rahmen der Berechnungen dargestellt.

Die Baupreisdaten aus dem SIRADOS Baupreishandbuch und den BKI Baukostentabellen werden kommerziell vermarktet. Deshalb können im Rahmen der schriftlichen Ausarbeitung dieser Dissertation keine spezifischen Kostenwerte, die aus diesen beiden Informationsquellen stammen, rückvollziehbar aufgezeigt werden. Jedoch wurden für die hier durchgeführten LCC-Berechnungen Durchschnittsdaten erzeugt. Diese werden ohne die genaue Nennung der Ausgangsdaten im Anhang A in Tabelle A.39 (siehe Seite 272) aufgeführt. Die Durchschnittsdaten können somit für Berechnungen verwendet werden, ohne dass auf die ursprünglichen Werte aus den Datenbanken zurückgerechnet werden kann. Zudem werden die LCC-Inputdaten, genauso wie die LCA-Inputdaten, zunächst auf dieselbe Einheit normiert und skaliert (siehe Tabelle A.20, Anhang A, Seite 259), um für die Berechnungen herangezogen werden zu können.

Die Kostenwerte für die LCC-Phasen aus Tabelle A.39 werden folglich mit den nach Tabelle A.20 definierten Einheiten der dimensionierten TGA-Komponenten multipliziert. Die für die LCC-Berechnungen verwendeten Durchschnittsdaten aus Tabelle A.39 basieren auf verschiedenen Annahmen und generellen Definitionen, die weiterführend näher erklärt und bei der Interpretation der LCC-Ergebnisse berücksichtigt werden.

- Die Herstellungs- und Einbaukosten für Sole-Wasser-Wärmepumpen, exklusive der Erdsonden bzw. -kollektoren, werden als gleich angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die technische Ausführung der beiden Ausführungsvarianten an Sole-Wasser-Wärmepumpen grundsätzlich gleich ist.
- Die Entsorgungskosten für Gas-, Öl- und Biomasse-Kessel sowie für alle Wärmepumpen, die häusliche Fernwärmeanschluss-Station und Gas-Wasser- bzw. Durchlauferhitzer werden, bezogen auf 1 kW Leistung, mit jeweils demselben generischen Kostenwert angenommen. Zu den Entsorgungskosten konnten keine spezifischen Kostenwerte für die unterschiedlichen Wärmeerzeuger in den bereits genannten Quellen ausfindig gemacht werden. Der verwendete generische Kostenwert wird aus dem SIRADOS Baupreishandbuch entnommen und bezieht sich auf den Ausbau und die Entsorgung eines Heizkessels aus Edelstahl.
- Bei den Bohrungen für Erdsonden und Brunnenanlagen (Wasser-Wasser-Wärmepumpen) und für Erdkollektoren können die Kosten stark von den Bodenbeschaffenheiten und der Topographie bzw. der generellen Vor-Ort-Situation abhängen und deshalb variieren. Deshalb können auch die Ergebniswerte unterschiedlich ausfallen und müssen bei der Interpretation kritisch hinterfragt werden.

- Für die Entsorgung der Fußbodenheizungsrohre konnte ebenfalls kein spezifischer Wert ermittelt werden. Deshalb wird für diesen Fall ein Drittel der Herstellungskosten angenommen.
- Weder die Recherchen noch konkrete Herstelleranfragen haben zur Ermittlung brauchbarer Kostenwerte für den Ausbau und die Entsorgung von Erdkollektoren, -sonden und Brunnenanlagen für die verschiedenen Ausführungsvarianten der Wärmepumpen geführt. Deshalb werden ein Drittel der Herstellungskosten angesetzt.
- Die Entsorgung von Elektroschrott ist auf Gemeindeebene geregelt. Die Entsorgungskosten können somit variieren. Nachtspeicherheizungen sind elektrische Geräte und fallen deshalb unter das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) [156]. Daher müssen die Geräte an kommunalen Sammelstellen oder an von den Abfallbehörden bestimmten Abgabestellen abgegeben werden. Die Kosten für Rückbau und Vor-Ort-Abholung muss der Besitzer der Nachtspeicheröfen tragen. Es wird deshalb ein pauschaler Wert von 230 € pro entsorgtem Gerät angenommen [157]. Um die gebäudespezifische Geräteanzahl zu berechnen, werden die in Kapitel 3.5.8 errechneten Werte für Radiatoren wegen der ähnlichen technischen Ausführung, verwendet. Die in Kapitel 3.5.8 errechneten Gesamtlängen der Radiatoren und Plattenheizkörper werden mit einem aus dem SIRADOS Baupreishandbuch errechneten Durchschnittswert von 0,61 m/Heizkörper multipliziert. Der sich daraus ergebende, gerundete Produktwert ist die gebäudespezifische Anzahl an Elektroheizungen, der für die LCC-Berechnung verwendet wird.
- Für die Installation der Solarthermieanlage wird jeweils ein Wert von 1.500 € für Zubehör wie Verrohrung, Ausdehnungsgefäße, Steuerung etc. und von 3.000 € für die Montage veranschlagt, die auf die Berechnung der Solarthermieanlagen noch mit aufsummiert wird. Diese Kosten werden, insofern die Anlage über den Lebenszyklus des Gebäudes ausgetauscht werden soll, erneut für den Austausch in Phase B4 angesetzt [158].
- Solarthermieanlagen können kostenfrei auf Werkstoffhöfen abgegeben werden oder werden kostenfrei vom Hersteller abgeholt [159]. Daher sind durchschnittliche Abbaukosten in der LLC-Phase *Entsorgung* bei den Solarthermieanlagen mitberücksichtigt.
- Die Kosten für die Entsorgung von Mineral- und Steinwolle belaufen sich auf rund 300 €/t [160]. Dieser Kostenwert wird inklusive eines Aufschlags für die Ausbaurkosten als Wert für den Ausbau und die Entsorgung der Rohleitungsisolierung für die Berechnungen herangezogen.

### 3.7.1. Lebenszykluskostenanalyse der Treibhausgasemissionen

Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Steuern [151] ist die Berechnung der Kosten der lebenszyklusbasierten Treibhausgasemissionen  $GWP_{\text{€}}$  ein wichtiges und unumgängliches Instrument für zukünftige politische Entscheidungsfindungen. Es kann zur Unterstützung politischer Entscheidungen und als Planungs- und Berechnungstool für zukünftige Bauprojekte dienen. Die Kosten beziehen sich bei dieser Berechnung auf das GWP, das sich aus allen betrachteten LCA-Phasen ergibt (siehe Kapitel 3.6.2). Dabei werden die GWP-Werte der LCA-Phasen mit einem Kosten- bzw. Steuerwert in [€/t] GWP multipliziert (siehe Formel 3.61). Die Summe der LCC-Werte für die einzelnen Lebenszyklusphasen ergibt folglich die Kosten der lebenszyklusbasierten Treibhausgasemissionen  $GWP$ . Dabei sind die Kosten- bzw. Steuerwerte ab Januar 2021 auf 25 €/t CO<sub>2</sub> festgesetzt [151]. Diese Variable

stellt einen unsicheren Eingabewert dar, der sich in Zukunft anpassen und verändern wird. Aufgrund dessen kann der Kosten- bzw. Steuerwert für jede Berechnung über die GUI neu definiert werden. Das ermöglicht zudem die Berechnung und Analyse unterschiedlicher Szenarien.

$$GWP_{\text{€}} = \sum GWP_{A1-A3, B4, B6, C3, C4} * CO_{2\text{-Steuer}} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} GWP_{\text{€}} &= \text{Lebenszyklusbasierte Kosten Treibhausgasemissionen [€]} \\ GWP_{A1-A3, B4, B6, C3, C4} &= \text{GWP-Werte der LCA-Phasen [kg]} \\ CO_{2\text{-Steuer}} &= \text{Kosten- bzw. Steuerwerte GWP [€/kWh]} \end{aligned}$$

Um auch die Kostenwerte der Treibhausgasemissionen für die Entwicklungsszenarien z. B. in Bezug auf anfallendes GWP aus zukünftigen Sanierungsmaßnahmen und Endenergiebedarfe abzubilden, müssen die Bau-, Komponenten- und Energiekosten zeitdynamisch betrachtet und Preissteigerungen sowie Kalkulationszinssätze miteinbezogen werden. Diese Thematik wird nochmals spezifisch im folgenden Unterkapitel 3.7.2 thematisiert und beschrieben.

Wenn angenommen wird, dass die Steuern nach dem „Verursacher-Prinzip“ verteilt werden, dann kann es sein, dass im Falle einer lebenszyklusbasierten Betrachtung einer Wärmepumpe deren Hersteller für die in den Lebenszyklusphasen der Herstellung und Entsorgung entstandenen Grauen Emissionen aufkommen muss und der Gebäudeeigentümer bzw. -nutzer für die Kosten der Operativen Emissionen, die sich aus dem Stromverbrauch der Wärmepumpe bei deren Nutzung ergeben. Es kann passieren, dass die Kosten, die der Hersteller für die Grauen Emissionen bezahlen muss, bereits in die Herstellungskosten der TGA-Komponenten eingerechnet werden. Wenn dies in Zukunft der Fall sein sollte, muss darauf geachtet werden, dass keine doppelte Bepreisung der Grauen Emissionen durch den im Rahmen dieser Methode gewählten Ansatz erfolgt. Die Emissionsbepreisung kann ein indirekter Anstoß zur Erstellung produktspezifischer Environmental Product Declarations (EPDs) und LCAs sein.

### 3.7.2. Diskontierung in der Lebenszykluskostenanalyse

Die Diskontierung bzw. das zeitbezogene Aufzinsen von Energie-, Baupreis- und Emissionskosten erfolgt nach der Formel 3.62. Die sich daraus ergebende Energie-, Baupreis- und Emissionskostensteigerung ermöglicht Kostenabschätzungen für Energieaufwendungen, TGA-Komponenten und Emissionen in Relation gesetzt zum Betrachtungszeitraum und -jahr. Die hierfür notwendigen Definitionen können für jeden Berechnungsdurchlauf neu über die GUI von urbi+ definiert werden. Im Rahmen der Methode werden alle anfallenden Kosten über den jeweiligen Entwicklungszeitraum bzw. Lebenszyklus mit Preissteigerungen und Kalkulationszinssätzen versehen und bei den Berechnungen berücksichtigt.

$$C_j = \sum_{t=1}^T \frac{K_{t,j} * (1 + m_j)^t}{(1 + i_j)^t} \quad (3.62)$$

- $C_j$  = Teilbarwert [€]  
 $K_{t,j}$  = Saldo der Zahlung im jeweiligen Jahr  $t$  [€]  
 $m$  = Preissteigerung bzw. -senkung [%]  
 $t$  = Jahr des Entwicklungszeitraums[-]  
 $T$  = Betrachtungszeitraum [-]  
 $i$  = Kalkulationszinssatz [%]

*Exkurs:* Für weiterführende Forschungsarbeiten kann angedacht werden, Emissionswirkungen und Energieverfügbarkeiten über Formel 3.62 mit abzubilden. Hierfür muss jedoch über eine Uminterpretation der Input-Variablen nachgedacht werden. Der Teilbarwert  $C_j$  wird dabei durch den Teilenergiewert  $E_j$  und den Teilemissionswert  $U_j$  ersetzt. Der Saldo der Zahlung im jeweiligen Jahr  $t$   $K_{t,j}$  wird als Saldo des Energie- bzw. Emissionswertes ( $E_{t,j}$  und  $U_{t,j}$ ) interpretiert. Die Preissteigerung oder -senkung  $m_g$  wird als Energie- und Emissionswertsteigerung oder -senkung ( $m_e$  und  $m_u$ ) benannt. Es besteht die Möglichkeit, dass z. B. 1 kg CO<sub>2</sub>-Äq. zum heutigen Zeitpunkt eine andere Wirkung auf unser Ökosystem hat als es vor 20 Jahren noch der Fall war oder wie es in weiteren 20 Jahren eventuell sein wird. Durch die Veränderung des Ökosystems ändern sich dessen Ökosystem-Dienstleistungen, z. B. in Bezug auf die Kompensation von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Stand in der Vergangenheit weltweit bspw. mehr Biomasse zur Kompensation von Emissionen zur Verfügung, so hatte 1 kg CO<sub>2</sub> nicht dieselbe Auswirkung auf unser Ökosystem wie zum heutigen Zeitpunkt mit weltweit deutlich weniger verfügbarer Biomasse. Somit resultiert die weltweit sinkende Anzahl an Bäumen in einer Reduktion des gesamten Speichervolumens von Kohlenstoff in Holz. Wenn immer weniger Bäume zur Kompensation der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Verfügung stehen, dann haben diese CO<sub>2</sub>-Emissionen eine höhere Wirkung auf den Klimawandel als in Zeiten, in denen es noch mehr Bäume weltweit gab. Ebenso hatte die z. B. in einem Kubikmeter Erdgas oder Erdöl enthaltene Energiemenge vor 20 Jahren einen geringeren Wert als heute. Durch schrumpfende Ressourcen und Reserven an Erdgas und Erdöl wird der Wert der in einem Kubikmeter Erdgas oder -öl enthaltenen Energiemenge weiter ansteigen und sich somit über die Zeit anpassen und verändern. Das Miteinbeziehen von Energie- und Emissionswertsteigerungen oder -senkungen ( $m_e$  und  $m_u$ ) würde damit ermöglichen, dass die Berücksichtigung der beschriebenen dynamischen und zeitgebundenen Veränderungen möglich wird. Das kann zu einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse der bereits in der Vergangenheit angefallenen und in Zukunft zu erwartenden Energiebedarfe und Emissionen führen.

### 3.8. Szenarienbetrachtung Gebäudeentwicklung

Mit den in den Kapiteln 2.1, 3.3, 3.5 und 3.7 beschriebenen Methoden können, je nach Definition und Anpassung der variablen Input-Parameter über die GUI von urbi+ (z. B. Angabe des Entwicklungszeitraums), unterschiedliche Entwicklungsszenarien gerechnet werden. Die Szenarien beziehen

sich dabei grundsätzlich auf eine energetische Sanierung des betrachteten Gebäudes oder Gebäudebestandes. Eine solche Sanierung kann bspw. durch die Anpassung der U-Werte und durch die Veränderung der Wärmeerzeuger in den Berechnungen abgebildet werden und unterschiedliche Einflüsse auf die Berechnungsergebnisse haben (Energiebedarf Heizen und TWW, Heizlast, Dimensionierung TGA-Komponenten, LCA, LCC).

Werden einzelne Gebäude für Untersuchungen ausgewählt, dann kann das Energiesystem gebäude-spezifisch definiert werden. Wenn jedoch ein ganzer Gebäudebestand mit einer Vielzahl an Gebäuden untersucht werden soll, wird die prozentuale Aufteilung der Energiesysteme auch für die Berechnung des gesamten Gebäudebestandes herangezogen. Sollten z. B. in einem Gebäudebestand 80 % der Gebäude über einen Gas-Kessel und 20 % über einem Öl-Kessel mit Wärme versorgt werden, dann wird die Energiebedarfsberechnung für jedes zu untersuchende Gebäude im Gebäudebestand auf der Basis dieser prozentualen Verteilung durchgeführt.

Es wird davon ausgegangen, dass der sich daraus ergebende Fehler geringer ist, als wenn unbestimmt 80 % der Gebäude im Gebäudebestand ein Gas-Kessel und 20 % der Gebäude ein Öl-Kessel zugewiesen werden würde. Für eine spezifische, logische Zuweisung fehlen notwendige Informationen und Daten. Durch die unterschiedlichen Gebäudegrößen und die daraus sich ergebenden Flächen der Gebäudekomponenten und Gebäudevolumina kann es bei unspezifischer Zuweisung, vor allem beim mehrmaligen Durchführen von Berechnungen, zu großen Abweichungen und ggf. unvorhersehbaren Fehlern kommen.

Was ebenfalls angemerkt werden muss, ist die im Rahmen der Methode fehlende Berücksichtigung der Dauer des Vorgangs einer Gebäudesanierung. Es wird der neue Energiebedarf der Gebäude nach der Sanierung für das gesamte Jahr angerechnet, in dem das Gebäude saniert wird, ohne die Dauer des Vorgangs einer Sanierung anteilig über das Jahr hinweg einzubeziehen.

Im Falle einer Sanierung wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass alle betrachteten Komponenten gesamtheitlich ausgetauscht werden. Zwischen einer Sanierung und einem Abriss und dem darauf folgenden Wiederaufbau eines Gebäudes wird bezüglich der Methode nicht nochmals explizit unterschieden. Zudem werden folgende weitere Annahmen im Rahmen der Methode zur Berechnung von Entwicklungsszenarien getroffen:

- Die energetische Sanierung der Gebäudehülle erfolgt über die Anpassung der **U-Werte** (Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch Verringern der U-Werte) des Daches bzw. der obersten Geschossdecke, der Bodenplatte bzw. Kellerdecke, der Außenwände und der Fenster, inklusive des Gesamtenergiedurchlassgrades (Energiedurchlassgrad (g-Wert)). In der Baupraxis passiert das bspw. durch zusätzliche Wärmedämmung der Gebäudekomponenten. Diese Maßnahmen haben einen direkten Einfluss auf den Nutz-, End- und somit auch Primärenergiebedarf sowie auf die Heizlast des Gebäudes und damit auf die Dimensionierung der TGA-Komponenten, also auch auf die Ergebnisse der LCA und LCC.

- Anpassung der **prozentualen Anzahl der beheizten Dachgeschosse**: Im Zuge von Sanierungsmaßnahmen kann es dazu kommen, dass Dachgeschosse ausgebaut und daraufhin wohnlich genutzt werden. Gerade in urbanen Ballungsgebieten mit hohen Mietkosten ist das häufig der Fall [161]. Zusätzlicher Wohnraum durch ausgebauten Dachgeschosse bedeutet gleichzeitig mehr thermisch zu konditionierender Wohnraum. Diese Änderung hat einen unmittelbaren Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes. Sollen Nachverdichtungsszenarien, z. B. Gebäudeaufstockungen, mitberücksichtigt werden, dann müssen diese Änderungen im 3D-Stadtmodell vorgenommen und Gebäudekubaturen angepasst werden.
- Veränderung der **Gebäudetechnik**: Im Zuge einer energetischen Sanierung eines Gebäudes kann sich das Energiesystem des Gebäudes anpassen. Hierbei sollten statt konventioneller Wärmeerzeuger wie z. B. Gas- oder Öl-Kessel Technologien der Erneuerbaren Energien zum Heizen und für das TWW eingesetzt werden. Mit der Änderung der Wärmeerzeuger ändern sich auch die Erzeugeraufwandszahlen und Hilfsenergien. Die Änderung hat zwar keinen Einfluss auf den Nutzenergiebedarf des Gebäudes, bestimmt jedoch dessen End- und Primärenergiebedarf. Bei einem Wechsel zu Technologien der Erneuerbaren Energien (z. B. Wärmepumpe, Solarthermie) steigt normalerweise der Anteil an genutzter Energie aus erneuerbaren Quellen (Umweltwärme und Sonneneinstrahlung). Der damit einhergehende, geringere Primärenergiefaktor (siehe Tabelle 3.1) wirkt sich reduzierend auf den Primärenergiebedarf in der Nutzungsphase aus.
- Anpassung der **Primärenergiefaktoren**: Durch die Änderung der Primärenergiefaktoren kann ein starker Einfluss auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes genommen werden (siehe Tabelle A.17, Anhang A, Seite 257). Dabei spielt der Einsatz von Technologien der Erneuerbaren Energien eine zentrale Rolle.
- Die Anpassung bzw. Änderung der **prozentualen Anteile an erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Energien der betrachteten Energiequellen**, z. B. die Änderung des Biogasan-teils am Gas-Mix, kann einen großen Einfluss auf die Verteilung des Primärenergiebedarfs zwischen PENRT und PERT haben. Steigt z. B. der Anteil an Strom aus erneuerbaren Quellen im deutschen Strom-Mix, so hat das einen positiven Effekt auf die Verschiebung der Anteile zwischen PENRT und PERT.
- Änderung der **durchschnittlichen Lebensdauer** von Wohngebäuden: Durch das Anpassen dieses Zeitraums verändert sich zum einen die Länge der Nutzungsphase des Gebäudes. Das bedeutet, dass absolut gesehen entweder weniger oder mehr Energiebedarf, aber auch entsprechend Emissionen, in der Nutzungsphase anfallen. Zum anderen richtet sich die Häufigkeit des Austausches der TGA-Komponenten nach der durchschnittlichen Lebenszyklusbauer des Gebäudes. Mehr Austauschzyklen heißt auch, dass mehr Graue Energie aufgewendet wird und dadurch mehr Emissionen entstehen.
- Die Anzahl der Austauschzyklen hängt zudem von der Variablen „**Lebensdauer der TGA-Komponenten**“ ab. Bei einer Sanierung kann die Lebensdauer ebenfalls jeweils für die verwendeten TGA-Komponenten neu definiert werden.

- Änderung der **Kostenwerte der Energiequellen und Treibhausgasemissionen**: Die Kostenwerte der einzelnen Energiequellen können Auswirkungen auf die aus der Nutzungsphase resultierenden Kosten haben. Werden Kostenwerte verändert, kann das ebenso eine Einwirkung auf die Herstellungskosten der TGA-Komponenten haben.
- Änderung der jährlichen prozentualen **Preissteigerung** und des Kalkulationszinssatzes der Energiequellen, Treibhausgasemissionen und Bauprodukte: Durch die jährliche Änderung der Preissteigerung und des Kalkulationszinssatzes lassen sich die Kosten zukünftiger Sanierungen abschätzen. Die Änderung dieser Werte haben eine Auswirkung auf die LCC Ergebnisse aller LCC-Phasen, sowohl auf die Energiequellen und Treibhausgasemissionen als auch auf die Bauprodukte.
- Änderung der **Postleitzahl**: Wird eine andere Postleitzahl herangezogen, dann lässt sich das betrachtete Gebäude bzw. der betrachtete Gebäudebestand theoretisch gesehen in eine andere Region Deutschlands verschieben. Folglich könnte sich z. B. die jährliche Durchschnittstemperatur ändern. Diese hat einen Einfluss auf den Nutz-, End- und Primärenergiebedarf und auf die Heizlastberechnung, also auch auf die Dimensionierung der TGA-Komponenten und die LCA und LCC.
- Änderung der **Ortsfaktoren** für die Berechnung der LCC-Werte: Durch die Änderung der Ortsfaktoren lassen sich die Baukosten der betrachteten Gebäude bzw. Gebäudebestände für eine andere deutsche Region abbilden. Der Ortsfaktor wird dabei mit den LCC-Werten der LCC-Phasen *Herstellung, Austausch und Entsorgung* verrechnet.

Bei der *Szenarienbetrachtung der Gebäudeentwicklung* muss generell zwischen zwei Ansätzen unterschieden werden: Der Betrachtung der *Sanierung eines Einzelgebäudes* und der Betrachtung der *Sanierung mehrerer Gebäude* innerhalb eines Berechnungsdurchlaufes. Bei dieser Unterscheidung muss beachtet werden, dass die entwickelte Methode ihren Fokus auf die Betrachtung großer Wohngebäudebestände legt.

Die Sanierung mehrerer Gebäude, z. B. eines ganzen Stadtquartiers, passiert im iterativen Durchlauf über alle zu sanierenden Gebäude hinweg. Das Vorgehen bei der Sanierung mehrerer Gebäude ist also grundsätzlich nichts anderes als die Durchführung einer nacheinander abfolgenden Sanierung von Einzelgebäuden. Jedoch gibt es bei der Sanierung mehrerer Gebäude eine zeitliche Komponente, also einen Sanierungszeitraum, der definiert werden muss und der einen Einfluss auf das Ergebnis haben kann. Bei großen Gebäudebeständen ist es unwahrscheinlich, dass innerhalb eines Sanierungsszenarios alle Gebäude in einem Jahr saniert werden. Aufgrund dessen wird ein Sanierungszeitraum in Jahren definiert. Innerhalb des Sanierungszeitraums sollen alle betrachteten Gebäude auf einen definierten Standard saniert werden. Somit muss zunächst eine Sanierungsreihenfolge erstellt werden, die den jeweiligen Jahren eines Sanierungszeitraums Gebäude zur Sanierung zuweist. Die Dauer des Vorgangs der Sanierung (Ausbau alter TGA-Komponenten und Einbau neuer Komponenten) wird jedoch nicht mitbetrachtet. Wird ein Gebäude im zweiten Jahr eines Sanierungszeitraums saniert, dann werden für das gesamte zweite Jahr bereits die Energiebedarfe, Emissionen und Kosten für den sanierten Zustand des Gebäudes in die Bilanz mit aufgenommen.

### 3.8.1. Sanierung Einzelgebäude

Grundsätzlich kann die Betrachtung der Sanierung von Einzelgebäuden anhand der Methode vorgenommen werden. Hierbei müssen folgende Aspekte explizit berücksichtigt werden:

- Das einzelne zu betrachtende Gebäude muss klar anhand eines spezifischen Attributs im 3D-Stadtmodell identifizierbar sein. Dabei wird eines der folgenden Attribute, entweder *bldg:function* oder *bldg:usage*, mit einem numerischen Wert belegt, der ausschließlich nur einmal explizit für das zu betrachtende Gebäude vorkommt.
- Vor und nach der Sanierung wird grundsätzlich dieselbe Gebäudekubatur angenommen, insofern kein Wechsel der CityGML-Dateien zwischen der Berechnung des Status quo und der Sanierung vorgenommen wird, in der sich das betrachtete Gebäude in seiner Kubatur unterscheidet. Sollen Aufstockungen oder Anbauten etc. mitberücksichtigt werden, dann müssen diese Änderungen im 3D-Stadtmodell vorgenommen werden.
- Die Sanierung eines einzelnen Gebäudes innerhalb eines Berechnungsdurchlaufes ist an keine zeitliche Komponente bzw. keinen Sanierungszeitraum geknüpft. Bei der Betrachtung der Sanierung von Einzelgebäuden wird jeweils von einer aktuell durchgeführten Sanierung ausgegangen. Es kann somit keine Sanierung des Gebäudes in bspw. fünf Jahren berechnet werden. Da keine Kalkulationszinssätze und Preissteigerungen berücksichtigt werden, lassen sich keine zukünftig anfallenden Kosten abbilden.
- Der Vorteil bei der Betrachtung der Sanierung von Einzelgebäuden ist, dass die TGA-Komponenten gebäudescharf definiert werden können. Bei der Sanierung mehrerer Gebäude wird die durchschnittliche Energiesystemverteilung auf alle betrachteten Gebäude umgelegt (siehe folgendes Kapitel 3.8.2).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Betrachtung der Sanierung von Einzelgebäuden im Rahmen der entwickelten Methode mit einer gebäudespezifischen Definition der Energiesysteme nur möglich ist, wenn sich ein einzelnes Gebäude anhand seiner spezifischen ID im 3D-Stadtmodell für die Berechnung identifizieren lässt. Die Berücksichtigung einer terminierten Sanierung ist in diesem Fall jedoch nicht möglich. Die Ergebnisse basieren auf den Annahmen und Grundlagen, die im Rahmen der Methodenentwicklung getroffen wurden und die es erlauben, eine Großzahl an Gebäuden zu untersuchen. Für spezifische Fallentscheidungen auf Gebäudeebene müssen zusätzlich thermische Gebäudesimulationen und weiterführende detaillierte Berechnungen durchgeführt werden.

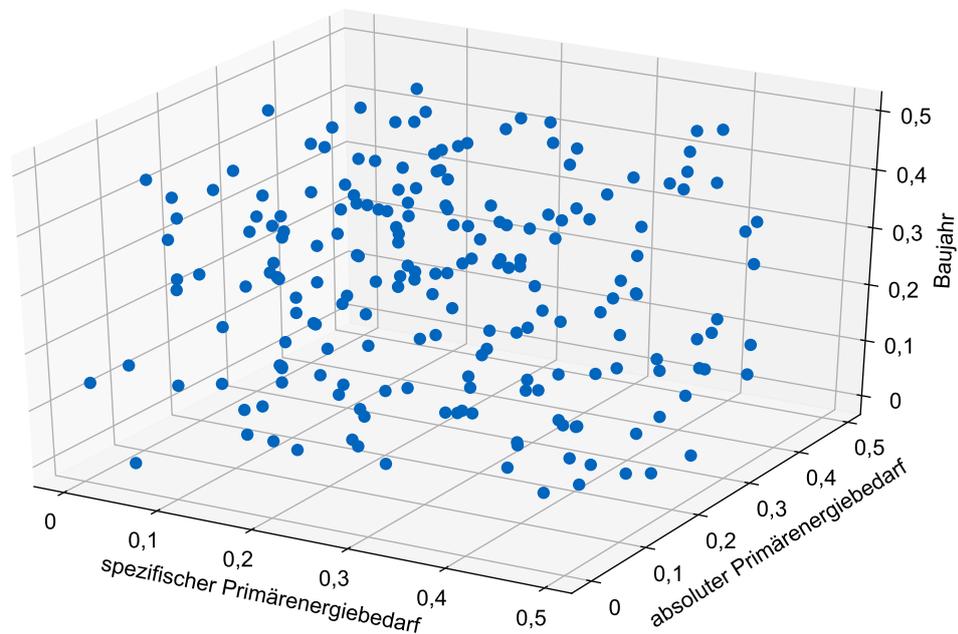
### 3.8.2. Sanierung großer Gebäudebestände

Bei der Betrachtung der Sanierung mehrerer Gebäude (Gebäudezeile, Stadtquartier, gesamte Stadt etc.) innerhalb eines Entwicklungsszenarios ergeben sich im methodischen Verlauf Anpassungen und Zusätze. Die Durchführung der Sanierung mehrerer Gebäude innerhalb eines Sanierungs- oder Entwicklungsszenarios erfolgt in einem iterativen Prozess über alle zu sanierenden Gebäude hinweg. Die Reihenfolge der zu sanierenden Gebäude innerhalb des Szenarios richtet sich dabei nach dem Baualter und dem absoluten sowie spezifischen Primärenergiebedarf des Gebäudes im Status quo.

Folgende Dinge müssen bei der Sanierung mehrerer Gebäude innerhalb eines Szenarios beachtet werden:

- Alle zu sanierenden Gebäude müssen klar anhand der bereits in Kapitel 3.8.1 erwähnten spezifischen Attribute *bldg:function* oder *bldg:usage* im 3D-Stadtmodell identifizierbar sein.
- Wichtig ist zu beachten, dass die Gesamtanzahl der zu sanierenden Gebäude des Gebäudebestandes größer bzw. gleich groß der Anzahl der Jahre des Entwicklungs- oder Sanierungszeitraums ist. Denn die entwickelte Methode berücksichtigt eine gleichförmige Verteilung der Sanierungslast aller Gebäude über das Entwicklungsszenario hinweg. Eine Gebäudesanierung kann sich somit nicht über mehr als ein Jahr erstrecken.
- Es ist zu bezweifeln, dass bei der Betrachtung einer Sanierung eines großen Gebäudebestandes alle Gebäude gleichzeitig saniert werden. Daher muss ein Sanierungszeitraum definiert werden, innerhalb dessen alle betrachteten Wohngebäude saniert werden. Die Definition eines Sanierungszeitraums ermöglicht die Verteilung der Sanierungslast über einen definierten Zeitraum und die jahreweise Analyse z. B. der Entwicklung des Heizenergiebedarfs innerhalb des Sanierungszeitraums. Daraus lässt sich die durch eine Sanierung erfolgte Einsparung des Heizenergiebedarfs im Vergleich zur eingesetzten Grauen Energie über den Zeitverlauf hinweg aufzeigen. Diese Auswertung ist gerade im Hinblick auf die Berechnung der Amortisationsdauer ausschlaggebend.
- Um die Sanierungslast über den Sanierungszeitraum zu verteilen, wird eine Sanierungsreihenfolge definiert. Die Reihenfolge ergibt sich dabei aus einem für alle Untersuchungen gewählten dreidimensionalen normierten Entscheidungsraum zwischen den Baujahren der Gebäude, dem spezifischen und dem absoluten Heizwärmebedarf (siehe Abbildung 3.6 auf Seite 89). Dieser Entscheidungsraum kann theoretisch für jeden Berechnungsdurchlauf neu bemessen werden. Die sich aus diesem Beispiel ergebende Reihenfolge richtet sich danach, dass zuerst die ältesten Gebäude mit dem höchsten spezifischen und absoluten Heizwärmebedarf saniert werden und darauf aufbauend abgestuft wird. Dabei werden die Werte der drei Bewertungsdimensionen auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 normiert, um eine Vergleichbarkeit der Werte zu schaffen. Im Folgeschritt wird der jeweilige gebäudespezifische Wert durch den Maximalwert der betrachteten Dimension geteilt. Die sich ergebenden Werte der Dimensionen werden aufsummiert. Daraus ergibt sich folglich ein Wert zwischen 0 und 3. Es werden somit die Gebäude als erste saniert, deren Summenwert aus den Dimensionen am nächsten an 3 liegt. Die drei Dimensionen sind nicht gewichtet und fließen gleichwertig in die Erstellung der Sanierungsreihenfolge mit ein. Die Gesamtanzahl der zu sanierenden Gebäude wird durch den Sanierungszeitraum geteilt, um die Anzahl an Gebäuden, die pro Jahr zu sanieren sind, zu erhalten. Für den Fall, dass sich daraus eine Dezimalzahl ergibt, wird auf eine ganze Zahl abgerundet. Das kann dazu führen, dass im letzten Jahr des Entwicklungs-/Sanierungszeitraums mehr oder weniger Gebäude saniert werden müssen als im Durchschnitt der vorherigen Jahre.
- Grundsätzlich wird auch bei der Sanierung mehrerer Gebäude davon ausgegangen, dass sich die Kubatur des Gebäudes bei der Sanierung nicht ändert. Es besteht jedoch auch hier die Möglichkeit, sich ändernde Kubaturen, z. B. im Sinne einer Nachverdichtung durchgeführte

Gebäudeaufstockungen und neu errichtete Gebäude, mitzubetrachten. Die Änderungen in der Kubatur oder zusätzliche Gebäude müssten dann allerdings vorab im 3D-Stadtmodell angepasst und mitmodelliert werden.



**Abbildung 3.6.:** Beispielhafter normierter Entscheidungsraum zur Erstellung der Sanierungsreihenfolge (eigene Abbildung)

- Bei der Auswahl der zu sanierenden Gebäude besteht zudem die Möglichkeit, die Gebäudeauswahl anhand des Baualters einzugrenzen. Es kann eine Zeitspanne definiert werden, mit der angegeben wird, welche Baujahre bevorzugt saniert werden sollen, z. B. Baujahr 1950 bis 2000.
- Da der baukonstruktive Originalzustand des Gebäudes anhand der Informationen aus den 3D-Stadtmodellen nicht bewertet werden kann, werden zunächst alle ausgewählten Wohngebäude im betrachteten Gebiet für eine Sanierung herangezogen. Ausgeschlossen werden können Gebäude anhand ihres Baujahres oder anhand eines spezifischen Attributes (*bldg:function*, *bldg:usage*), das Gebäude als Nichtwohngebäude identifiziert und somit von der Berechnung ausnimmt. Daten von Kaminkehrer/-innen könnten Aufschluss über gebäudespezifische Energiesysteme geben. Jedoch werden diese Daten in großen Kommunen weder in einem zentralen Register erfasst noch stehen diese aus Datenschutzgründen zur freien Verfügung.
- Im Falle der Sanierung mehrerer Gebäude wird der Durchschnitt der Energiesysteme, der für den gesamten zu betrachtenden Gebäudebestand definiert wird, für die Berechnung auf Gebäudeebene herangezogen. Das bedeutet, dass wenn 80 % der Wohngebäude eines betrachteten Gebäudebestandes mit Gas-Kesseln und 20 % mit Öl-Kesseln beheizt werden, genau diese

prozentuale Verteilung der Energiesysteme für alle Berechnungen auf Gebäudeebene verwendet wird. Wird ein Gebäude saniert, gelten für alle Berechnungen die Annahmen der für eine Sanierung definierten Variablen (siehe Auflistung in diesem Kapitel 3.8). Die Ermittlung des Primärenergiebedarfs und der LCC-Werte sind davon ausgenommen.

- Bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs wird der Primärenergiefaktor benötigt. Dieser kann sich jedoch über einen Sanierungszeitraum anpassen. Vor allem bei langen Sanierungszeiträumen von über 30 Jahren kann sich bspw. der Primärenergiefaktor von Strom sukzessive über die Zeit ändern und verringern oder erhöhen. Die für die Berechnung der einzelnen Jahresbilanzen angesetzten Primärenergiefaktoren ergeben sich bei einer sukzessiven Anpassung über die Jahre aus der Formel 3.63.

$$f_{P,a} = f_{P,a-1} - \frac{f_{P,0} - f_{P,x}}{a_S} \quad (3.63)$$

$f_{P,i}$	=	jährlich angepasster Primärenergiefaktor [-]
$f_{P,i-1}$	=	angepasster Primärenergiefaktor Vorjahr [-]
$f_{P,0}$	=	Primärenergiefaktor Status quo [-]
$f_{P,x}$	=	Primärenergiefaktor nach Sanierung [-]
$a_S$	=	Sanierungszeitraum [a]

- Bei der Berechnung der LCA der TGA-Komponenten kann es z. B. bei Gebäuden, die im Sanierungszeitraum zuerst saniert wurden, zu einem weiteren Austausch an Komponenten innerhalb des Entwicklungszeitraums kommen. Wird ein Gebäude im ersten Sanierungsjahr eines 30-jährigen Sanierungszeitraums saniert und dabei elektrische Durchlauferhitzer mit einer erwarteten Lebensdauer von 15 Jahren (siehe Ökobaudat [59]) eingebaut, dann bleibt der für den Sanierungszeitraum gewählte energetische Standard gleich und es werden zusätzlich die definierten Austauschzyklen in der Phase B4 betrachtet.
- Die Lebensdauer von Gebäuden geht in der Regel nach dem Sanierungszeitraum weiter. Wenn ein Gebäude erst im letzten Jahr eines Sanierungszeitraums saniert wird, wird das Gebäudealter auf das Jahr null gesetzt und es beginnt eine weitere Nutzung des Gebäudes über den in der GUI von urbi+ definierten Wert für die durchschnittliche Lebensdauer der Wohngebäude. Wurde ein Gebäude saniert, dann wird keine weitere grundlegende Sanierung, also kein Austausch aller TGA-Komponenten zu einem Zeitpunkt, angenommen. Die TGA-Komponenten, die in dem Zeitraum nach der Sanierung am Ende ihres Nutzungszeitraums angekommen sind, werden ausgetauscht und die daraus resultierenden Werte fließen mit in die Bilanz ein. Die somit über die folgende Lebensdauer anfallenden Energiebedarfe und Umweltwirkungen (Graue und Operative Energie, Emissionen und Kosten) werden je Indikator zu einem Wert aufsummiert und mit bilanziert.

- Bei der Berechnung der Kostenwerte muss beachtet werden, dass sich diese je nach definierter prozentualer jährlicher Preissteigerung und -senkung sowie des Kalkulationszinssatzes anpassen (siehe Kapitel 3.7.2).

### 3.9. Export und Visualisierung der Ergebnisse

Für den Export und die Darstellung der Berechnungsergebnisse gibt es drei verschiedene Möglichkeiten. Eine Möglichkeit ist der Export der Zwischen- und Endergebnisse ins Excel- oder CSV-Format (siehe Kapitel 3.9.1). Somit können die Ergebnisse auf der Basis weit verbreiteter Softwarelösungen weiterbearbeitet und anhand der Daten, Grafiken und Darstellungen sowie Auswertungen erarbeitet werden. Die andere Möglichkeit ist die Visualisierung der Gebäude und Ergebnisse durch Nutzung des *3DCityDB Web-Map-Viewers* (siehe Kapitel 3.9.2). Ein Zwischenschritt auf dem Weg zur Visualisierung der Ergebnisse im *3DCityDB Web-Map-Viewer* ist das Schreiben aller zu visualisierenden Werte in die für die Berechnungen genutzte CityGML-Datei. Die mit den Ergebnissen angereicherte CityGML-Datei ist somit die dritte Möglichkeit zur Datenspeicherung und zum Daten-Export.

#### 3.9.1. Export der Ergebnisse

Für den Export können jegliche Zwischen- und Endergebnisse aller Berechnungsschritte in urbi+ gewählt werden. Bislang ergeben sich für jedes berechnete Gebäude in Summe 2.272 einzelne Ergebnisse, die exportiert werden. In Tabelle A.9 (siehe Anhang A, Seite 252) sind alle gewählten Kategorien für den Export aufgelistet.

Der Export in Excel oder CSV erlaubt eine direkte Datenweiterverarbeitung und spezifische Datenauswertungen. Zudem können die Daten dann wiederum in andere Programme/Datenbanken importiert und weiterverarbeitet werden.

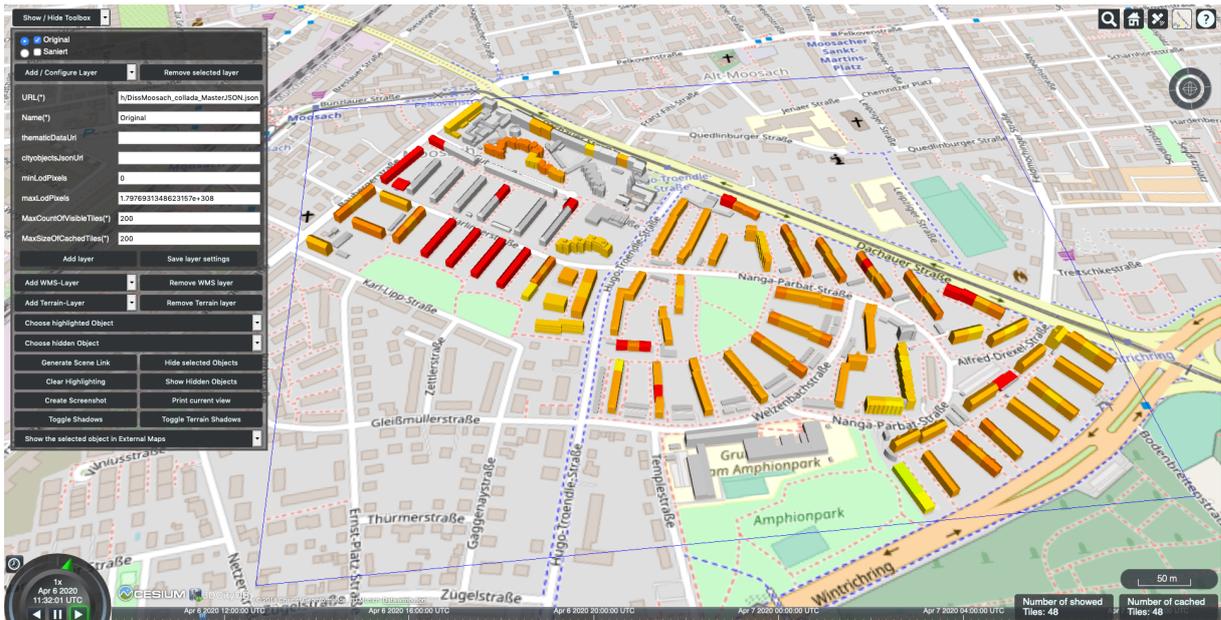
#### 3.9.2. Visualisierung der Ergebnisse

Zum besseren Verständnis und zur anschaulicheren Kommunikation der berechneten gebäudebezogenen Ergebnisse können diese mithilfe einer 3D-Visualisierung dargestellt werden. Hierfür wird das browserbasierte Tool *3DCityDB Web-Map-Viewer* (siehe Beschreibung in Kapitel 3.1.1) verwendet. Bei der Darstellung und Visualisierung der Ergebnisse wird zwischen zwei Arten unterschieden: der *farblichen Darstellung* und der *alphanumerischen Darstellung* der Ergebnisse. Beide Darstellungsarten können in Form von Szenarien im *3DCityDB Web-Map-Viewer* hinterlegt und einzeln zur Visualisierung ausgewählt werden. Daraufhin können mögliche Verbesserungen oder Verschlechterungen des gewählten Indikators (GWP, PERT, PENRT, Kosten) durch die Berechnung der Szenarien aufgezeigt und visuell auf der Basis großer Gebäudebestände dargestellt werden (siehe Abbildungen 3.7 und 3.8 auf Seite 93). Auf diese Art und Weise lassen sich verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten für unterschiedliche Ergebnis- und Indikatorwerte für denselben Gebäudebestand hinterlegen.

Für eine *farbliche Darstellung* können für verschiedene Ergebnisse Codierungen angelegt werden, anhand derer die visualisierten Gebäude eingefärbt werden (siehe Abbildung 3.7 auf Seite 93). Die in Abbildung 3.7 gezeigte Einfärbung orientiert sich z. B. an dem Farbband des Energieausweises (siehe Abbildung B.3, Anhang B, Seite 290). Das Farbband gibt Auskunft über den spezifischen End- und Primärenergiebedarf des betrachteten Gebäudes und dient zur Erläuterung einer beispielhaften Visualisierungsmöglichkeit der Ergebnisse. In Abbildung 3.7 auf Seite 93 sind die aufgezeigten Gebäude, basierend auf dem spezifischen Primärenergiebedarf der Nutzungsphase (B6) des Status quo, nach dem Farbschema des Energieausweises eingefärbt. Abbildung 3.8 auf Seite 93 zeigt die betrachteten Gebäude in einem nach dem KfW55-Standard sanierten Zustand. Es gibt eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Visualisierung (z. B. Einfärbung anhand des Baualters, des Wertes des GWPs, das beim Austausch der Komponenten über den Lebenszyklus anfällt etc.).

Das im Folgenden beschriebene Vorgehen muss entsprechend der ausgewählten Visualisierungsmöglichkeit angepasst werden. Das grundsätzliche Vorgehen bleibt dabei gleich. Für das gewählte Beispiel ergeben sich die in der Tabelle A.10 im Anhang A (siehe Seite 254) dargestellten Definitionen zur Visualisierung des spezifischen Primärenergiebedarfs auf Gebäudeebene. Die Farbvariationen und die Wertebereiche hierfür können beliebig vorgenommen und angepasst werden. Die gebäude-spezifisch erzeugte Farbcodierung wird in den darauffolgenden Schritten dem Gebäudeobjekt als *Appearance*-Attribut in der CityGML-Datei angehängt. Es besteht die Möglichkeit, mehrere *Appearances* zu erzeugen und dem Gebäude anzuhängen bzw. das Gebäude für jedes berechnete Szenario einzufärben. Die *Appearances*-Attribute können weiterführend beim Import der mit den Ergebnissen angereicherten CityGML-Datei im *Importer/Exporter* gelesen und in die Datenbankstruktur eingetragen sowie beim Export der Datei zur Visualisierung spezifisch ausgewählt werden. Somit lassen sich für dasselbe 3D-Stadtmodell in einer Datei verschiedene Einfärbungsmuster hinterlegen, die als unterschiedliche Szenarien aufgezeigt werden können.

Die beschriebene Farbcodierung des *spezifischen Primärenergiebedarfs* richtet sich nach einem vorgegebenen Wertebereich. Werden jedoch Ergebnisse visualisiert, für die eine Definition eines vorgegebenen Wertebereichs nicht existiert, so muss der Wertebereich zuvor erst berechnet und erstellt werden. Als Beispiel kann die Visualisierung des *absoluten Primärenergiebedarfs* genannt werden. Der Wertebereich kann dabei z. B. aus der Differenz zwischen dem geringsten und dem höchsten absoluten Primärenergiebedarf aller betrachteten Gebäude entstehen. Die Differenz wird dann, gleich wie beim *spezifischen Primärenergiebedarf*, wiederum in zehn Wertebereiche unterteilt. Diese bekommen dieselben Farbcodierungen zugewiesen wie beim spezifischen Primärenergiebedarf (siehe Tabelle A.10, Anhang A, Seite 254). Die Gebäude mit dem niedrigsten *absoluten Primärenergiebedarf* werden grün und die mit dem höchsten Wert rot eingefärbt (siehe z. B. Abbildung 3.7 auf Seite 93). Dieser Wertebereich kann sich von Szenario zu Szenario bzw. zwischen den zu untersuchenden Gebäudebeständen unterscheiden. Die *numerische Darstellung* bezieht sich auf eine gebäudespezifische Auflistung der errechneten Ergebnisse. Mit dem *3DCityDB Web-Map-Viewer* ist es möglich, einzelne Gebäude auszuwählen und die dafür hinterlegten Informationen in einem daraufhin erscheinenden Fenster anzuzeigen. Die Informationen können beliebig gewählt und aufgeführt werden.



**Abbildung 3.7.:** Beispielhafte Visualisierung des Gebäudebestandes im Status quo, inkl. der Einfärbung nach spezifischem Primärenergiebedarf [kWh/m<sup>2</sup>\*a] und Farband des Energieausweises (Quelle: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109])



**Abbildung 3.8.:** Beispielhafte Visualisierung des Gebäudebestandes nach Sanierung, inkl. der Einfärbung nach spezifischem Primärenergiebedarf [kWh/m<sup>2</sup>\*a] und Farband des Energieausweises (Quelle: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109])

Wie bei der farblichen Darstellung ist es auch bei der alphanumerischen Darstellung der Ergebnisse möglich, diese anzupassen und zu variieren. Sobald die Werte zur alphanumerische Darstellung festliegen, wird für jedes dieser Werte ein *generisches Attribut* erstellt, das dem Gebäudeobjekt in der CityGML-Datei angehängt wird. Diese *generischen Attribute* werden beim Importieren der CityGML-Datei durch den *Importer/Exporter* in die *3DCityDB* geschrieben. Im nächsten Schritt wird durch die Nutzung des *Spreadsheet Generator Plugin (SPSHG)* im *Importer/Exporter* eine Textdatei erstellt, die als Online-Tabelle (Google Fusion Table) hochgeladen und über die *Google Cloud* bereitgestellt werden kann. Der *3DCityDB Web-Map-Viewer* greift über einen generierten Link auf die Daten in diesen Tabellen zu und ordnet die jeweiligen Informationen den Gebäuden zu.

Das gesamte methodische Vorgehen zur farblichen und alphanumerischen Darstellung von Werten aus CityGML-Dateien wurde bereits vom Lehrstuhl für Geoinformatik der TUM dokumentiert [163] und wird deshalb hier nicht weiter im Detail wiederholt und beschrieben.

Die farbliche und alphanumerische Darstellung der Ergebnisse ermöglicht im Besonderen eine gebäudespezifische als auch eine quartiersbezogene Darstellung der Ergebnisse. Diese beziehen sich dabei jedoch auf gebäudespezifische Ergebniswerte und nicht auf die Ergebniswerte der Entwicklungsszenarien. Die räumliche Darstellung und Einfärbung ermöglicht es, einen schnellen Überblick hinsichtlich der ausgewählten Indikatorergebnisse zu bekommen. In Bezug auf den spezifischen Primärenergiebedarf könnten z. B. ganze Häuserreihen (Zeilenbebauungen) mit hohem Energiebedarf identifiziert werden, bei denen es sinnvoll wäre, diese in einem Verbund zu sanieren.

**Kurzfassung der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Gebäudebestände:**

- Die in dieser Dissertation entwickelte Methode wird programmierseitig umgesetzt und mündet in einem Softwaretool, genannt urbi+, das es ermöglicht, die Methode iterativ auf eine beliebig große Anzahl von Gebäuden anzuwenden.
- Dabei werden folgende methodische Schritte durchlaufen (siehe Abbildung 3.1 auf Seite 22):
  1. Datenakquise
  2. Datenverarbeitung
  3. Energiebedarfs- und Heizlastberechnung
  4. Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten
  5. Lebenszyklusanalyse (Energie, Emissionen und Kosten)
  6. Export der Ergebnisse.
- Die Energiebedarfs- und Heizlastberechnung sowie die Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten wird grundsätzlich basierend auf Normen durchgeführt.
- Bei der Dimensionierung werden folgende TGA-Komponenten berücksichtigt: verschiedene Wärmeerzeuger, Wärmespeicher, Rohrleitungen zur Wärmeverteilung und Wärmeübergabesysteme.
- Im Rahmen der Methodenentwicklung wird zudem zum Teil auf bereits bestehende Softwarelösungen und Programmierschnittstellen, z. B. zur Berechnung von Gebäudevolumen, zurückgegriffen und aufgebaut.
- Grundlage für die Berechnungen sind Informationen bzw. Daten aus 3D-Stadtmodellen im CityGML-Standard.
- Für die Berechnungen fehlende Informationen bzw. Daten werden durch Annahmen ersetzt, die über die GUI von urbi+ bereitgestellt werden.
- Anhand der Methode bzw. urbi+ können sowohl der Status quo eines Gebäudebestandes, als auch verschiedene Entwicklungsszenarien dafür bilanziert und analysiert werden.
- Der Export der Ergebnisse erlaubt deren 3D-Visualisierung zur anschaulicheren Kommunikation der berechneten gebäudebezogenen Ergebnisse.



## **Teil III**

# **Anwendung der Methode**



## 4. Anwendung und Validierung der Methode anhand von Fallbeispielen

Die im vorherigen Teil II der Dissertation beschriebene Methode zur Lebenszyklusanalyse (LCA) der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) wird im Folgenden im Detail auf drei Ebenen angewendet:

- Gebäudeebene
- Stadtquartiersebene
- Stadtebene

Zur Anwendung der Methode durch urbi+ wurden praxis- und wissenschaftsnahe Fallbeispiele gewählt. Neben der Anwendung der Methode sowie der Analyse und Beschreibung durch die von urbi+ errechneten Ergebnisse wird deren Validierung angestrebt. Das Wort „Validieren“ wird laut dem Duden [164] definiert als „die Gültigkeit, den Wert von etwas feststellen, bestimmen“. In dieser Dissertation wird das wie folgt interpretiert: Die Berechnungsergebnisse aus urbi+ werden mit Ergebnissen aus bereits validierten Ansätzen, Forschungsarbeiten, Methoden und Tools verglichen. Die sich gegebenenfalls aus dem Vergleich ergebenden Abweichungen werden spezifisch untersucht und erläutert bzw. begründet. Daraus erwächst eine Wertfeststellung, also eine Gültigkeit der Ergebnisse von urbi+.

Zur Validierung werden die einzelnen methodischen Schritte, nämlich die Energiebedarfsberechnung, die Heizlastberechnung, die Dimensionierung der Komponenten der Technische Gebäudeausrüstung (TGA), die energetische und emissionsbezogene LCA und die Lebenszykluskostenanalyse (LCC) separat betrachtet (siehe Abbildung 3.1, Seite 22).

Da die Berechnung mehrerer Gebäude innerhalb eines Fallbeispiels auf (Stadtquartiers- und Stadtebene) immer als iterativer Berechnungsprozess über alle betrachteten Wohngebäude abläuft, findet die hauptsächliche Validierung der methodischen Blöcke auf Gebäudeebene statt. Zudem gibt es keine Softwaretools, die einen gleichen methodischen Ansatz verfolgen wie in dieser Arbeit entwickelt und die für die Validierung des Gesamtansatzes der entwickelten Methode herangezogen werden können.

Durch die Anwendung von urbi+ werden in den betrachteten Fallbeispielen jeweils 2.272 einzelne, alphanumerische Ergebniswerte pro berechnetem Gebäude exportiert. Diese werden zur lebenszyklusbasierten Analyse der energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bilanz herangezogen. Dabei können je nach Rechenleistung und Speicherkapazität des für die Berechnungen verwendeten Computers beliebig viele Wohngebäude betrachtet, berechnet und analysiert werden. Im Falle der

Berechnungen auf der Stadtebene München werden mehr als 2,6 Mio. Datenpunkte bzw. Ergebniswerte generiert und exportiert.

Zusätzlich zur Anwendung und Validierung der Methode wird eine Unsicherheitsanalyse hinsichtlich aller variablen Input-Parameter für die Berechnungen in urbi+ durchgeführt. Das Variieren von Input-Parametern ergibt sich aufgrund fehlender Informationen z. B. zu gebäudespezifisch verbauten Energiesystemen. Nicht vorhandene Informationen werden durch Annahmen ersetzt, die eine Unsicherheit beinhalten. Die Werte, die im Rahmen der Annahmen bestimmt werden, können in einem festgelegten Wertebereich variieren und dadurch eine Varianz im Endergebnis hervorrufen. Anhand der Erkenntnisse aus der Unsicherheitsanalyse lassen sich somit die Ergebnisse aus urbi+, in Relation zu den jeweiligen Definitionen der Input-Parameter, besser beurteilen. Zudem können Input-Parameter identifiziert werden, die durch ihr Variieren einen signifikanten Einfluss auf die Varianz der Ergebnisse haben. Weiterführend können daraus Anforderungen an die Datengenauigkeit bzw. -vollständigkeit von 3D-Stadtmodellen in Bezug auf LCAs und LCCs abgeleitet werden. Hieraus ergeben sich Fragestellungen und Aufgabenbereiche für zukünftige Forschungsarbeiten.

## **4.1. Anwendung der Methode auf Gebäudeebene**

Die Anwendung der Methode auf Gebäudeebene findet anhand drei verschiedener Fallbeispiele statt (siehe Kapitel 4.1.1 für Definition der Fallbeispiele). Das Kapitel untergliedert sich dabei in vier Teile:

1. Durchführung und Validierung der Flächenberechnung der Gebäudekomponenten (Fallbeispiel 1)
2. Durchführung und Validierung der Heizlastberechnung (Fallbeispiel 1)
3. Durchführung und Validierung der Heizenergiebedarfsberechnung (Fallbeispiel 1)
4. Durchführung und Validierung der Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten sowie der LCA und LCC (Fallbeispiele 2 und 3)

### **4.1.1. Definition der Fallbeispiele auf Gebäudeebene**

Wie bereits im Kapitel zuvor erwähnt, werden drei verschiedene Gebäudemodelle für die Berechnungen und zur Validierung herangezogen.

#### **Fallbeispiel 1**

Für die Durchführung und Validierung der Flächenberechnung der baukonstruktiven Gebäudekomponenten (Wand-, Boden- und Dachflächen) sowie der Heizenergie- und Heizlastberechnung wird ein im Jahr 1960 erbautes Mehrfamilienhaus mit sechs Stockwerken (EG und fünf Obergeschosse) als Fallbeispiel verwendet (siehe Abbildung 4.1 auf Seite 101). Die Gebäudehülle wurde im Jahr 2013 energetisch saniert; im Jahr 2016 wurde ein neuer Wärmeerzeuger eingebaut. Das Gebäude wird ausgewählt, weil ein Energiebedarfsausweis sowohl für den unsanierten als auch sanierten Zustand sowie ein 3D-Gebäudemodell (CityGML-Format in LoD2) vorliegt. Der Energieausweis

für den unsanierten Zustand des Gebäudes wurde im Jahr 2009 erstellt, wobei das Baujahr der Anlagentechnik mit 1980 angegeben ist. Der sich auf den sanierten Zustand des Gebäudes beziehende Energieausweis stammt aus dem Jahr 2013. Das 3D-Gebäudemodell des aufgezeigten Fallbeispiels setzt sich in der CityGML-Datei aus vier Einzelgebäudemodellen zusammen. Somit müssen Gebäudetrennwände bei der Berechnung mitberücksichtigt werden.



**Abbildung 4.1.:** Digitale Darstellung des Fallbeispiel 1 (Quelle: Energieausweis 2009)

### Fallbeispiele 2 und 3

Für die Betrachtung der Dimensionierung der Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sowie der LCA und LCC werden die gleichen Fallbeispiele bzw. Gebäude wie in der Dissertation von Weißenberger [19] verwendet. Die Arbeit wird herangezogen, da sie, zusätzlich zur Dimensionierung der auch in dieser Arbeit betrachteten TGA-Komponenten eine energetische und emissionsbezogene Lebenszyklusanalyse der Komponenten thematisiert. Die beiden Gebäude, ein Ein- und ein Mehrfamilienhaus, sind Neubauten. Das Einfamilienhaus (EFH) ist ein dreigeschossiges Wohngebäude mit Keller-, Erd- und Dachgeschoss und wird als **Fallbeispiel 2** bezeichnet (siehe Abbildung B.4, Anhang B, Seite 290). Das Kellergeschoss ist unbewohnt und wird daher als ungeheizt angenommen und liegt somit außerhalb der energetischen Bilanzierungsgrenze. Das Gebäude spiegelt mit einer Wohnfläche von  $154 \text{ m}^2$  annähernd die durchschnittliche deutsche Einfamilienhauswohnfläche von  $143 \text{ m}^2$  wider [165].

Das Mehrfamilienhaus (MFH) besteht aus fünf Stockwerken (Keller-, Erd-, 1. Ober-, 2. Ober- und Dachgeschoss) und wird als **Fallbeispiel 3** betitelt (siehe Abbildung B.5, Anhang B, Seite 291). Auch hier wird das Kellergeschoss als nicht bewohnt und unbeheizt angenommen. Das Gebäude hat eine Wohnfläche von  $466 \text{ m}^2$ . Wird die Annahme getroffen, dass sich das Wohngebäude in drei Wohnungen (Erd-, 1. Ober-, 2. Obergeschoss) mit einer Belegung von jeweils vier Personen aufteilt, dann ergeben sich daraus rund  $39 \text{ m}^2$  Wohnfläche pro Person. Das wiederum entspricht annähernd dem deutschen Mittelwert an Wohnfläche mit  $43 \text{ m}^2$  pro Person [165].

## 4.1.2. Definition der Berechnungsparameter auf Gebäudeebene

### Flächenberechnung baukonstruktiver Gebäudekomponenten

Die Flächenberechnung erfolgt, ohne weitere Definition von Parametern, analog zu dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Vorgehen.

### Heizlastberechnung

Zusätzlich zu den Flächen der Gebäudekomponenten und dem Gebäudevolumen ist die Definition weiterer Input-Parameter für die Berechnung der Heizlast erforderlich. Das Gebäude wird einmal im unsanierten und einmal im sanierten Stadium berechnet. Folgende Parameter werden hierfür festgelegt:

- Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) je Gebäudeteil (siehe Tabelle 4.1)
- Energiedurchlassgrad (g-Wert) Fenster: Faktor unsaniert: 0,78, Faktor saniert: 0,5
- jährliche Durchschnittstemperatur in der Heizperiode Außenraum: 7,9 °C
- Mindesttemperatur Außenraum: -16 °C
- Durchschnittstemperatur Innenräume: 20 °C

Da sich die Klimadaten durch eine Sanierung nicht ändern, bleiben diese in beiden Szenarien gleich. Es wird der Standort München definiert.

Die U-Werte zur Berechnung lassen sich aus den Energiebedarfsausweisen (siehe Tabelle 4.1) erlesen. Die Klimadaten für den Außenraum ergeben sich aus ortsspezifischen Werten, angegeben in der DIN 12831:2003-08 [110]. Die Durchschnittstemperatur der Innenräume stammt ebenfalls aus dieser Norm.

**Tabelle 4.1.:** Definition der U-Werte anhand der Energiebedarfsausweise zur Energiebedarfs- und Heizlastberechnung im unsanierten und sanierten Zustand für das Fallbeispiel 1

Bauteil	U-Wert [W/m <sup>2</sup> *K]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> *K]
	unsaniert	saniert
Bodenplatte/Außenwand gegen Erdreich	1,00	0,30
Außenwände gegen Außenluft	0,40	0,16
Fenster	1,80	1,20
Decke gegen unbeheizten Dachraum/Dach	0,30	0,15

## Energiebedarfsberechnung

Für die Energiebedarfsberechnung (Raumheizung und Trinkwarmwasser (TWW)) werden, zusätzlich zu den bereits für die Heizlastberechnung definierten Parametern, noch folgende weitere Parameter für die Berechnungen definiert (siehe Tabelle 4.2):

**Tabelle 4.2.:** Definition der Berechnungsparameter zur Energiebedarfsberechnung im unsanierten und sanierten Zustand für das Fallbeispiel 1

Berechnungsparameter	Unsanierter Zustand	Sanierter Zustand
Anzahl beheizter Geschosse	6	6
Wärmeerzeuger - Heizen	100 % Gas	100 % LW-WP
Wärmeerzeuger - TWW	80 % Gas, 20 % Durchlauferhitzer	100 % LW-WP
Wärmeübergabesystem	100 % Radiatoren	100 % Fußbodenheizung

Die Wärmepumpe (WP) im sanierten Zustand ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (LW-WP), die sowohl zur Bereitstellung der Heizwärme für die Raumheizung als auch zur Bereitstellung des TWW verwendet wird.

## Dimensionierung TGA-Komponenten

Zur Berechnung und Validierung der Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten und der LCA sowie LCC wird der energetische Standard der Gebäudekomponenten durch die U-Werte festgelegt. Für das Ein- und Mehrfamilienhaus (Fallbeispiel 2 und 3) definieren sich die U-Werte nach Tabelle 4.3.

**Tabelle 4.3.:** Definition der U-Werte für das EFH und MFH (Fallbeispiel 2 und 3) nach Weißenberger [19]

Bauteil	U-Wert [W/m <sup>2</sup> *K]
Bodenplatte/Außenwand gegen Erdreich	0,35
Außenwände gegen Außenluft	0,28
Fenster	1,30
Decke gegen unbeheizten Dachraum	0,20
Dach	0,28

Zudem weisen die beiden Fallbeispiele die in Tabelle 4.4 auf Seite 104 definierten geometrischen Parameter auf, die analog dazu für die Berechnung in urbi+ verwendet wurden.

**Tabelle 4.4.:** Definition der Bauteilflächen des EFH und MFH (Fallbeispiel 2 und 3) nach Weißenberger [19]

Gebäudekomponente	EFH [m <sup>2</sup> ]	MFH [m <sup>2</sup> ]
Bodenplatte	89	173
Außenwände gegen Erdreich	92	177
Außenwände gegen Außenluft	208	290
Gebäudetrennwände	-	243
Fensterflächen	62	135
Dachflächen	108	290

Weiterführend werden die folgenden Energiesysteme (ES) in Form von Szenarien für die Berechnung und Validierung angenommen:

- Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage (50 % Deckungsgrad des Trinkwarmwasserbedarfs) und Warmwasserspeicher mit Fußbodenheizung oder Radiatoren (ES1)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage (80 % Deckungsgrad des Trinkwarmwasserbedarfs) und Warmwasserspeicher mit Fußbodenheizung oder Radiatoren (ES2)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektoren für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage (100 % Deckungsgrad des Trinkwarmwasserbedarfs) und Warmwasserspeicher mit Fußbodenheizung oder Radiatoren (ES3)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage (100 % Deckungsgrad des Trinkwarmwasserbedarfs) und Warmwasserspeicher mit Fußbodenheizung oder Radiatoren (ES4)
- Biomasse-Pelletkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage (50 % Deckungsgrad des Trinkwarmwasserbedarfs) und Warmwasserspeicher mit Fußbodenheizung oder Radiatoren (ES5)

Um eine Validierung der Ergebnisse aus urbi+ zu gewährleisten, werden die gleichen Energiesysteme wie bei Weißenberger [19] gewählt. Dabei werden nicht alle Wärmeerzeuger, die im Rahmen von urbi+ betrachtet werden können, für die Validierung herangezogen. Jedoch ist der methodische Ansatz zur Dimensionierung der Wärmeerzeuger für alle Varianten derselbe. Deshalb wird davon ausgegangen, dass eine Betrachtung der ausgewählten Wärmeerzeuger für eine Validierung hinreichend ist. Für die Berechnung und Validierung der Dimensionierungen der TGA-Komponenten werden alle zuvor beschriebenen Energiesysteme herangezogen. Für die LCA und LCC wird ein *Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage* (ES1) in Kombination mit dem Einfamilienhaus „Fallbeispiel 2“ herangezogen.

Dabei ist Folgendes zu beachten:

- Die Dimensionierung der Länge der Warmwasserleitungen und des Trinkwarmwasserspeichers bleiben über die Szenarien hinweg dieselbe, da sich durch eine energetische Sanierung der Gebäudehülle und des Energiesystems der Bedarf an Warmwasser, der sich nach der Wohnfläche richtet, nicht ändert. Es muss somit über alle Szenarien hinweg die gleiche Menge an Warmwasser bereitgestellt werden.
- Die Dimensionierung der Heizungssteig- und anbindeleitungen für und zu Fußbodenheizungen und Radiatoren bleibt über die Szenarien hinweg konstant. Lediglich die Verteilleitungen zwischen Wärmeerzeuger und Steigleitungen können je nach Wärmeerzeuger in der Länge variieren.
- Die Dimensionierungen der Rohrleitungslängen der Fußbodenheizung und die Materialmasse der Radiatoren bleiben über die Szenarien hinweg dieselben. Denn dadurch, dass sich die U-Werte und das Gebäudevolumen über die Szenarien nicht anpassen, ergibt sich auch keine Anpassung der Heizlast und somit auch keine Änderung bei der Dimensionierung der Fußbodenheizung und Radiatoren.

## LCA und LCC

Für die Berechnung der LCA und LCC muss zusätzlich die Lebensdauer der betrachteten TGA-Komponenten und die Gesamtlebensdauer des Gebäudes definiert werden. Für die Gesamtlebensdauer eines Gebäudes werden 50 Jahre angenommen; die Lebensdauer der betrachteten TGA-Komponenten ist in Tabelle 4.5 aufgeführt. Weitere TGA-Komponenten, die nicht spezifisch dimensioniert werden, werden in der Bilanzierung durch einen pauschalen Aufschlagsfaktor von 1,2 berücksichtigt.

**Tabelle 4.5.:** Lebensdauer der berücksichtigten TGA-Komponenten bei der Berechnung der LCA und LCC

Komponente	Lebensdauer [a]
Gas-Kessel	20
Solarthermie	20
Warmwasserspeicher	20
Heizungs- und Trinkwarmwasserleitungen	25
Rohrleitungsdämmung	20
Radiatoren/Fußbodenheizung	30

Für die Berechnung der LCC müssen zusätzlich spezifische Kosten pro Kilowattstunde [kWh] Endenergie sowie Kosten pro Tonne [t] Emissionen bzw. Global Warming Potential (GWP) definiert werden (siehe Tabelle 4.6 auf Seite 106).

**Tabelle 4.6.:** Kostenwerte der Endenergie und des GWP zur Berechnung der LCC (Quellen: [151][166][167])

Endenergie	Kosten
Gas	0,0577 €/kWh
Strom	0,19 €/kWh
Pellets/Hackschnitzel	0,0447 €/kWh
Emissionen (GWP)	25 €/t

Zur Berücksichtigung inflationärer und wirtschaftsbedingter Kostensteigerungen wird ein jährlicher Kalkulationszinssatz von 1,5 %, eine jährliche Preissteigerung von 5 % für Energie- und Emissionspreise und von 2 % für TGA-Komponenten und Baukosten festgelegt [168]. Zusätzlich dazu wird ein Ortsfaktor von 1,326 für München angesetzt [152]. Ein Faktor von 1,8 wird angenommen, um nicht im Detail mitberechnete TGA-Komponenten und weitere Kosten aufzunehmen.

#### 4.1.3. Berechnungsergebnisse auf Gebäudeebene

Dieses Kapitel unterteilt sich wiederum in die folgenden Unterpunkte.

1. Flächenberechnung baukonstruktiver Gebäudekomponenten
2. Heizlastberechnung
3. Energiebedarfsberechnung
4. Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten
5. Energetische und ökologische Lebenszyklusanalyse
6. Lebenszykluskostenanalyse

##### Flächenberechnung baukonstruktiver Gebäudekomponenten

Die Validierung der Flächenberechnung erfolgt mithilfe des am Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelten „FZK-Viewers“ [169]. Der FZK-Viewer ermöglicht sowohl die graphische Darstellung von 3D-Gebäude- und Stadtmodellen als auch die alphanumerische Darstellung spezifischer Gebäudeparameter. Hierbei berechnet der FZK-Viewer unter anderem die Flächen der unterschiedlichen Gebäudekomponenten und das Gebäudevolumen. Diese Flächen werden mit den durch urbi+ berechneten Flächen abgeglichen. In Bezug auf die Validierung der Flächenberechnungen der Gebäudekomponenten und des Gebäudevolumens ist zu beachten, dass sowohl das Tool *SharedWallSurface-Calculator* als auch das Tool *Voluminator* in urbi+ integriert sind und diese bereits validierte Berechnungsmodelle darstellen (siehe Kapitel 3.1.1). Deshalb wird hier auf eine erneute Validierung der verwendeten Tools verzichtet. Die Ergebnisse der *SharedWallSurface*- und *Voluminator*-Berechnungen werden jedoch der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

In Tabelle 4.7 sind die Ergebnisse der Flächenberechnung aus dem FZK-Viewer und aus urbi+ im Vergleich dargestellt (siehe rechte Spalte:  $\Delta$  [%]). Es ist zu erkennen, dass es nur zu geringen Abweichungen zwischen den Ergebnissen kommt. Das liegt primär daran, dass die Berechnung auf denselben 3D-Gebäudemodellen und den darin enthaltenen Polygonen beruht. Zudem ist der mathematische Ansatz zur Flächenberechnung von Polygonen gleich und die Unterschiede ergeben sich aufgrund von Rundungen. Die Berechnung der Gebäudetrennwände und des Volumens ergeben die „signifikantesten“ Abweichungen im Vergleich, wenn auch diese nur geringfügig ausfallen. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Flächenberechnungen durch urbi+ zu nachvollziehbaren und korrekten Ergebnissen führen.

**Tabelle 4.7.:** Ergebnisse der Flächen- und der Volumenberechnung, Vergleich von FZK-Viewer und urbi+

Gebäudekomponenten	FZK-Viewer	urbi+	$\Delta$ [%]
Wandfläche [m <sup>2</sup> ]	4.429	4.425	-0,1
Dachfläche [m <sup>2</sup> ]	866	882	+1,9
Bodenfläche [m <sup>2</sup> ]	856	860	+0,5
Gebäudetrennwände [m <sup>2</sup> ]	924	951	+2,9
Nutzfläche [m <sup>2</sup> ]	4.590	4.569	-0,5
Volumen [m <sup>3</sup> ]	14.715	14.452	-1,8

### Heizlastberechnung

Die Ergebnisse der Heizlastberechnung aus urbi+ werden mit den Ergebnissen der Heizlastberechnung der Simulationssoftware IDA-ICE verglichen. Dabei muss beachtet werden, dass in IDA-ICE (Version 4.8) die *ASHRAE Cooling and Heating Load Calculation*-Methode [170] und nicht wie in urbi+ die DIN EN 12831-1:2017-09 zur Berechnung der Heizlast verwendet wird. Trotz der zwei verschiedenen Ansätze unterscheidet sich die grundsätzliche physikalische Herangehensweise bei der Berechnung nur geringfügig voneinander. Das in urbi+ implementierte Verfahren der DIN EN 12831-1:2017-09 ist ein vereinfachter, statischer Ansatz zur Berechnung. Dieser wird wegen der besseren Anwendbarkeit in Bezug auf die gebäudespezifische Berechnung der Heizlast großer Gebäudebestände verwendet.

Somit ergeben sich aus der Anwendung der vorab beschriebenen Berechnungsparameter, bezogen auf das vorgestellte Fallbeispiel, die folgenden Ergebnisse und Abweichungen in den Ergebnissen (siehe Tabelle 4.8).

**Tabelle 4.8.:** Ergebnisse der Heizlastberechnungen, Vergleich von IDA-ICE und urbi+

Heizlast	IDA-ICE [kW]	urbi+ [kW]	$\Delta$ [%]
Heizlast unsanierter Zustand	297	304	+2,4
Heizlast sanierter Zustand	113	127	+12,4

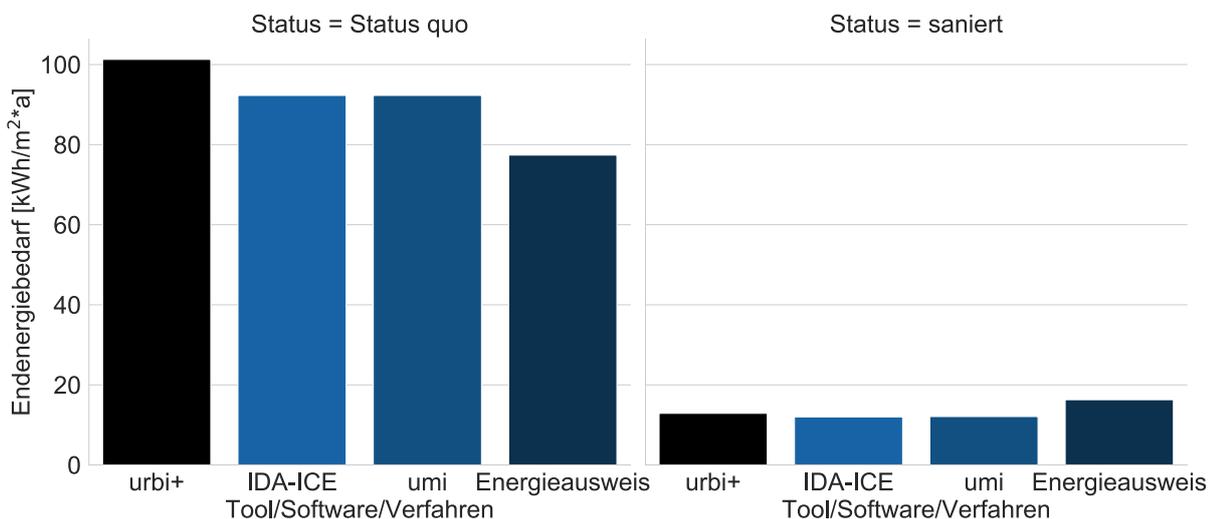
Die Ergebnisse unterscheiden sich durch eine Abweichung zwischen IDA-ICE und urbi+ von +2,4 % für den unsanierten bzw. +12,5 % für den sanierten Zustand. Dabei ergeben sich die Abweichungen hauptsächlich aus den Unterschieden bei den errechneten Lüftungswärmeverlusten. In IDA-ICE werden druckabhängige Luftwechselraten bei 50 Pascal ( $n_{50}$ ) verwendet. In der Formel 3.33 (siehe Kapitel 3.4.4) zur Ermittlung der Heizlast nach der DIN EN 12831-1:2017-09 werden generelle Luftwechselraten, die baujahrbezogene Bereiche für  $n_{50}$  repräsentieren, herangezogen. Dabei liegt die generelle Luftwechselrate in urbi+ für den unsanierten Zustand des Gebäudes näher an den für das Baujahr spezifisch zu definierenden Luftwechselraten in IDA-ICE. Die Ergebnisse aus urbi+ zeigen jedoch, bezugnehmend auf die Definition der Input-Variablen, korrekte Tendenzen auf und können für weitere Berechnungen verwendet werden.

### Energiebedarfsberechnung

Die Validierung der Heizenergiebedarfsberechnung erfolgt durch den Vergleich von Simulationsergebnissen aus drei verschiedenen Ansätzen, Tools und verschiedener Software:

- Die Simulationssoftware *IDA-ICE* (Version 4.8) [171], entwickelt zur Durchführung dynamisch-thermischer Gebäudesimulationen.
- Das *Urban Modeling Interface (umi)* in Version 2.6.13 (siehe Kapitel 3.1.1)
- Die Energiebedarfsausweise, berechnet und ausgestellt nach der deutschen Energieeinsparverordnung Energieeinsparverordnung (EnEV).

In allen drei Simulationen bzw. Berechnungen werden dieselben Input-Parameter und Gebäudemodelle verwendet und mit den Ergebnissen aus urbi+ abgeglichen (siehe Abbildung 4.2).



**Abbildung 4.2.:** Vergleich der Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung aus urbi+, IDA-ICE, umi und den Energieausweisen (eigene Abbildung)

Die Energiebedarfsberechnungen der Energieausweise beruhen auf dem Monatsbilanzverfahren der DIN V 4108-6:2003-06. Von dem in urbi+ integrierten Heizperiodenverfahren unterscheidet sich das Monatsbilanzverfahren durch die Errechnung monatlicher Energiebedarfsbilanzen, während im Heizperiodenverfahren nur eine Bilanz für die gesamte Heizperiode erstellt wird. Die Software IDA-ICE und umi nutzen wiederum dynamische Berechnungsverfahren zur Energiebedarfsberechnung, die z. B. das Nutzerverhalten bzw. die Anwesenheitszeiten der Nutzenden in Gebäuden und Räumen sowie detaillierte Klimamodelle mit Jahresverläufen in Stundenwerten berücksichtigt. In der Abbildung 4.2 und der Tabelle 4.9 sind die Berechnungsergebnisse aller vier Ansätze aufgeführt. Die Ergebnisse beziehen sich dabei auf den Endenergiebedarf der Raumheizung.

**Tabelle 4.9.:** Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung, Vergleich von IDA-ICE, umi, Energieausweis und urbi+

IDA-ICE [kWh/m <sup>2</sup> *a]		umi [kWh/m <sup>2</sup> *a]		Energieausweis [kWh/m <sup>2</sup> *a]		urbi+ [kWh/m <sup>2</sup> *a]	
unsaniert	saniert	unsaniert	saniert	unsaniert	saniert	unsaniert	saniert
92,3	12,0	92,3	12,1	77,4	16,3	101,3	12,9

Hieraus ist zu erkennen, dass die Simulationsergebnisse aus IDA-ICE und umi um 8,9 % niedriger sind als das Ergebnis aus urbi+. Der Wert aus urbi+ ist um 19,3 % höher als der Wert des Energieausweises. Im Vergleich mit den Ergebnissen des nicht sanierten Zustands des Gebäudes ist zu sehen, dass der Energieausweis den höchsten Energiebedarf ausweist. Der Wert von IDA-ICE ist dabei um 26 % geringer. Das Ergebnis von umi ist fast identisch mit dem aus IDA-ICE. 7,5 % mehr Endenergiebedarf errechnet urbi+ im Vergleich zu IDA-ICE und umi. Das sind 21 % weniger als im Energieausweis angegeben sind.

Bei der betrachteten Sanierung werden folgende Reduktionen im Energiebedarf durch die Tools berechnet:

- urbi+: -87,3 %
- IDA-ICE: -87,0 %
- umi: -86,9 %
- Energieausweis: -78,9 %

Dabei ist die Differenz zwischen dem Ergebnis aus urbi+ und dem Energieausweis diskussionswürdig, insbesondere deshalb, weil beide Berechnungen auf derselben Norm beruhen. Der Unterschied resultiert aus der Tatsache, dass zwei unterschiedliche Berechnungsansätze innerhalb der Norm gewählt wurden.

Das Heizperiodenverfahren ist ein wesentlich vereinfachter und konservativerer Rechenansatz. Deshalb ist das Ergebnis des Energieausweises um rund 24 % niedriger als das aus urbi+. Im Falle der Sanierung und der sich dadurch ändernden Berechnungsparameter ergeben sich weitreichendere

Auswirkungen auf das Ergebnis des Heizperiodenverfahrens als auf das Ergebnis des Monatsbilanzverfahrens. Ein Grund dafür ist die geringere Komplexität der Berechnungsschritte im Rahmen des Heizperiodenverfahrens. Das Monatsbilanzverfahren weist mehr Abhängigkeiten innerhalb der Energiebedarfsberechnung auf. Ein detailliertes Ermitteln der Unterschiede in der Berechnung ist nur bedingt möglich, da IDA-ICE und umi geringfügig bis gar keinen Einblick in die dahinterliegenden Berechnungs- und Simulationsschritte erlauben.

Grundsätzlich lässt sich somit festhalten, dass urbi+ aussagekräftige und zuverlässige Ergebnisse bei der Heizenergiebedarfsberechnung liefert und Veränderungen im Zuge von Sanierungen korrekt abbildet. Die Methode zur Energiebedarfsberechnung sowie deren Validierung wurden im Rahmen eines Konferenzbeitrags bei der BauSim2020 veröffentlicht [172].

Der für die LCA wichtige Indikator des Primärenergiebedarfs errechnet sich weiterführend durch die Multiplikation des Endenergiebedarfs mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor. Dieser Schritt würde zwar zu einer Veränderung der absoluten Ergebnisse, jedoch zu keiner relativen Veränderung der Ergebnisse zueinander führen. Deshalb wird die Umrechnung zum Primärenergiebedarf hier nicht im Detail aufgezeigt.

### **Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten**

Die Berechnung und Validierung der Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten sowie der LCA erfolgt anhand der Fallbeispiele 2 und 3 sowie der Ergebnisse der Dissertation von Weißenberger [19]. Weißenberger hat sich im Rahmen seiner Dissertation detailliert mit der Auswahl, Dimensionierung und Auslegung sowie der lebenszyklusbasierten Analyse der TGA von zwei Wohngebäuden beschäftigt. Die Ergebnisse von Weißenberger stellen eine wissenschaftlich fundierte Möglichkeit dar, um den methodischen Ansatz zur Dimensionierung der TGA-Komponenten und der LCA in urbi+ zu validieren.

Weiterführend werden die von Weißenberger dimensionierten TGA-Komponenten mit den errechneten Dimensionierungen der TGA-Komponenten aus urbi+ für alle aufgeführten Szenarien verglichen. Außerdem wird dargestellt, woraus sich die auftretenden Abweichungen aus Sicht der Methode in urbi+ ergeben.

Der Vergleich der **Dimensionierungen der Gas-Brennwertkessel** in Tabelle 4.10 zeigt sowohl für das EFH als auch für das MFH eine geringere Dimensionierung bei den Ergebnissen aus urbi+. Das lässt sich damit begründen, dass sich die Ergebnisse von Weißenberger auf die auf dem Markt zu erwerbenden Kesselgrößen beziehen. Dabei gibt Weißenberger immer den höchsten Leistungswert im Leistungsbereich eines Wärmeerzeugers an. Liegt der geringste Leistungsbereich von Wärmeerzeugern z. B. bei 5 - 8,5 kW und wird ein Wärmeerzeuger mit einer maximalen Leistung von 3 kW benötigt, wird der Wärmeerzeuger mit dem geringsten Leistungsbereich eingebaut. Weißenberger gibt in solch einem Fall immer den höchsten Leistungswert im Leistungsbereich an, also 8,5 kW. Die Ergebnisse aus urbi+ beziehen sich hingegen auf die Heizlast, multipliziert mit der Wärmeerzeugeraufwandszahl, also dem Wirkungsgrad des Kessels. Diese Art der Auslegung in urbi+ wurde gewählt, da eine marktspezifische Dimensionierung in Bezug auf große Gebäudebestände wenig sinnvoll ist. Die Angebote auf dem Markt können sich zwischen Regionen und Ländern unterscheiden und eine marktspezifische Dimensionierung würde die Übertragbarkeit der Methode einschränken. Zudem ändern sich die auf den spezifischen Märkten angebotenen Wärmeerzeuger über die Zeit hinweg. Eine ständige Anpassung dieser Änderungen im Rahmen der entwickelten Methode wird als nicht praktikabel angesehen.

**Tabelle 4.10.:** Dimensionierung der TGA-Komponenten, Vergleich von Weißenberger und urbi+ (Szenario Gas-Brennwert)

TGA-Komponente	Weißenberger		urbi+		$\Delta$ [%]	
	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
Gas-Brennwert [kW]	14	25	8	16	-43	-36
Warmwasserspeicher [Liter]	300	750	342	545	+14	+27
Solarthermie [Module]	2	5	2	5	0	0
Heizungsleitungen FBH [m]	47	72	52	77	+11	+7
Heizungsleitungen Radiatoren [m]	160	344	140	306	-13	-11
Trinkwarmwasserleitungen [m]	161	221	54	149	-66	-33
Rohrleitungsdämmung FBH [kg]	51	101	56	122	+10	+21
Rohrleitungsdämmung Radiatoren [kg]	50	120	24	55	-52	-54
Materialmasse Rohre FBH [kg]	150	346	262	739	+75	+114
Materialmasse Radiatoren [kg]	302	865	296	646	-2	-25

Beim Vergleich der **Dimensionierungen der Warmwasserspeicher** ergibt sich eine Abweichung von 14 % und 27 %. Das liegt daran, dass in urbi+ ein pauschaler Nutzenergiebedarf für TWW von  $12,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$  angenommen wird (siehe DIN V 4701-10:2003-08 [114], Kapitel 3.4.2). Dieser Wert fließt nach dem „worst-case“-Grundsatz, unabhängig von der Anzahl der Personen eines Haushalts und der Warmwasser-Zapfstellen, in die Dimensionierung des TWW-Speichervolumens mit ein (siehe Kapitel 3.5.9, Formel 3.54). Dieser Ansatz wird in urbi+ gewählt, da aus dem 3D-Stadtmodell keine gebäudespezifischen Informationen zu Warmwasser-Zapfstellen enthalten sind. Die Dimensionierung bei Weißenberger richtet sich nach spezifischen Anforderungen, die bei der Auslegung des Speichers im Detail berücksichtigt wurden, im 3D-Gebäudemodell jedoch nicht vorliegen.

Bei der **Dimensionierung der Solarthermieanlage** ergibt sich kein Unterschied zwischen den Ergebnissen. Die Auslegung der Solarthermieanlage bei Weißenberger orientiert sich jedoch nicht, wie bei urbi+, am prozentualen Deckungsgrad der Trinkwarmwasser-Heizlast. Weißenberger unterscheidet bei der Dimensionierung der Solarthermieanlagen zwischen einer flächenbezogenen Auslegung nach EnEV (siehe Formel 4.1) und einer auf Verbrauchswerten basierenden Erfahrungswertmethode. Danach wird eine „Solaranlage klein“ und „Solaranlage groß“ definiert. Bei der auf Verbrauchswerten basierenden Erfahrungswertmethode ergibt sich für die kleine Solaranlage eine Kollektorfläche von 4,72 m<sup>2</sup> (EFH) und von 11,8 m<sup>2</sup> (MFH). Für die große Solaranlage wird eine Kollektorfläche von 7,08 m<sup>2</sup> (EFH) und von 16,5 m<sup>2</sup> (MFH) definiert. Die Modulgröße liegt bei diesen Betrachtungen jeweils bei 2,36 m<sup>2</sup>. Für den Vergleich der Dimensionierungen für das Szenario *Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage* (ES1) wird die „Solaranlage klein“ herangezogen. Der mit 50 % definierte Deckungsgrad des Warmwasserbedarfs in urbi+ entspricht dem im EEWärmeG geforderten Deckungsanteil Erneuerbarer Energien am Endenergiebedarf an Wärme von 15 % [173]. Wird die aus urbi+ resultierende Fläche auf die von Weißenberger verwendete Kollektorfläche von 2,36 m<sup>2</sup> bezogen, dann ergibt sich die Kollektoranzahl von 1,69 (EFH) und 4,24 (MFH). Da es technisch nicht möglich ist, Module anteilig zu verbauen, ergeben die aufgerundeten Werte eine Kollektoranzahl von 2 und 5. Diese Werte entsprechen der Dimensionierung von Weißenberger.

$$A_{\text{Solar}} = 0,09 * A_{\text{N}}^{0,8} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Solar}} &= \text{Fläche Solarthermie [m}^2\text{]} \\ A_{\text{N}} &= \text{Nutz- bzw. Wohnfläche [m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Aus der Betrachtung der **Dimensionierung der Heizungsleitungen in Kombination mit einer Fußbodenheizung (FBH)** als Wärmeübergabesystem geht hervor, dass die in urbi+ errechneten Leitungslängen um 11 % (EFH) bzw. 7 % (MFH) länger sind. Das ergibt sich aus der Formel 3.45 zur Berechnung der Länge der horizontalen Verteilleitungen (siehe DIN 18599-5:2018-9 Tabelle 26 in Kapitel 3.5.7). In der Formel wird für den *fixen Berechnungsparameter*  $c_1$  ein Wert von 30 angesetzt. Dieser wird pauschal zur Leitungslänge addiert, die sich aus dem weiteren Teil der Formel ergibt und die Netto-Grundfläche sowie die Anzahl der versorgten Geschosse miteinbezieht. Wird davon ausgegangen, dass der Wert 30 die Einheit Meter [m] hat, dann macht dieser Wert für das EFH bereits einen Anteil von 64 % an den von Weißenberger errechneten Leitungslängen aus. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen von Weißenberger und urbi+ lässt sich maßgeblich auf diesen Parameter zurückführen.

Bei der Betrachtung der **Dimensionierung der Heizungsleitungen und der Kombination mit Radiatoren** als Wärmeübergabesystem ist das prozentuale Ergebnis umgekehrt. In diesem Fall sind die von urbi+ angegebenen Leitungslängen um 13 % bzw. 11 % geringer. Dies liegt hauptsächlich am Miteinbeziehen des *Etagenverteiltertyps Heizkörper (IIa)* (siehe Abbildung 3.5 auf Seite 60, Kapitel 3.5.7). Denn die Leitungslängen der Verteil- und Anbindeleitungen liegen z. B. beim

EFH bei diesem System mit ca. 71 % und 49 % bzw. 55 % und 79 % beim MFH unter denen des *Etagenringtyps (I)* und *Steigstrangstyps (III)*. Würde der *Etagenverteiltertyp Heizkörper (IIa)* nicht mit in die Bilanzierung aufgenommen, dann wäre sogar die in urbi+ dimensionierte Gesamtlänge für die Heizungsleitungen um 10 % höher als bei Weißenberger. Es wird somit davon ausgegangen, dass Weißenberger keinen *Etagenverteiltertyp Heizkörper (IIa)* für die Dimensionierung angenommen hat. Da aus den 3D-Stadtmodellen grundsätzlich nicht hervorgeht, welche Rohrleitungssysteme in Gebäuden verbaut sind, wird dennoch für alle Berechnungen der Mittelwert der Längen der drei Rohrleitungssysteme, die in Kombination mit Radiatoren theoretisch Verwendung finden können, betrachtet.

Die **Dimensionierung der Trinkwarmwasserleitungen** ergibt eine größere Diskrepanz zwischen Weißenberger und urbi+. Dabei liegen die von urbi+ errechneten Leitungslängen 66 % (EFH) und 33 % (MFH) unter den Ergebnissen von Weißenberger. Die in urbi+ zur Berechnung herangezogene Norm DIN V 18599-8:2018-09 verwendet ähnliche, zum Teil auch die gleichen Formeln wie die DIN 18599-5:2018-9 zur Berechnung der Heizungsleitungslängen (siehe Kapitel 3.5.7). Bei der Errechnung der Verteilleitungslängen zeigt sich jedoch ein entscheidender Unterschied, denn an dieser Stelle wird die Netto-Grundfläche durch die Anzahl der zu versorgenden Geschosse geteilt; jedoch ohne einen pauschalen Wert von 30 m an zusätzlichen Leistungslängen mit hinzuzurechnen (vgl. Formel 3.45 und Formel 3.47). Für das EFH weisen bei Weißenberger die Länge der Heizungsleitungen in Kombination mit Radiatoren und die Trinkwarmwasserleitungen fast genau die gleiche Länge auf. Beim MFH sind die Heizungsleitungslängen aber 36 % länger. Das kann so interpretiert werden, dass bei Weißenberger mindestens die gleiche Anzahl an Radiatoren wie Trinkwarmwasserzapfstellen versorgt werden, um auf die gleiche und höhere Leitungslänge zu kommen. Die Norm berücksichtigt hierbei deutlich weniger Anschlussstationen, weshalb die Dimensionierung durch urbi+ geringer ausfällt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit in Bezug auf 3D-Stadtmodelle muss der in urbi+ gewählte generische Ansatz zur Dimensionierung gewählt werden.

Die vier maßgeblichen Parameter für die Bestimmung der **Materialmasse der Rohrleitungsdämmung** sind: die Länge der Rohrleitungen, der Rohrdurchmesser, die Dämmstärke und die Rohdichte des Dämmmaterials. Aus der Summe der Leitungslängen für **Heizung in Kombination mit Radiatoren** und TWW ergibt sich für das EFH eine um 52 % und für das MFH eine um 54 % geringere Dimensionierung durch urbi+ (siehe Kapitel 3.5.7). Die Leitungslängen der Trinkwarmwasser- und Heizungsleitungen unterscheiden sich um 79 % (EFH) und um 44 % (MFH), wobei der Unterschied der Trinkwarmwasserleitungslängen den größten Einfluss auf den Unterschied der Materialmassen für die Rohrleitungsdämmung hat. Der mittlere innere Rohrdurchmesser für die Heizungsleitungen ist bei urbi+ um rund 13 % (EFH und MFH) und bei den Warmwasserleitungen um rund 10 % (EFH und MFH) geringer. Für die Dämmstärke nimmt Weißenberger für alle Trinkwarmwasser- und Heizungsleitungen einen Wert von 100 % des Rohrrinnendurchmesser an. Aus urbi+ ergeben sich Dämmstärken von 115 % für Heizungsleitungen und 125 % für Trinkwarmwasserleitungen. Die Rohdichte des Dämmmaterials wird bei Weißenberger jedoch um 75 % höher als bei urbi+ angenommen. Hierbei muss angemerkt werden, dass Weißenberger einen Anteil an Aluminium von 4 % für Ummantelung und Anbringung etc. bei der Dämmung berücksichtigt. Der Wert für die Rohdichte aus urbi+ basiert dabei auf dem aus den in Kapitel 3.5.7 beschriebenen Ökobaudat-Datensätzen

und bezieht sich rein auf das Dämmmaterial. In urbi+ wird mit einer durchschnittlichen Dichte des Dämmmaterials der Rohrleitungen von  $\rho_{\text{Rohrleitung, Dämmung}} = 42,05 \text{ kg/m}^3$  gerechnet, die sich aus den Ökobaudat-Datensätzen ergibt. In Summe führt das zu den in Tabelle 4.10 aufgeführten um 52 % (EFH) und um 54 % (MFH) geringeren Werten in urbi+. Es ist festzuhalten, dass die Ergebnisse durch ihre Abweichungen voneinander nicht an Wertigkeit verlieren, sondern dass die Ergebnisse unter Berücksichtigung der jeweils getroffenen Annahmen korrekte Werte aufweisen.

Die Materialmasse der Rohrleitungsdämmung, bezogen auf die Summe der Leitungslängen für **Heizung in Kombination mit Fußbodenheizung** und TWW, ergibt eine größere Dimensionierung von 12 % für das EFH und von 21 % für das MFH durch urbi+ (siehe Kapitel 3.5.7). Auch hier sind wieder dieselben vier Parameter wie bei der vorangegangenen Betrachtung der Materialmasse der Rohrleitungsdämmungen in Bezug auf das Wärmeübergabesystem mit Radiatoren anzuführen. Dabei unterscheiden sich die Leitungslängen der Trinkwarmwasser- und Heizungsleitungen in Summe um 77 % (EFH) und 40 % (MFH), wobei der Unterschied der Trinkwarmwasserleitungslängen wiederum den größten Einfluss auf den Unterschied der Materialmassen für die Rohrleitungsdämmung ausmacht. Die Dämmstärke und die Rohdichte des Dämmmaterials bleiben bei dieser Betrachtung gleich wie bei den Leitungslängen für Heizung in Kombination mit Radiatoren. Der mittlere innere Rohrdurchmesser für die Heizungsleitungen ist in Kombination mit der Fußbodenheizung bei Weißenberger um rund 56 % (EFH und MFH) und bei den Warmwasserleitungen um rund 22 % (EFH und MFH) höher.

Bei der **Materialmasse der Fußbodenheizungen** lässt sich ein Unterschied zwischen Weißenberger und urbi+ von 75 % (EFH) und 114 % (MFH) feststellen, obwohl in beiden Fällen sowohl ein Verlegeabstand von 0,20 m, Anschlussverschraubungen als auch Befestigungssysteme berücksichtigt werden. In urbi+ wird jedoch noch zusätzlich, basierend auf den Angaben des Ökobaudat-Datensatzes „Fußbodenheizung PP (200 mm Abstand)“, eine 30 mm dicke Dämmplatte aus expandiertem Polystyrol einberechnet, auf der die Rohrleitungen befestigt sind. Der Ökobaudat-Datensatz stellt einen Durchschnittsdatensatz dar, der die länderspezifische Situation in Deutschland abbilden soll. Daraus resultiert ein Flächengewicht für die Fußbodenheizung von  $1,40 \text{ kg/m}^2$ . Die Quadratmeter beziehen sich dabei auf die Wohnfläche. Aus den Werten von Weißenberger ergibt sich ein Flächengewicht von  $0,80 \text{ kg/m}^2$  (EFH) bzw.  $0,65 \text{ kg/m}^2$  (MFH). Rechnet man zu den Werten von Weißenberger noch eine 30 mm dicke Dämmplatte aus expandiertem Polystyrol mit einer Dichte von rund  $20 \text{ kg/m}^3$  [174] mit ein, dann ergeben sich daraus Flächengewichte von  $1,40 \text{ kg/m}^2$  (EFH) und  $1,25 \text{ kg/m}^2$  (MFH). Da sich die Berechnungen in dieser Dissertation rein auf die TGA beziehen, wird für die Berechnung der LCA in urbi+ die 30 mm dicke Dämmplatte aus den LCA-Datensätzen herausgenommen.

Die Ergebnisse für die **Materialmasse der Radiatoren** unterscheiden sich zwischen Weißenberger und urbi+ um 1 % (EFH) bzw. 25 % (MFH). Die Unterschiede ergeben sich aus der unterschiedlichen Dimensionierung der benötigten Wärmeübergabeleistung der Radiatoren und deren leistungsbezogener Materialmasse in Kilogramm pro Kilowatt Leistung [kg/kW]. Die Wärmeübergabeleistung wird in urbi+ um 54 % (EFH) und 14 % (MFH) höher berechnet. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass im vereinfachten Verfahren nach der DIN EN 12831:2003-08, dass in urbi+ Anwendung findet,

keine solaren und internen Wärmegewinne zur Berechnung der Wärmeleistung mitberücksichtigt werden. Hinzu kommt, dass die leistungsbezogenen Materialmassen bei Weißenberger um 53 % höher liegen als in urbi+. Das ist damit zu erklären, dass in urbi+ Durchschnittsdatsätze aus dem Ökobaudat-Datensatz für die Berechnung der Materialmassen verwendet werden, die, wie im Falle der Fußbodenheizung, die länderspezifische Situation in Deutschland abbilden. Bei Weißenberger wurde ein spezifischer Plattenheizkörper gewählt, der ein deutlich größeres Gewicht aufweist. Im Mittel ergibt sich dadurch für das EFH eine nur geringe und für das MFH eine moderate, jedoch nachvollziehbare Abweichung der Ergebnisse.

Bei der Betrachtung der weiteren Wärmeerzeugervarianten/Szenarien auf Gebäudeebene (siehe Kapitel 4.1.2) werden der Warmwasserspeicher, die Heizungs- und Trinkwarmwasserleitungen (inklusive Rohrleitungsämmung), die Rohrleitungslängen der FBH und die Materialmassen der Radiatoren nicht nochmals aufgeführt und im Detail betrachtet. Hierzu ergeben sich durch die Wahl unterschiedlicher Wärmeerzeuger keine Veränderungen in der Berechnung und folglich auch keine Veränderungen in den Ergebnisse aus urbi+. Die Dimensionierungen dieser Komponenten beziehen sich entweder auf sich nicht verändernde geometrische (z. B. Gebäudehöhe, Wohnfläche etc.) oder energetische (z. B. Heizlast, Trinkwarmwasserbedarf etc.) Gebäudeparameter. Es wird folglich die Dimensionierung des Wärmeerzeugers sowie der Solarthermieanlage separat betrachtet. Bei den Wärmepumpen fällt die Dimensionierung gleich aus, da keine Differenzierung der Wärmeerzeugeraufwandszahlen zwischen Luft-Wasser und Sole-Wasser-Wärmepumpen angenommen wird. Bei den Szenarien mit Sole-Wasser-Wärmepumpen werden jeweils die Dimensionierungen der Erdkollektoren und der Erdsonden mitbetrachtet.

Bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe (ES2) kommt es durch urbi+ zu einer um 33 % (EFH) und 32 % (MFH) geringeren Dimensionierung. Das hat hauptsächlich zwei Gründe: Erstens wird bei Weißenberger immer die maximale Leistung der Mindestliefergröße der Wärmepumpe angegeben. Zweitens wird in urbi+ die gebäudebezogene Heizlast mit der Wärmeerzeugeraufwandszahl multipliziert, die für Wärmepumpen laut der DIN V 4701-10:2003-08 bei 0,26 bzw. 0,29 liegt (siehe Tabelle A.25).

**Tabelle 4.11.:** Dimensionierung der Wärmeerzeuger für das Szenario Luft-Wasser-Wärmepumpe, Vergleich von Weißenberger und urbi+

TGA-Komponente	Weißenberger		urbi+		$\Delta$ [%]	
	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
Luft-Wasser-Wärmepumpe [kW]	9	22	6	15	-33	-32
Solarthermie [Anzahl Module]	7	16	7	16	0	0

Wird in urbi+ mit einem Deckungsanteil der Solarthermieanlage von 80 % an der Trinkwarmwasser-Heizlast kalkuliert, dann ergibt sich zwischen der „Solaranlage groß“ von Weißenberger und urbi+ bei der Modulanzahl kein Unterschied. Wird wie beim Szenario des Gas-Kessels die von Weißenberger verwendete Kollektorfläche von 2,36 m<sup>2</sup> angenommen, dann wird erneut die gleiche Kollektoranzahl von 3 Stück (EFH) und 7 Stück (MFH) bei Weißenberger und urbi+ benötigt.

Bei der Dimensionierung der Sole-Wasser-Wärmepumpe (ES3) entsteht die gleiche Abweichung wie bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe (vgl. Tabelle 4.11 und 4.12). Bei der Länge der Erdkollektoren ergeben sich die Unterschiede von 41 % (EFH) und 36 % (MFH) aus den verschiedenen dimensionierten Wärmepumpen und der spezifisch angenommenen Entzugsleistung der Erdkollektorrohre, gemessen in Meter pro Watt [W/m] Wärmepumpenleistung. Weißenberger nimmt dabei einen Wert von rund 75 W/m und urbi+ einen Wert von 50 W/m an. Die 50 W/m in urbi+ lassen sich dabei aus dem Ökobaudat-Datensatz „Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor)“ ermitteln [59].

**Tabelle 4.12.:** Dimensionierung der TGA-Komponenten für das Szenario Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektoren, Vergleich von Weißenberger und urbi+

TGA-Komponente	Weißenberger		urbi+		Δ [%]	
	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
Sole-Wasser WP [kW]	9	22	6	15	-33	-32
Länge Erdkollektoren [m]	14	25	8	16	-41	-36
Solarthermie [Anzahl Module]	3	7	4	9	+33	+29

Wird die Solarthermieanlage in beiden Fällen mit einem Deckungsanteil von 100 % an der Trinkwarmwasser-Heizlast definiert, ergibt sich ein Unterschied von 33 % (EFH) und 29 % (MFH). Hierbei wird ebenfalls die von Weißenberger verwendete Kollektorfläche von 2,36 m<sup>2</sup> angenommen.

Bei der Sole-Wasser-Wärmepumpen-Variante in Kombination mit Erdsonden (ES4) gilt für die Dimensionierung der Wärmepumpe die gleiche Erklärung wie für die Luft-Wasser und Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektoren (vgl. Tabelle 4.11, 4.12 und 4.13). Bei der Materialmasse der Erdsonden entsteht ein Unterschied zwischen Weißenberger und urbi+ von 43 % (EFH) und 36 % (MFH). Neben den verschiedenen dimensionierten Wärmepumpen ergibt sich der Unterschied aus dem durchschnittlichen Gewicht pro Kilowatt Entzugsleistung der Wärmepumpe, bezogen auf die Erdsondenrohre. Weißenberger nimmt dabei einen Wert von 33,5 kg/kW und urbi+ einen Wert von 24,3 kg/kW an. Der in urbi+ hinterlegte Wert wurde hierfür als Mittelwert aus den in den Ökobaudat-Datensätzen „Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde)“ angegebenen Massendefinitionen entnommen [59].

**Tabelle 4.13.:** Dimensionierung der TGA-Komponenten für das Szenario Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden, Vergleich von Weißenberger und urbi+

TGA-Komponente	Weißenberger		urbi+		Δ [%]	
	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
Sole-Wasser-Wärmepumpe [kW]	9	22	6	15	-33	-32
Materialmasse Erdsonden [kg]	14	25	8	16	-43	-36
Solarthermie [m <sup>2</sup> ]	7	17	8	20	+14	+18

Bei der Dimensionierung des Biomassekessels (ES5) ergeben sich Abweichungen von 17 % (EFH) und 16 % (MFH). Auch hier lässt sich der Unterschied zwischen Weißenberger und urbi+ anhand der verschiedenen gewählten Kesselgrößen auf dem Markt erklären. Zudem fließt bei der Dimensionierung

der Heizkessels in urbi+ deren Wirkungsgrad mit in die Berechnung ein. Dadurch, dass die Solarthermieanlage sowohl bei der Biomassekessel- als auch bei der Gas-Kessel-Wärmeversorgungsvariante den gleichen TWW-Deckungsanteil einnimmt, ergeben sich für beide Varianten die gleichen prozentualen Veränderungen zwischen EFH und MFH. Dabei ist die Solarthermieanlage bei beiden Energieversorgungsvarianten beim EFH um 60 % kleiner als beim MFH.

**Tabelle 4.14.:** Dimensionierung der TGA-Komponenten für das Szenario Biomasse-Pelletkessel, Vergleich von Weißenberger und urbi+

TGA-Komponente	Weißenberger		urbi+		$\Delta$ [%]	
	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
Biomassekessel [kW]	12	25	10	21	-17	-16
Solarthermie [Anzahl Module]	5	12	4	10	-20	-17

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen und Parameterdefinitionen von Berechnungsschritten zwischen Weißenberger und urbi+ kann festgehalten werden, dass sich ergebende Abweichungen logisch und nachvollziehbar erklären lassen. Weißenberger zielt auf eine marktnahe Dimensionierung von TGA-Komponenten ab. Das Ziel der hier erarbeiteten Methode ist deren Anwendbarkeit auf große Gebäudebestände auf Basis weniger gebäudespezifischer Input-Parameter für die Berechnungen. Die Ergebnisse aus urbi+ stellen somit in Anbetracht des definierten Ziels und der definierten Input-Parameter korrekte und vor allem nachvollziehbare Ergebnisse dar.

### Energetische und ökologische Lebenszyklusanalyse

Aufbauend auf den Dimensionierungen der betrachteten TGA-Komponenten kann weiterführend die LCA in Bezug auf die betrachteten TGA-Komponenten berechnet werden. Die Berechnungen und Analysen zur Validierung der Methode basieren dabei auf dem Szenario EFH (Fallbeispiel 2) *Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage und FBH* (ES1) und auf den Werten aus Tabelle 4.10. Die für die Berechnung der LCA benötigten Dimensionierungen mit den Umrechnungen in die korrekte Einheit sowie die Austauschzyklen der TGA-Komponenten über den Lebenszyklus des Gebäudes sind in Tabelle 4.15 (siehe Seite 118) aufgeführt. Die Austauschzyklen der TGA-Komponenten richten sich in diesem Beispiel nach den in der Ökobaudat definierten Lebensdauern (siehe Tabelle 4.5). Hieraus ergibt sich somit aus der Ökobaudat bspw. für die Fußbodenheizung ein Austauschzyklus über den gesamten Lebenszyklus (50 Jahre) der Gebäude (EFH und MFH). Soll in zukünftigen Berechnungen kein Austauschzyklus für z. B. die Fußbodenheizung berechnet werden, kann das über die manuelle Eingabe der Lebensdauer der Fußbodenheizung über die Graphische Benutzeroberfläche (GUI) von urbi+ beeinflusst werden. Zudem muss im Sanierungsfall beim Einsatz von Fußbodenheizungen darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Raumhöhe nach Einbau vorhanden ist.

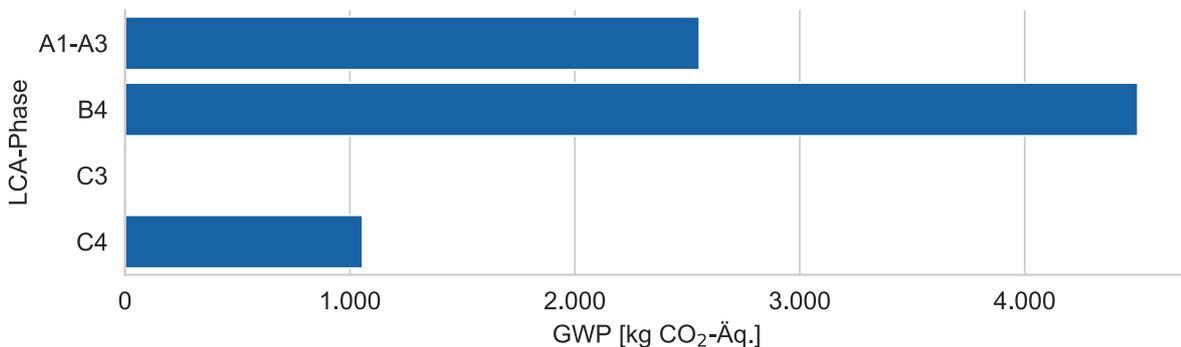
Das Szenario *Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage und FBH* wurde wegen seiner Vergleichbarkeit mit den Werten aus der Dissertation von Weißenberger gewählt.

**Tabelle 4.15.:** Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das EFH für das Szenario Gas-Brennwertkessel durch urbi+

TGA-Komponente	Dimensionierung	Austauschzyklen
Gas-Kessel [kW]	8,0	2
Solarthermie [m <sup>2</sup> ]	4,0	2
Warmwasserspeicher [kg]	68	2
Heizungsleitungen [kg]	52	1
Trinkwarmwasserleitungen [kg]	40	1
Rohrleitungsdämmung [m <sup>3</sup> ]	1,3	2
Fußbodenheizung [kg]	262	1

Durch die Berechnungen in urbi+ ergeben sich die in Abbildung 4.3 aufgeführten lebenszyklusbasierten Grauen GWP-Werte über 50 Jahre Lebensdauer des Gebäudes, inklusive des Faktors von 1,2, der zur Berücksichtigung weiterer LCA-Komponenten hinzugerechnet wird.

- Herstellung (A1-A3): 31 %
- Austausch und Ersatz (B4): 56 % (Austauschzyklen siehe Tabelle 4.15)
- Entsorgung (C3 und C4): 13 %

**Abbildung 4.3.:** Graues GWP verteilt über 50 Jahre, aufgeteilt auf die LCA-Phasen (eigene Abbildung)

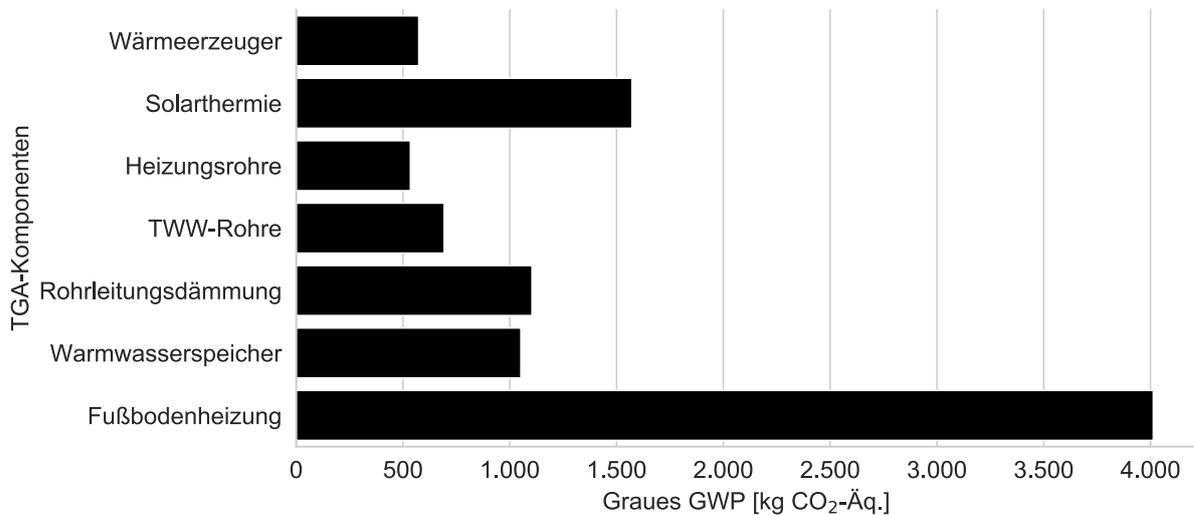
Insgesamt ergeben sich daraus die folgenden Werte für das lebenszyklusbasierte GWP:

- absolut: 9.543 kg CO<sub>2</sub>-Äq.
- spezifisch: 62 kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup> und 1,24 kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a

Weißberger kommt im Vergleich dazu auf einen spezifischen Wert von rund 1,19 kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>\*a ( $\Delta$  -4 % zu urbi+). Trotz Abweichungen bei der Dimensionierung einzelner TGA-Komponenten liegen die Ergebniswerte nah beieinander.

Die Verteilungen beim Grauen Primärenergiebedarf aus nicht-erneuerbaren Energiequellen (PENRT) und dem Grauen Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energiequellen (PERT) ergeben die gleichen Tendenzen wie bei der Verteilung über die LCA-Phasen und werden deshalb nicht nochmals in Form von Abbildungen einzeln aufgeführt. Für die Summe der Grauen Primärenergie (Graue Summe Primärenergiebedarf (PET)) ergibt sich folgende Verteilung:

- Herstellung (A1-A3): 44 %
- Austausch und Ersatz (B4): 56 % (Austauschzyklen siehe Tabelle 4.15 auf Seite 118)
- Entsorgung (C3 und C4): 0 %



**Abbildung 4.4.:** Graues GWP über 50 Jahre je TGA-Komponente (eigene Abbildung)

Bei der PET ergeben sich folgende lebenszyklusbasierten Ergebnisse:

- absolut: 41.029 kWh
- spezifisch: 266 kWh/m<sup>2</sup> und 5,30 kWh/m<sup>2</sup>\*a

Bei Weißenberger ergibt sich ein spezifischer Wert von rund 5,8 kWh/m<sup>2</sup>\*a ( $\Delta$  -9 % zu urbi+).

Das lebenszyklusbasierte Graue GWP resultiert dabei aus den in Abbildung 4.4 aufgeführten TGA-Komponenten. Die folgenden drei Komponenten nehmen dabei den größten Anteil ein:

- Fußbodenheizung: 43 %
- Solarthermieanlage: 16 %
- Rohrleitungsdämmungen: 12 %

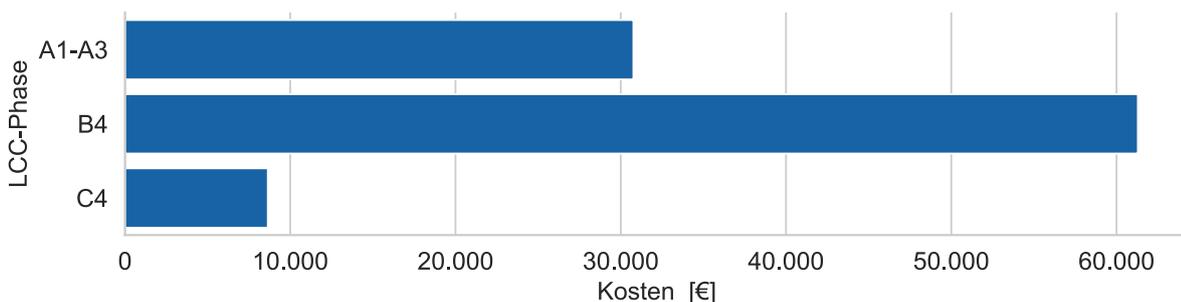
Auch hier werden die Ergebnisse exemplarisch für das GWP aufgezeigt, denn bei dem PENRT ist es ebenfalls die Fußbodenheizung (43 %), die am stärksten ins Gewicht fällt, gefolgt von der Solarthermieanlage (15 %) und den Rohrleitungsdämmungen (11 %). Bei dem PERT tauscht die Solarthermieanlage (35 %) mit der Fußbodenheizung (27 %) den ersten Platz und auf Platz drei folgt die Rohrleitungsdämmung mit 10 %.

Die sich im Rahmen des Vergleichs der Ergebnisse von Weißenberger und urbi+ ergebenden Abweichungen lassen sich zum einen auf die Unterschiede bei der Dimensionierung (siehe Tabelle 4.15) und zum anderen darauf zurückführen, dass Weißenberger die Ökobaudat Version 2016 im Rahmen seiner Dissertation verwendet hat. Im Rahmen dieser Dissertation wird eine aktuellere Version der Ökobaudat 2019-III (Abruf Daten: 29.05.2019) verwendet. Die grundsätzliche Herangehensweise zur Berechnung der LCA unterscheidet sich jedoch nicht zwischen Weißenberger und urbi+, weshalb ein Vergleich der Ergebnisse Sinn macht. Zudem können die Abweichungen in den Ergebnissen logisch nachvollzogen und erklärt werden.

### Lebenszykluskostenanalyse

Zur Berechnung und Validierung der LCC wird Fallbeispiel 2 in Kombination mit einem *Gas-Brennwertkessel für Heizung und TWW inklusive Solarthermieanlage und FBH (ES1)* herangezogen. Für die Validierung werden durchschnittliche Kostenkennwerte aus der Literatur verwendet. Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich die realen Kostenwerte auf Beschaffungs- und Einbaukosten beziehen, jedoch keine Werte für den Austausch bzw. den Ausbau und die Entsorgung dabei beinhaltet sind.

Die durch die LCC ermittelten lebenszyklusbasierten Grauen Kosten resultieren aus den in Abbildung 4.5 aufgezeigten LCC-Phasen. Die Berechnung der Phase B4 basiert auf den in Tabelle 4.15 auf Seite 118 aufgeführten Austauschzyklen.



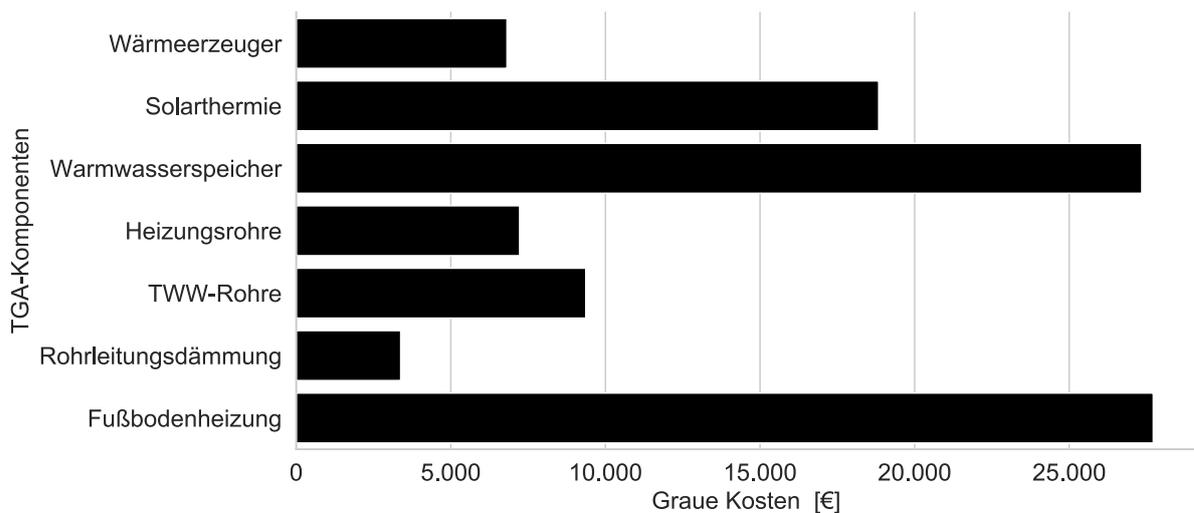
**Abbildung 4.5.:** Lebenszyklusbasiertes Graues GWP je TGA-Komponente (eigene Abbildung)

Insgesamt ergeben sich daraus über den Lebenszyklus hinweg Graue Kosten in Höhe von

- absolut: 100.697 €
- spezifisch: 654 €/m<sup>2</sup> und 13 €/m<sup>2</sup>\*a

Dabei wird eine jährliche Preissteigerung von 2 % angenommen. Die Herstellungs- bzw. Anschaffungskosten (A1-A3) nehmen einen Anteil von 31 %, die Austausch- und Ersatzkosten (B4) einen Anteil von 61 % und die Entsorgungskosten einen Anteil von 9 % ein. Für die Anschaffungskosten ergibt sich ein Wert von rund 200 €/m<sup>2</sup>. Gemessen an den vom Statistischen Bundesamt [175] veröffentlichten durchschnittlichen Baukosten von Gebäuden von 2.176 €/m<sup>2</sup> in Bayern, macht der durch urbi+ errechnete Wert einen Anteil von 9 % aus. In Anbetracht dessen, dass sich die LCC-Ergebnisse von urbi+ auf die TGA-Komponentenkosten inklusive des ortsspezifischen Faktors und des Faktors zur Berücksichtigung weiterer Komponenten und Personalkosten etc., beziehen, wird dieser Anteil als gering aber korrekt angenommen.

Die lebenszyklusbasierten Grauen Kosten ergeben sich aus dem Einsatz der in Abbildung 4.6 aufgezeigten TGA-Komponenten. Werden die Kosten für die Solaranlage zu den Kosten des Wärmeerzeugers gezählt, denn genau genommen sind beide zur Wärmebereitstellung vorgesehen, dann machen diese beiden 26 % an den gesamten Kosten aus. Das ist fast genau so viel wie für die Fußbodenheizung mit 28 % und für den Warmwasserspeicher mit 27 %. Komponenten wie bspw. die Rohrleitungsdämmung, die z. B. beim GWP deutlich stärker ins Gewicht fallen, spielen bei den Kosten mit einem Anteil von 3 % eine untergeordnete Rolle.



**Abbildung 4.6.:** Lebenszyklusbasierte Graue Kosten je TGA-Komponente (eigene Abbildung)

Aus dem Grauen GWP können weiterführend unter Berücksichtigung von Preissteigerungen und Kalkulationszinssätzen die hierfür ab 2021 anfallenden Emissionskosten berechnet werden. Aus der Berechnung ergeben sich in Summe die folgenden Kosten:

- absolut: 610 €
- spezifisch: 4 €/m<sup>2</sup> und 0,08 €/m<sup>2</sup>\*a

Dabei entfallen rund 13 % der Kosten auf die Herstellung (A1-A3), 60 % auf die Nutzung und 27 % auf die Entsorgung. Bei den Entsorgungskosten wird deutlich, dass die jährliche Preissteigerung von 5 % deutlich ins Gewicht fällt. Ohne diese Preissteigerung würden sich 15 % der Kosten aus der Entsorgungsphase ergeben.

#### **4.1.4. Fazit Gebäudeebene**

Auch wenn sich Abweichungen in den Ergebnissen zwischen Weißenberger und urbi+ ergeben, zeigen die durch urbi+ errechneten Energiebedarfswerte, Heizlasten, Dimensionierungen der TGA-Komponenten und LCA- und LCC-Werte, unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen, richtige Tendenzen auf. Einer der Gründe für die sich ergebenden Abweichungen ist, dass die mit urbi+ verglichenen Modelle und Softwareanwendungen praxis- und erfahrungswertnahe Energiebedarfs- und Heizlastberechnungen und TGA-Dimensionierungen durchführen. Die entwickelte Methode stützt sich auf eine theoretische, normenbasierte Berechnung und Dimensionierung unter Zuhilfenahme von Annahmen. Hierbei ist zu bemerken, dass die entwickelte Methode den Anspruch hat, unter Berücksichtigung aller getroffenen Annahmen, korrekte Berechnungsergebnisse zu erzielen, um somit eine automatisierte und schnelle Berechnung und Analyse einer großen Anzahl von Gebäuden zu ermöglichen. Hierzu zählen unter anderem die Definition der Lebensdauern und die sich daraus ergebenden Austauschzyklen der betrachteten TGA-Komponenten, die großen Einfluss auf die Gesamtbilanz nehmen können. Die vorgestellten Berechnungen basieren dabei auf generischen, normenbasierten Werten. Diese können jedoch projektspezifisch über die GUI von urbi+ für zukünftige Berechnungen angepasst werden.

Aus den vorgestellten Ergebnissen resultiert, dass der in urbi+ implementierte Ansatz als valide bewertet werden kann. Der generische methodische Ansatz berechnet verlässliche und korrekte Ergebnisse. Auf Stadtquartiers- und Stadtebene kann urbi+ somit angewendet werden.

## **4.2. Anwendung der Methode auf Stadtquartiersebene**

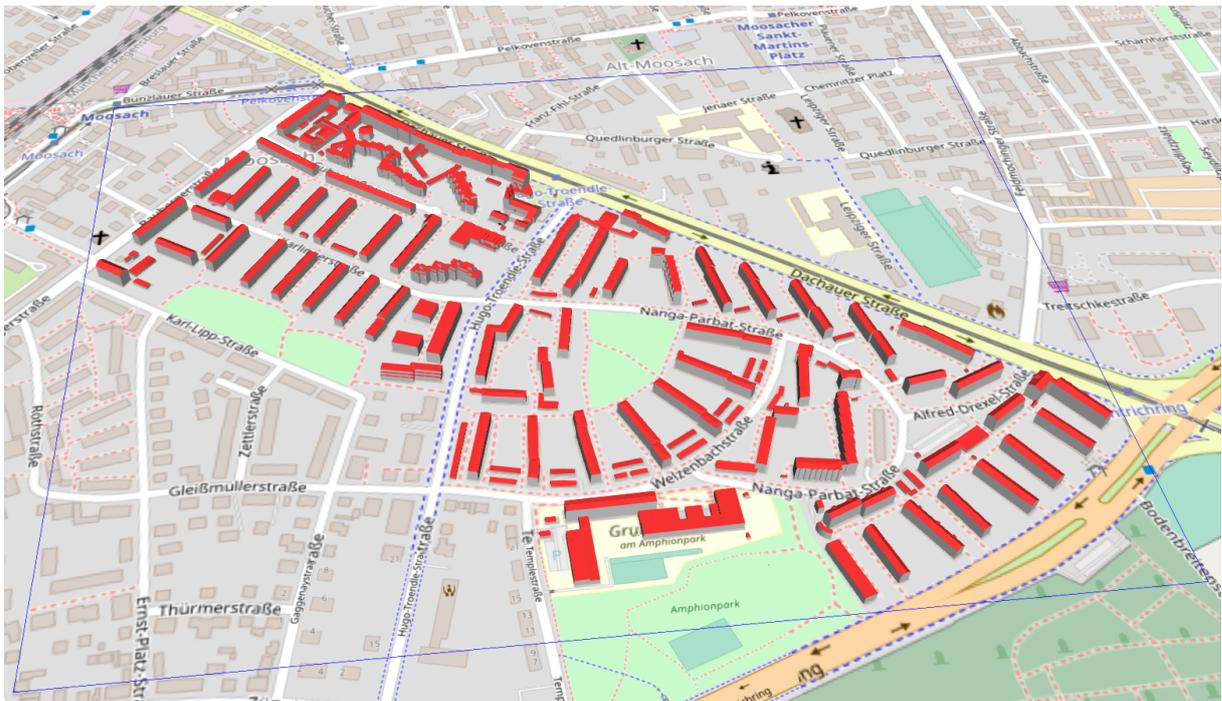
Zur Anwendung von urbi+ auf Stadtquartiersebene werden zunächst die hierfür notwendigen Berechnungsparameter definiert. Weiterführend werden die Berechnungsergebnisse für die wichtigsten Ergebnisparameter und die betrachteten Indikatoren aller berechneten Szenarien dargestellt und analysiert.

Der Sprung von der Gebäude- auf die Stadtquartiersebene bringt verschiedenste Herausforderungen bezüglich der Datengrundlage zur Berechnung mit sich. Denn je größer der zu berechnende und analysierende Gebäudebestand ist, umso weniger Daten stehen konsistent zur Verfügung. Das bedeutet, dass für viele Input-Parameter zur Berechnung Annahmen getroffen bzw. Durchschnittswerte verwendet werden müssen. Hierzu gehört z. B. die bereits beschriebene Definition von U-Werten, die den energetischen Standard des Gebäudes abbilden. Zudem werden die Wärmeerzeuger für Heizung und TWW oder die sich auf die TGA-Komponenten beziehenden Kostenwerte angegeben. Die getroffenen Annahmen bzw. verwendeten Durchschnittswerte können dabei eine Unsicherheit aufweisen, die sich auf die Endergebnisse auswirken kann. Es wird folglich eine Unsicherheitsanalyse

in Bezug auf alle Input-Parameter von urbi+ durchgeführt. Dabei soll festgestellt werden, welche dieser Parameter großen Einfluss auf die Varianz der Ergebnisse haben.

#### 4.2.1. Definition Fallbeispiel Stadtquartiersebene

Das Fallbeispiel bezieht sich auf ein Gebäudequartier im Stadtteil Moosach im Nordwesten Münchens (siehe Abbildung 4.7). Der Umgriff umfasst in Summe 380 Gebäude. 196 dieser Gebäude sind Wohngebäude.



**Abbildung 4.7.:** Ausschnitt des Stadtquartiers Moosach (Quellen: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109])

Berechnungen in Bezug auf die gebäudebezogenen Parameter zeigen für das ausgewählte Stadtquartier folgende Charakteristika auf:

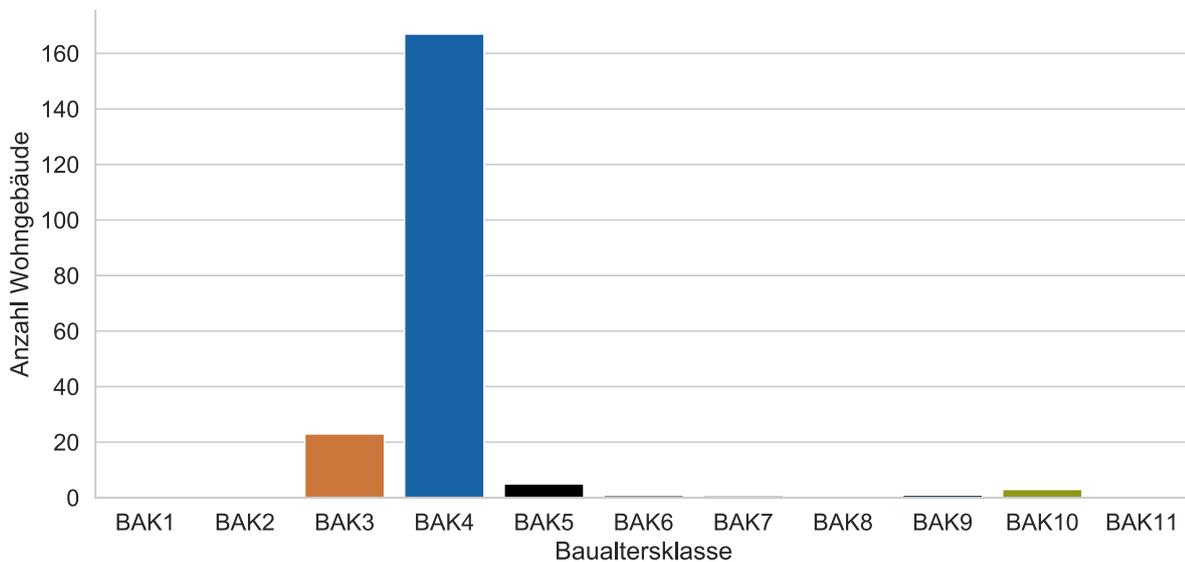
- Ø Wohnfläche: 687 m<sup>2</sup>
- Ø Volumen: 2.188 m<sup>3</sup>
- Ø Geschosshöhe je Gebäude: 2,9 m
- Ø Gebäudehöhe: 14,5 m
- Ø Geschossanzahl: 5,0

Der durchschnittliche Fensterflächenanteil beläuft sich auf rund 26 % (Fensterfläche geteilt durch die gesamte Fassadenfläche). Zudem sind rund 28 % der Außenwände Flächen, die sich mehrere Gebäude miteinander teilen.

Die Abbildung 4.8 zeigt die Aufteilung der Gebäude in die entsprechenden Baualtersklassen (BAKs) auf. Die Gebäude fallen in die folgenden BAKs:

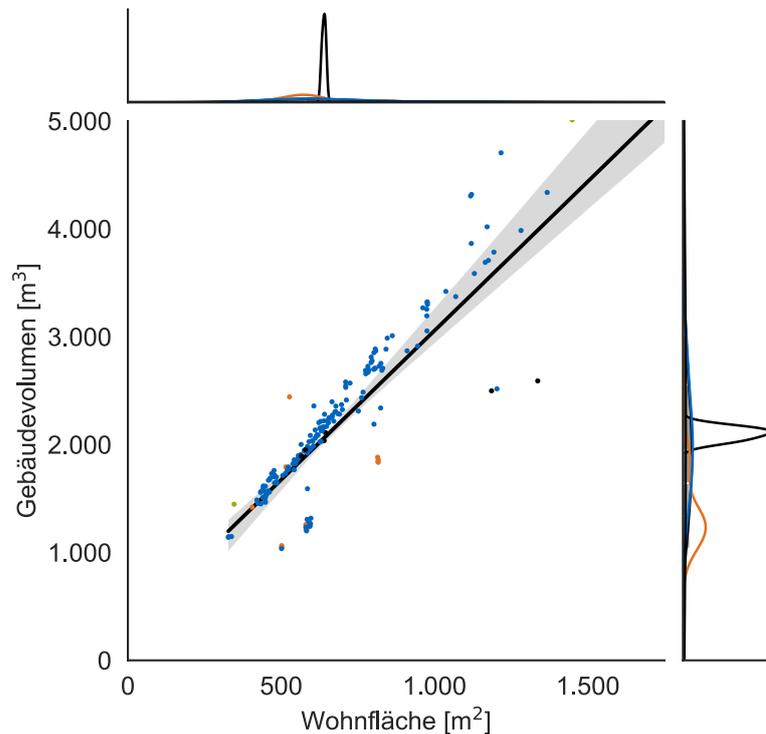
1. 162 Wohngebäude in BAK 4 (Baujahr 1969 - 1978)
2. 23 Wohngebäude in BAK 3 (Baujahr 1958 - 1968)
3. 5 Wohngebäude in BAK 5 (Baujahr 1979 - 1983)
4. 3 Wohngebäude in BAK 10 (Baujahr 2010 - 2015)

In die BAK6, 7 und 9 ordnet sich jeweils ein Gebäude ein.



**Abbildung 4.8.:** Verteilung der Baualtersklassen - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

In Abbildung 4.9 (siehe Seite 125) sind die einzelnen Gebäude mit den jeweiligen BAKs in Form farbiger Punkte nach dem Farbmuster aus Abbildung 4.8 eingefärbt. Zudem zeigt Abbildung 4.9 auf Seite 125 eine Korrelation zwischen dem Gebäudevolumen und der Wohnfläche auf. Dabei weist der Korrelationskoeffizient  $R$  einen Wert von 0,91 und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  einen Wert von 0,83 auf.  $R$  zeigt mit dem aufgeführten Wert eine lineare Korrelation auf [176].  $R^2$  gibt wiederum den prozentualen Anteil der Streuung der einen Variable an, der durch die andere Variable erklärt werden kann - und umgekehrt. In dem hier vorliegenden Beispiel bedeutet das, dass die Streuung der Werte für das Gebäudevolumen zu 83 % durch die Streuung der Werte der Wohnfläche erklärt und in einen linearen Zusammenhang zueinander gebracht werden kann.



**Abbildung 4.9.:** Vergleich der Gebäudevolumen mit den Wohnflächen - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

#### 4.2.2. Definition Berechnungsparameter Stadtquartiersebene

Die Definition der Berechnungsparameter unterteilt sich in die Definition der Parameter für die Unsicherheitsanalyse und für die LCA und LCC. Es werden alle 196 Wohngebäude sowohl für die Durchführung der Unsicherheitsanalyse als auch zur Durchführung der LCA und LCC ausgewählt.

##### Definition Berechnungsparameter Unsicherheitsanalyse

Eine Unsicherheitsanalyse wird durchgeführt, um den Einfluss variierender Input-Parameter auf die Varianz des Modell-Outputs bzw. des Ergebnisses eines Modells darzustellen. Die variierenden Parameter repräsentieren die Annahmen, die für die Input-Parameter getroffen werden, für die keine Informationen aus dem 3D-Stadtmodell hervorgehen (z. B. prozentuale Verteilung Energiesysteme). Zu den variierenden Parametern gehören ebenfalls jene, die sich aufgrund externer Gegebenheiten ändern können (z. B. LCA-Daten wegen eines Updates der Ökobaudat). Die Unsicherheitsanalyse wird auf Stadtquartiersebene durchgeführt, da durch die höhere Variation der Gebäudecharakteristika Verzerrungen, die sich durch spezifische Gebäudeparameter ergeben, ausgeglichen werden können.

Bei einem Gebäudeenergiemodell wird davon ausgegangen, dass dieses Effekte höherer Ordnung und Parameterinteraktionen enthält [177]. Das trifft auch auf die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methode zu. Zur Untersuchung von Gebäudeenergiemodellen eignen sich varianzbasierte Methoden, wobei die von Saltelli et al. [178] publizierte Methode *Sobol Sensitivity Analysis* (Sobol Sensitivitäts-

analyse) bereits erfolgreich bei der Untersuchung von Gebäudeenergiemodellen in der Wissenschaft Anwendung fand [172][179][177][180][181][182] und deshalb auch in diese Arbeit übernommen wird. Bei der Anwendung der Sobol Analyse wird in dieser Arbeit von einer „Unsicherheitsanalyse“ gesprochen weil die sich aus dem Variieren der Input-Parameter ergebende Unsicherheit, bei der Berechnung des Endergebnisses untersucht wird.

Bei der Sobol Analyse gibt es zwei Sensitivitätsindizes, die anhand der varianzbasierten Methode berechnet werden: den Effekt erster Ordnung  $S_1$  und den Gesamteffekt  $S^T$ . In Bezug auf die Untersuchungen der Input-Parameter der hier entwickelten Methode bedeutet das, dass der Effekt erster Ordnung  $S_1$  den unmittelbaren Einfluss variierender Input-Parameter auf die Varianz des Endergebnisses darstellt. Der Effekt erster Ordnung stellt die Varianz des Ergebnisses im relativen Vergleich zu allen anderen Input-Parametern dar. Der Effekt erster Ordnung wird nämlich durch den Wertebereich der Gesamtvarianz normiert [178] und resultiert in einem Wert zwischen null und eins. Um den Effekt erster Ordnung zu verringern, bedarf es der Reduktion des Variationsbereiches der identifizierten Input-Parameter mit dem größten Effekt auf das Berechnungsmodell [180]. Der Effekt erster Ordnung eignet sich daher dazu, die Parameter, die durch ihr Variieren einen signifikanten Einfluss auf die Varianz des Modell-Outputs nehmen, zu identifizieren [183][184]. Liegt bspw. die Information darüber, wie viel Prozent der Gebäude eines Stadtquartiers mit Fernwärme beheizt werden, nicht vor, dann wird ein Durchschnittswert von z. B. 50 % für die Berechnungen definiert. In Realität kann der Wert jedoch zwischen 0 % und 100 % variieren. Daraus ergibt sich folglich eine Unsicherheit bei der Ergebnisdarstellung. Kann durch eine bessere Informationslage die Variationsbreite jedoch von 0 % bis 100 % auf 40 % bis 60 % reduziert werden, dann ergibt die Berechnung mit dem Durchschnittswert von 50 % ein Ergebnis mit einer deutlich geringeren Unsicherheit. Je höher der Wert von  $S_1$  eines Input-Parameters ist, umso höher ist dessen Einfluss auf die Varianz des Modell-Outputs. Einzelne Input-Parameter können zum Vergleich mit allen anderen Input-Parametern mit einem Rang versehen und dadurch einander gegenübergestellt werden.

Der Gesamteffekt  $S^T$  repräsentiert den Effekt der Input-Parameter einschließlich deren Wechselwirkungseffekte mit allen weiteren Parametern und stellt somit einen Effekt höherer Ordnung dar. Hat der Parameter, der den prozentualen Anteil an Fernwärme in einem Stadtquartier definiert, im Vergleich zu allen anderen Parametern eine hohe Interaktion mit anderen Berechnungsschritten in der Gesamtmethode und somit auf die Ergebnisse, dann wird sich ein Wert für  $S^T$  näher an der Zahl eins ergeben. Im Unterschied zum Effekt erster Ordnung  $S_1$  beschreibt der Gesamteffekt  $S^T$  den Einfluss eines Input-Parameters auf den Modell-Output, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungseffekte mit allen anderen Input-Parametern [185].  $S_1$  und  $S^T$  sind vergleichende Maßeinheiten zur Bewertung der Empfindlichkeit eines Modells auf schwankende Input-Parameter [186].

Für die Durchführung der Unsicherheitsanalyse werden im ersten Schritt alle für die Berechnung notwendigen Input-Parameter für urbi+ identifiziert. Hierbei wird zwischen variierenden und fixen Parametern unterschieden. Variierende Parameter können über die GUI von urbi+ für jeden Berechnungsdurchlauf neu definiert und angepasst werden. Zu den variierenden Parametern zählen ebenso jene, die durch eine Anpassung oder ein Update von Werten in der LCA/LCC-Datenbank

(inklusive U-Werte) verändert werden können. Fixe Parameter sind fest einprogrammierte Werte, die, ohne in den Programmiercode aktiv einzugreifen, nicht verändert werden können. Die Liste aller variierender Parameter (499 Input-Parameter) ist im Detail in Tabelle A.40 in Anhang A (siehe Seite 274) aufgeführt. Die Parameter sind dabei in zwölf verschiedene Parametergruppen unterteilt (siehe Tabelle 4.16 auf Seite 127). Diese Einteilung wird vorgenommen, da Untersuchungen gezeigt haben, dass eine große Anzahl der Parameter nur einen geringen bis gar keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse haben. Zudem erlaubt die Gruppierung eine deutlich übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse.

Die Ergebniswerte der Sensitivitätsindizes  $S_I$  und  $S^T$  werden pro Parametergruppe aufsummiert und vergleichend für die Indikatoren PENRT, PERT, GWP und Kosten dargestellt.

**Tabelle 4.16.:** Abkürzungen und Variationsbereiche der Parametergruppen (siehe Tabelle A.40, Anhang A, Seite 274)

Parametergruppe	Abkürzung	Variationsbereich
Prozentuale Energiesystemverteilung Parameteranzahl: 17	ESD	0 - 100 %
Primärenergiefaktoren Parameteranzahl: 5	PEF	spezifisch je Energiequelle
Lebensdauer Komponenten Parameteranzahl: 27	LK	15 - 50 Jahre
Prozentuale Wärmeübergabesystemverteilung Parameteranzahl: 2	WÜS	0 - 100 %
Anteil erneuerbarer Energie an Primärenergiequelle Parameteranzahl: 10	AEE	0 - 100 %
Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum - Parameteranzahl: 3	LD	parameterspezifisch
Zusätzliche Berechnungsfaktoren Parameteranzahl: 3	FAK <sub>EE</sub> FAK <sub>K</sub>	parameterspezifisch
Kostenwerte Endenergie der Energieträger und der Emissionen - Parameteranzahl: 7	KW	spezifisch je Energiequelle
U-/g-Werte Parameteranzahl: 28	UGW	spezifisch je Gebäudekomponente
Temperaturwerte Parameteranzahl: 2	TEM	±3 °C, basierend auf den Ausgangswerten
LCA-Werte aller betrachteten Komponenten Parameteranzahl: 285	LCA	±25 %, basierend auf den Ausgangswerten
Kostenwerte aller betrachteten Komponenten Parameteranzahl: 110	KOST	±25 %, basierend auf den Ausgangswerten

Für alle Input-Parameter werden Minimal- und Maximalwerte definiert, die als Grundlage für die Unsicherheitsanalyse herangezogen werden.

- Die Parametergruppe „Prozentuale Energiesystemverteilung“ umfasst insgesamt 17 Parameter, die die Verteilung der Energiesysteme auf Stadtquartiersebene beschreiben (z. B. 80 % Gas-Kessel und 20 % Öl-Kessel). Die Summe der Verteilung beträgt immer 100 %.
- Die Gruppe der „Primärenergiefaktoren“ besteht aus fünf Parametern mit Faktoren für Öl, Gas, Holz, Strom und Fernwärme. Der Primärenergiefaktor von Öl variiert z. B. zwischen 1,0 und 1,1, während der Primärenergiefaktor von Strom zwischen 0,5 und 1,8 variiert. Diese Werte repräsentieren mögliche Energieversorgungszenarien in der Zukunft.
- Die 27 Parameter der Parametergruppe „Lebensdauer Komponenten“ schwanken in einem Wertebereich zwischen 15 und 50 Jahren und repräsentieren damit die durchschnittliche Lebensdauer der TGA-Komponenten.
- In der Parametergruppe „Prozentuale Wärmeübergabesystemverteilung“ sind zwei Parameter aufgeführt, die die prozentuale Verteilung auf Heizkörper bzw. Fußbodenheizungen zur Wärmeübergabe definieren. Die Summe der beiden Parameter ergibt in jedem Fall 100 %, da davon ausgegangen wird, dass in jedem Wohngebäude eines der beiden Systeme installiert ist.
- Die zehn Parameter der Gruppe „Anteil erneuerbarer Energie an Primärenergiequelle“ legen den nicht-erneuerbaren und erneuerbaren Anteil jedes Primärenergieträgers für die Wärmeerzeugung fest, z. B. den prozentualen Anteil an Biogas und Erdgas am Gas-Mix.
- Die Parametergruppe „Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum“ setzt sich aus drei Parametern zusammen. Ein Parameter beschreibt die durchschnittliche Nutzungsdauer aller betrachteten Gebäude und variiert zwischen 20 und 100 Jahren. Der Entwicklungszeitraum, in dem alle betrachteten Gebäude saniert werden, ist ein weiterer Parameter, der zwischen 10 und 30 Jahren variiert. Der dritte Parameter in dieser Gruppe gibt die prozentuale Anzahl an beheizten Dachräumen des betrachteten Gebäudebestandes an.
- Die Parametergruppe „Zusätzliche Berechnungsfaktoren“ unterteilt sich in einen Faktor ( $FAK_{EE}$ ) für die energie- und emissionsbezogenen Berechnungen und zwei Faktoren ( $FAK_K$ ) für die kostenbezogenen Berechnungen. Der erste Parameter berücksichtigt den Standortfaktor zur Berechnung der LCC ( $FAK_K$ ) und passt sich je nach Postleitzahl in einem Wertebereich zwischen 0,847 und 1,326 an. Der Standortfaktor spiegelt ortsspezifische Kostenschwankungen wider. Der zweite Faktor ( $FAK_K$ ) definiert einen Kostenfaktor für die LCC, der z. B. Personalkosten mit abbildet und zwischen 0 % und 80 % variiert. Der dritte Faktor ( $FAK_{EE}$ ) kann ebenfalls zwischen 0 % und 80 % schwanken und berücksichtigt als Komponentenfaktor zusätzliche TGA-Komponenten (z. B. Lüftungsanlagen), die im Rahmen der Methode nicht im Detail miteinbezogen werden.
- Die Parametergruppe „Kostenwerte Endenergie der Energieträger“ umfasst sieben Indikatoren. Sechs dieser Indikatoren bestimmen die Kosten der Energiequellen für Raumheizung und TWW (Öl, Gas, Holz, Strom, Fernwärme und Solarthermie) und bewegen sich zwischen 0,2 €/kWh und 0,4 €/kWh. Der siebte Faktor stellt die Emissionskosten auf und variiert zwischen 20 €/t CO<sub>2</sub> und 25 €/t CO<sub>2</sub>, mit einer jährlichen Preissteigerung von 5 %.

- Die Parametergruppe „U-/g-Werte“ setzt sich aus 28 Parametern zusammen, die Aussagen über den U-Wert aller Gebäudeteile (Boden-, Wand-, Dach-, Fensterflächen) und den Energiedurchlassgrad (g-Wert) der Fensterflächen treffen. Die U- und g-Werte können sich zwischen Werten für alte Bestandsgebäude (Minimum: Baualtersklasse 1) und Neubauten nach Passivhausstandard (Maximum) je nach Gebäudekomponente unterscheiden.
- Die Gruppe „Temperaturwerte“ besteht aus zwei Parametern: der Tiefsttemperatur (zwischen  $-16\text{ °C}$  und  $-13\text{ °C}$ ) und der Durchschnittstemperatur (zwischen  $8\text{ °C}$  und  $11\text{ °C}$ ) eines Referenzjahres.
- Die Parametergruppe „LCA-Werte“ wird aus 285 Parametern gebildet. Für die energiebezogenen (PENRT und PERT) Indikatoren und den emissionsbezogenen (GWP) Indikator werden für jede betrachtete Lebenszyklusphase und für jede TGA-Komponente sowie für jede verbrauchte Kilowattstunde Endenergie für den Gebäudebetrieb Werte aus der Ökobaudat zugewiesen. Durch die Verwendung anderer Datenbanken könnten diese Werte unterschiedlich sein. Alle Parameter variieren daher mit  $\pm 25\%$  um die Basiswerte aus der Ökobaudat (siehe Tabelle A.38, Anhang A, Seite 269) und ergeben somit einen Minimal- und einen Maximalwert.
- Bei der Parametergruppe „Kostenwerte aller betrachteten Komponenten“ (110 Parameter) wird gleich wie bei der Parametergruppe „LCA-Werte“ verfahren. Die Werte können auch hier mit  $\pm 25\%$  um die Basiswerte der LCC (siehe Tabelle A.39, Anhang A, Seite 272) streuen.

Das Variieren bzw. Sampeln der Input-Parameter sowie das Analysieren der Ergebnisse im Rahmen der Unsicherheitsanalyse wird in der Programmiersprache Python mit der *Sensitivity Analysis Library SALib* [187], also außerhalb von urbi+, durchgeführt. Die Input-Parameter werden innerhalb der festgelegten Minimal- und Maximalwerte verändert, woraus sich „Sampling Sets“ ergeben. Die Daten werden dabei im Rahmen einer kontinuierlichen Gleichverteilung variiert. Insgesamt werden 500 Sampling Sets erzeugt, da sich diese Anzahl als Optimum zwischen Ergebnisgenauigkeit und Rechenzeit erwiesen hat [177]. Ist  $N$  die Anzahl der Sampling Sets und  $p$  die Anzahl aller Input-Parameter, dann berechnet die Formel 4.2 die Anzahl der Berechnungs- bzw. Methodendurchläufe  $n$ , die durchgeführt werden müssen, um alle Ergebnisse für die Analyse zu errechnen.

$$n = N * (p + 2) \quad (4.2)$$

$n$  = Anzahl Modell-/Methodendurchläufe [–]

$N$  = Anzahl Sampling Sets [–]

$p$  = Anzahl Input-Parameter [–]

Jedes Sampling Set enthält dabei 501 Zeilen, die jeweils alle 499 Input-Parameter für einen Modell- bzw. Methodendurchlauf enthalten (siehe Formel 4.3 auf Seite 130). Eine Zeile bedeutet also einen gesamten Rechendurchlauf der Methode über alle 196 Wohngebäude hinweg. Insgesamt entstehen daraus 250.500 Modelldurchläufe. Hieraus ergeben sich wiederum 250.500 Ergebnisse für jeweils

den Operativen (LCA- und LCC-Nutzungsphase) und Grauen Indikatorwert (LCA- und LCC-Phasen Herstellung, Austausch und Ersatz und Entsorgung) für das GWP, den PENRT, den PERT und die Kosten (siehe Formel 4.4).

$$X = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & \dots & X_{1,p} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & \dots & X_{2,p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \dots & \dots & X_{n,p} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$$Y(X) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Aus der Analyse der Ergebnisse jeweils für den Operativen und Grauen Anteil aller Indikatoren der LCA und LCC resultieren die Ergebnisse für den Operativen Anteil und den Grauen Anteil des Effekts erster Ordnung  $S_I$  und des Gesamteffekts  $S^T$ .

### Definition Berechnungsparameter Lebenszyklusanalyse

Bei der Berechnung der Lebenszyklusanalyse auf Stadtquartiersebene werden neben der Betrachtung des Status quo des Gebäudebestandes zwei darauf aufbauende Entwicklungsszenarien berücksichtigt. Für die Betrachtung des Status quo sowie der beiden Entwicklungsszenarien müssen neben den gebäudespezifischen Informationen, die über die CityGML-Datei bzw. das 3D-Stadtmodell bereitgestellt werden, noch zusätzliche Definitionen z. B. zu den verbauten Energiesystemen und den Primärenergiefaktoren etc. vorgenommen werden. Diese Definitionen werden über die GUI von urbi+ für die Berechnung bereitgestellt und im Folgenden detailliert aufgeführt. Sie basieren dabei zum Teil auf projektspezifischen Ausführungen, die in Zusammenarbeit mit den für das Stadtquartier zuständigen Planer/-innen der Landeshauptstadt München (LHM) im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts *Grüne Stadt der Zukunft* erarbeitet wurden [34]. Die U-Werte für die Energiebedarfs- und Heizlastberechnungen beruhen sowohl für den Status quo als auch für die Entwicklungsszenarien auf den für die Baualtersklassen definierten U-Werten (siehe Tabelle A.2 und A.3, Anhang A, Seiten 249 und 250). Zudem wird sowohl für den Status quo als auch für beide Entwicklungsszenarien eine durchschnittliche Lebensdauer aller Wohngebäude von 50 Jahren angenommen. Der Faktor von 1,2 wird als pauschaler Aufschlagswert zur Berücksichtigung nicht betrachteter TGA-Komponenten bei der Berechnung der LCA angenommen. Der Faktor von 1,8 bindet nicht betrachtete TGA-Komponenten sowie Personalkosten etc. bei der LCC ein und der Ortsfaktor von 1,326 spiegelt laut SIRADOS [152] die ortsspezifischen

Preise Münchens wider. Für die ökologische, energetische und kostenbezogene lebenszyklusbasierte Betrachtung werden die in Tabelle 4.17 aufgeführten Energiesysteme herangezogen. Dabei ist zu erkennen, dass im Rahmen der Entwicklungsszenarien auf den Einsatz von Erneuerbaren Energien gesetzt wird. Szenario 1 konzentriert sich auf den Einsatz von Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei steigendem Anteil an erneuerbarem Strom im deutschen Strom-Mix und sinkendem Primärenergiefaktor. Szenario 2 ist auf den Einsatz von Fernwärme bei steigendem Anteil an erneuerbaren Ressourcen bei dessen Erzeugung und einem ebenfalls sinkenden Primärenergiefaktor fokussiert. Tabelle 4.18 gibt Aufschluss über die Lebensdauer der betrachteten TGA-Komponenten.

**Tabelle 4.17.:** Prozentuale Definition der TGA-Komponenten für den Status quo wie auch für die Szenarien 1 und 2 - Stadtquartier Moosach

TGA-Komponente	Status quo [%]	Szenario 1 [%]	Szenario 2 [%]
Gas-Kessel - Heizen	80	-	-
Öl-Kessel - Heizen	20	-	-
Wasser-Wasser-Wärmepumpe - Heizen	-	100	-
Fernwärme - Heizen	-	-	100
Gas-Kessel - TWW	40	-	-
Öl-Kessel - TWW	10	-	-
Durchlauferhitzer - TWW	50	-	-
Wärmepumpen - TWW	-	40	-
Fernwärme - TWW	-	-	40
Solarthermie - TWW	-	60	60
Radiatoren	100	-	-
Fußbodenheizung	-	100	100

**Tabelle 4.18.:** Definition der Lebensdauer der TGA-Komponenten für den Status quo wie auch für die Szenarien 1 und 2 - Stadtquartier Moosach

TGA-Komponente	Status quo [a]	Szenario 1 [a]	Szenario 2 [a]
Gas-Kessel	20	-	-
Öl-Kessel	20	-	-
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	-	20	-
Erdsonden/Brunnensystem	-	30	-
Fernwärme	-	-	20
Durchlauferhitzer - TWW	15	-	-
Solarthermie - TWW	-	20	20
Radiatoren	30	-	-
Fußbodenheizung	-	30	30
Warmwasserspeicher	20	20	20
Rohrleitungen - Heizen und TWW	25	25	25
Rohrleitungsdämmung	20	20	20
Öl-Tank	30	-	-

Der gesamte Entwicklungs- bzw. Sanierungszeitraum wird auf zehn Jahre angesetzt. Das bedeutet, dass Ende des Jahres 2030 alle betrachteten Wohngebäude auf den vorgesehenen Standard saniert werden. Der energetische Standard bezieht sich auf die U-Werte in Anlehnung an das KfW-Effizienzhaus 55 in Szenario 1 und den Passivhausstandard in Szenario 2 (siehe Tabelle A.4, Anhang A, Seite 250). Für die Berechnungen werden zudem die in Tabelle 4.19 aufgeführten Primärenergiefaktoren und die in Tabelle 4.20 aufgeführten Anteile an (nicht-)erneuerbarer Energie in Bezug auf die Primärenergiequellen definiert.

**Tabelle 4.19.:** Primärenergiefaktoren für den Status quo wie auch für die Szenarien 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (Quelle: [113])

Primärenergiequelle	Status quo [-]	Szenario 1 [-]	Szenario 2 [-]
Gas	1,1	-	-
Öl	1,1	-	-
Fernwärme	-	-	0,05
Strom	1,8	1,0	1,5

**Tabelle 4.20.:** Nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Anteil an der Primärenergiequelle Status quo, Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (Quelle: [188])

Primärenergiequelle	Status quo [%]	Szenario 1 [%]	Szenario 2 [%]
	nicht-erneuerbar/ erneuerbar	nicht-erneuerbar/ erneuerbar	nicht-erneuerbar/ erneuerbar
Gas	80/20	-	-
Öl	100/0	-	-
Fernwärme	-	-	10/90
Strom	70/30	30/70	50/50

Für die Durchführung der LCC werden die in Tabelle 4.21 aufgeführten energieträger- und emissionspezifischen Kosten angenommen.

**Tabelle 4.21.:** Kostenwerte der Endenergie und des GWP für den Status quo - Stadtquartier Moosach (Quellen: [151][166][167])

Endenergie/Emissionen	Status quo
Gas	0,0577 €/kWh
Öl	0,0377 €/kWh
Fernwärme	0,089 €/kWh
Strom	0,19 €/kWh
GWP	25 €/t

Für die ökonomische lebenszyklusbasierte Betrachtung der Entwicklungsszenarien werden für das Jahr 2020 die für die Berechnung des Status quo angenommenen Kosten herangezogen, die für alle darauffolgenden Jahre jeweils mit einer Preissteigerung und einem Kalkulationszinssatz versehen werden (siehe Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen 2015 [168]). Die jährliche Preissteigerung

und der Kalkulationszinssatz beziehen sich dabei nicht nur auf die Energieträger und Emissionen, sondern ebenfalls auf die Lebenszykluskosten der TGA-Komponenten (siehe Tabelle 4.22).

**Tabelle 4.22.:** Preissteigerungen (PS) und Kalkulationszinssätze (KS) für die Endenergie, das GWP und die Komponentenkosten für Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (Quelle: [168])

Endenergie/TGA-Komponenten	PS S1 und S2 [%]	KS S1 und S2 [%]
Gas/Öl/Fernwärme/Strom/GWP	5	1,5
TGA-Komponenten	2	1,5

### 4.2.3. Berechnungsergebnisse auf Stadtquartiersebene

Die Berechnungsergebnisse auf Stadtquartiersebene gliedern sich in die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse und die der Berechnung der LCA und LCC. Dabei werden die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse zuerst aufgeführt. Diese ermöglichen, die daraus folgenden Ergebnisse der LCA und LCC anhand der getroffenen Definitionen der Input-Parameter besser zu interpretieren.

#### Berechnungsergebnisse Unsicherheitsanalyse

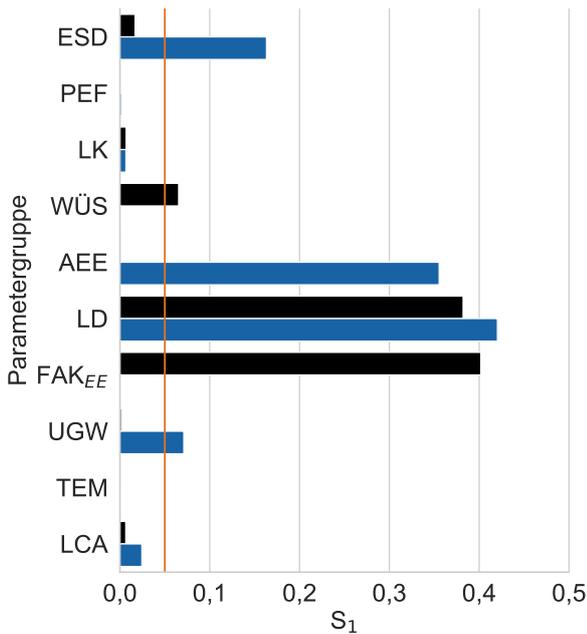
Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse werden in Bezug auf den Operativen und Grauen Anteil der maßgeblichen energetischen Indikatoren (PENRT und PERT) und dem maßgeblichen emissionsbezogenen (GWP) und kostenbezogenen (€) Indikator bei der Durchführung der LCAs gegliedert und dargestellt<sup>1</sup>. Bei den Ergebnissen der Unsicherheitsanalyse ist zu beachten, dass diese keinen Aufschluss darüber geben, welche Parameter und Parametergruppe lebenszyklusbasiert zur absolut größten Einsparung oder Steigerung an Operativem und Grauem GWP, PENRT, PERT und Operativen und Grauen Kosten führen. Die Ergebnisse zeigen die Auswirkung des Variierens von Parametern auf die relative Varianz des Endergebnisses auf. Dabei wird nicht jede Parametergruppe (siehe Tabelle A.40, Anhang A, Seite 274) für jeden Indikator ausgewertet, da manche Parametergruppen schon vorweg ausgeschlossen werden können. Zum Beispiel haben die Parameter der LCA keine Auswirkung auf den Indikator Kosten.

#### Ergebnisse Unsicherheitsanalyse GWP

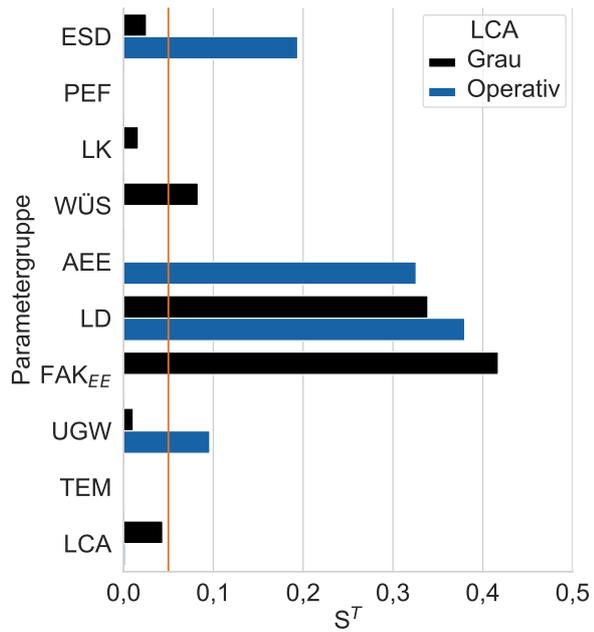
Die Abbildung 4.10 auf Seite 134 zeigt die Schwankung der Parametergruppen auf, die den größten Einfluss auf die Varianz des lebenszyklusbasierten **Operativen GWPs**, bezogen auf den Effekt erster Ordnung  $S_1$ , haben (siehe Tabelle 4.16 auf Seite 127 für die Definition der Parametergruppen):

1. Durchschnittliche Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum (LD)
2. Anteil erneuerbarer Energie an Primärenergiequelle (AEE)
3. Prozentuale Energiesystemverteilung (ESD)

<sup>1</sup> Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse für die Indikatoren GWP, PENRT und PERT sind zur Veröffentlichung bei der *Building Simulation Konferenz 2021* eingereicht [189]



**Abbildung 4.10.:**  $S_1$  für das GWP  
(eigene Abbildung)



**Abbildung 4.11.:**  $S^T$  für das GWP  
(eigene Abbildung)

Die Parameter mit einem Wert knapp über und unter 0,05 (5 % an der Gesamtvarianz) haben nur einen geringfügigen Einfluss auf das jeweils betrachtete Ergebnis und werden deshalb nicht einzeln im Detail berücksichtigt und diskutiert (siehe orangefarbenen vertikalen Strich in den Abbildungen 4.10 bis 4.17) [190].

- In der Parametergruppe **Lebensdauer Wohngebäude (LD)** hat vor allem der Parameter, der die durchschnittliche Nutzungsdauer der betrachteten Gebäude definiert, mit 97 % den größten Einfluss auf  $S_1$ . Werden Gebäude länger oder kürzer genutzt (jeweils im Jahresrhythmus), erhöht oder verringert sich die Summe der bei der Wärmeerzeugung für Raumheizung und TWW emittierten Emissionen um diesen Zeitraum. Das kann einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz und  $S_1$  ausüben. Grundsätzlich sollte ein Bestandsgebäude so lange wie möglich genutzt werden. Eine längere Nutzungsdauer bedeutet aber auch mehr Emissionen durch die Wärmeerzeugung. Daher ist es im Sinne einer nachhaltigen Gebäudeentwicklung wichtig, den Gebäudebetrieb durch den Einsatz Erneuerbarer Energien so emissionsfrei wie möglich zu gestalten.
- Für die Parametergruppe **Anteil Erneuerbarer Energie an Primärenergiequelle (AEE)** sind mit 99 % vor allem die zwei Parameter für den Wert von  $S_1$  verantwortlich, die den erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteil der Primärenergie am benötigten Strom angeben. Auch wenn Technologien der Erneuerbaren Energien (z. B. Biomasse-Kessel) zur Bereitstellung von Wärme für Heizung und TWW verwendet werden, wird Strom als Hilfsenergie für die Wärmeverteilung, Speicherung usw. genutzt und nimmt daher, unabhängig von der Art des Wärmeerzeugers, auf jede Berechnung Einfluss.

- In der Parametergruppe **Prozentuale Energiesystemverteilung (ESD)**, die den drittgrößten Einfluss auf  $S_1$  aufweist, gibt es fünf Parameter, die in der Gesamtheit 88 % von  $S_1$  in dieser Parametergruppe ausmachen: der Anteil der Öl-Kessel (22 %), Luft-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen (je 18 %), Sole-Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit Erdsonden (16 %) und elektrische Heizungen (14 %). Dies ist vor allem auf die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger zurückzuführen, die einen Einfluss auf das Operative GWP haben können.

Bei den Parametergruppen, die sich auf das **Graue GWP** beziehen, sorgen die im Folgenden aufgeführten Parametergruppen für die größte Varianz im Ergebnis, in Bezug auf den Effekt erster Ordnung  $S_1$ :

1. Parametergruppe **zusätzliche Berechnungsfaktoren (FAK<sub>EE</sub>)**: Werden zusätzliche TGA-Komponenten (z. B. Fahrstühle, Lüftungs- und Klimaanlage etc.) über den Berechnungsfaktor *Komponentenfaktor LCA* berücksichtigt, so wird dieser mit dem Indikatorwert für GWP multipliziert und kann einen hohen Einfluss auf das Endergebnis bzw.  $S_1$  haben.
2. Parametergruppe **Durchschnittliche Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum (LD)**: Bei dieser Parametergruppe ist es der Parameter, der die mittlere Lebensdauer der betrachteten Gebäude definiert. Wie beim Operativen GWP nimmt er mit 95 % den größten Einfluss auf  $S_1$ . Im Falle des Grauen GWP kann dieser Parameter jedoch die Anzahl der Austauschzyklen der TGA-Komponenten bestimmen, die ihre Referenzlebensdauer überschritten haben.
3. Parametergruppe **Prozentuale Wärmeübergabesystemverteilung (WÜS)**: Hierbei ist mit 90 % der Parameter für den höchsten Ausschlag von  $S_1$  verantwortlich, der definiert, wie viel der Nutzfläche der betrachteten Gebäude über eine Fußbodenheizung beheizt werden.

Die Abbildung 4.11 auf Seite 134 zeigt die Werte für den Gesamteffekt  $S^T$  auf, bezogen auf das lebenszyklusbasierte **Operative und Graue GWP**. Es wird deutlich, dass für  $S_1$  und für  $S^T$  die gleichen Parametergruppen und auch die gleichen Parameter innerhalb der Gruppen sowohl für den Operativen als auch für den Grauen Anteil ausschlaggebend sind. Das bedeutet, dass beide, die Parametergruppen und der Parameter wegen ihres Variierens die größte Abweichung im Endergebnis verursachen und auch für die meisten Parameterinteraktionen innerhalb der Methode verantwortlich sind. Die Parametergruppe „Primärenergiefaktoren“ (PEF) ist beispielhaft in den vorherigen Abbildungen mit aufgeführt, nimmt allerdings keinen Einfluss auf die Berechnung des Operativen und Grauen GWPs und führt deshalb weder bei  $S_1$  noch bei  $S^T$  zu einem Ausschlag.

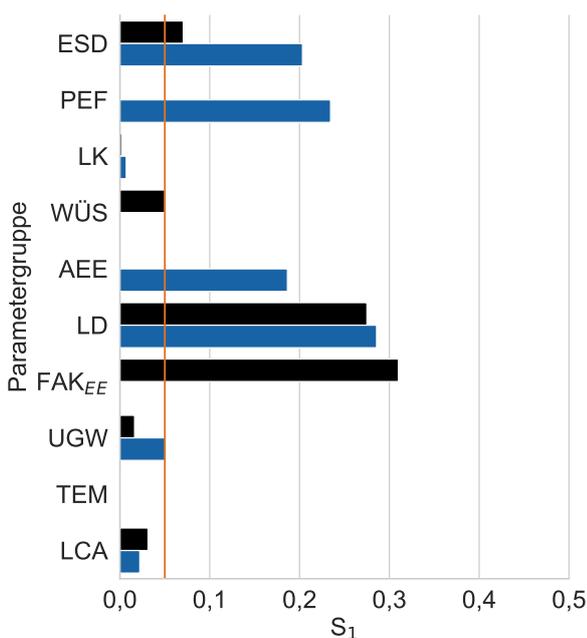
### Ergebnisse Unsicherheitsanalyse PENRT

In Bezug auf  $S_1$  des **Operativen PENRT** (siehe Abbildung 4.12 auf Seite 136) gibt es vier Parametergruppen, die eine bedeutende Rolle spielen:

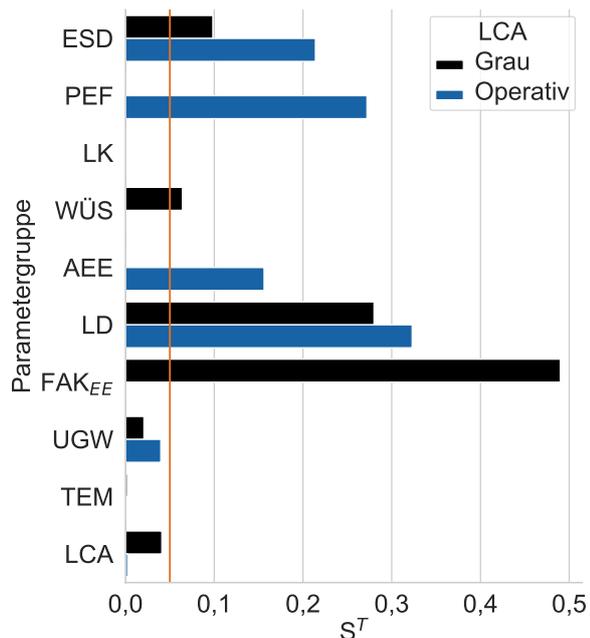
1. Parametergruppe **Durchschnittliche Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum (LD)**: An dieser Stelle gilt die gleiche Erklärung wie für das GWP, da der Parameter, der

die durchschnittliche Nutzungsdauer von Gebäuden darstellt, auch in Bezug auf den PENRT den größten Anteil am Wert für  $S_1$  einnimmt (94 %).

2. Parametergruppe **Primärenergiefaktoren (PEF)**: Der Parameter, der den Primärenergiefaktor für Strom festlegt, ist mit 97 % für den größten Anteil an  $S_1$  verantwortlich.
3. Parametergruppe **Prozentuale Energiesystemverteilung (ESD)**: Hier sind es folgende Parameter, die den Wert von  $S_1$  ausmachen: Öl-Kessel (27 %), Gas-Kessel und Wasser-Wasser-Wärmepumpen (je 15 %), Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsonden (14 %) und Elektroheizungen (13 %). Dabei haben im Speziellen die Wirkungsgrade der verschiedenen Wärmeerzeuger einen hohen Einfluss auf die Varianz des Operativen PENRT.
4. Parametergruppe **Anteil erneuerbarer Energie an Primärenergiequelle (AEE)**: Bei dieser Parametergruppe ist ebenfalls die gleiche Erklärung wie beim GWP gültig. Denn der Parameter, der den Anteil der erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Primärenergie am eingesetzten Strom angibt, ist mit 91 % auch hier für den größten Anteil von  $S_1$  verantwortlich. Das deckt sich wiederum mit dem Parameter, der den Primärenergiefaktor für Strom in der Parametergruppe PEF definiert.



**Abbildung 4.12.:**  $S_1$  für den PENRT  
(eigene Abbildung)



**Abbildung 4.13.:**  $S^T$  für den PENRT  
(eigene Abbildung)

Beim **Grauen PENRT** sind es vor allem die folgende Parametergruppen, die den größten Ausschlag für  $S_1$  aufweisen:

1. Zusätzliche Berechnungsfaktoren (FAK)
2. Durchschnittliche Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum (LD)
3. Prozentuale Energiesystemverteilung (ESD)

Für die **Parametergruppen FAK<sub>EE</sub> und LD** gelten die gleichen Erklärungen wie beim Indikator Graues GWP. Bei der **Parametergruppe ESD** hat der Parameter, der den Anteil der Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsonden definiert, den größten Einfluss auf  $S_1$  (88 %). Das ist darauf zurückzuführen, dass zusätzlich zur Wärmepumpe Erdwärmesonden installiert werden, die zu einem zusätzlichen Anteil am Grauen PENRT beitragen, wodurch das Ergebnis beeinflusst werden kann. Die Abbildung 4.13 auf Seite 136 zeigt den Gesamteffekt  $S^T$  für den PENRT auf. Ebenso wie beim GWP ist es auch bei dem PENRT der Fall, dass die gleichen Parametergruppen sowohl bei  $S_1$  als auch bei  $S^T$  für die höchsten Werte verantwortlich sind. Die Parametergruppen mit dem höchsten Effekt erster Ordnung weisen ebenfalls in Bezug auf den Gesamteffekt die höchsten Parameterinteraktionen im Rahmen der Methode auf.

### Ergebnisse Unsicherheitsanalyse PERT

Die Abbildung 4.14 auf Seite 137 zeigt die Operativen und Grauen Werte für  $S_1$  in Bezug auf den Indikator PERT auf.

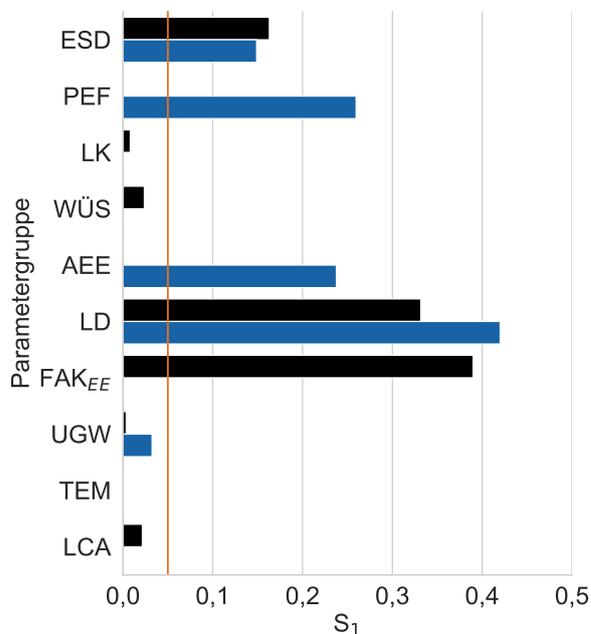


Abbildung 4.14.:  $S_1$  für den PERT  
(eigene Abbildung)

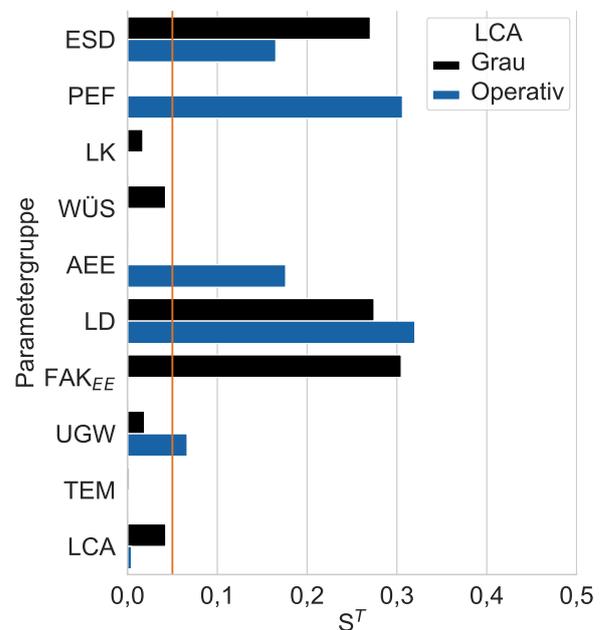


Abbildung 4.15.:  $S^T$  für den PERT  
(eigene Abbildung)

Beim **Operativen PERT** sind es grundsätzlich die gleichen Indikatoren wie beim Operativen PENRT, die für den höchsten Ausschlag von  $S_1$  verantwortlich sind. Beim Operativen PERT hat jedoch die Parametergruppe AEE einen größeren Einfluss als die Parametergruppe ESD. Das liegt unter anderem daran, dass der Anteil des Operativen PERT an der gesamten Grauen PET deutlich geringer ausfällt als der Operative Anteil des PERT. In der Parametergruppe PEF ist der Parameter, der den Primärenergiefaktor für Strom angibt, für den größten Anteil des Wertes verantwortlich (95 %). In der Parametergruppe ESD sind die Parameter, die den Anteil von Biomassekesseln (57 %) und Elektroheizungen (20 %) angeben, die mit dem höchsten Ausschlag. Diese Parameter üben aufgrund ihres Variierens einen großen Einfluss auf den Operativen PERT aus, da Strom einerseits und Biomasse (Pellets und Hackschnitzel) andererseits ein großes Potenzial für die Nutzung Erneuerbarer Energien bieten.

Beim **Grauen PERT** sind es die Parametergruppen  $FAK_{EE}$ , LD und ESD, die  $S_1$  am meisten beeinflussen, ebenso wie beim Grauen GWP und beim Grauen PENRT. Bei der Parametergruppe LD ist es wiederum der Parameter, der die durchschnittliche Lebensdauer der Wohngebäude (96 %) angibt. Für die Parametergruppe ESD ist es zu 93 % der Parameter, der den Prozentsatz von Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden definiert.

In der Abbildung 4.15 auf Seite 137 ist wie bei dem GWP und PENRT zu erkennen, dass die Parameter mit dem höchsten  $S_1$  auch den höchsten Wert an  $S^T$  vorweisen und somit für die größte Parameterinteraktion verantwortlich sind. Dies spiegelt das gleiche Ergebnis wie für die Parameter und Indikatoren zuvor wider und zeigt ein konsistentes Ergebnis auf.

Interessant zu sehen ist, dass eine Schwankung in den LCA-Werten von  $\pm 25\%$  keinen nennenswerten Einfluss auf die Indikator-Ergebnisse hat. Insofern also kein Variieren zwischen LCA-Werten verschiedener Datenbanken von mehr als  $\pm 25\%$  vorliegt, hat die Auswahl einer anderer LCA-Datenbank keine signifikante Auswirkung auf die aufgeführten Indikatorwerte.

### Ergebnisse Unsicherheitsanalyse Kosten

Die Ergebnisse der Sensitivitätsindizes  $S_1$  und  $S^T$  für den Indikatorwert Kosten [€] sind in Abbildung 4.16 und 4.17 (siehe Seite 139) dargestellt. Hier sind es grundsätzlich deutlich mehr Parametergruppen, die einen Einfluss auf den Indikatorwert aufweisen als bei den vorherigen Indikatoren. Bei den **Operativen Kosten** in Bezug auf  $S_1$  sind die folgenden Parametergruppen mit dem größten Effekt auf das Indikator-Ergebnis zu nennen:

1. Parametergruppe **Durchschnittliche Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum (LD)**: Im Vergleich zu allen vorherigen Indikatoren weist LD an dieser Stelle einen größeren Effekt auf als die Gruppe FAK. Das liegt unter anderem daran, dass bei variierender Lebensdauer der Gebäude eine Energiepreissteigerung von jährlich 5 % und eine komponentenbezogene Preissteigerung von 2 % miteingerechnet wird. Wird z. B. ein zusätzliches Jahr bei der Berechnung berücksichtigt, dann ist die dadurch hervorgerufene Varianz im Endergebnis

für die Energiekosten in der Nutzungsphase höher, als wenn der Faktor für nicht berücksichtigte Komponenten (aus der Parametergruppe FAK) erhöht wird, was eine Auswirkung auf die Komponentenkosten hat. Die Varianz im Ergebnis ist durch die Schwankung der Lebensdauer der Gebäude somit höher als durch die Schwankung des Faktors zur Betrachtung zusätzlicher Komponenten.

2. Parametergruppe **Prozentuale Energiesystemverteilung (ESD)**: Es ist hauptsächlich die prozentuale Definition der Biomasse-Kessel (23 %), der Wasser-Wasser-Wärmepumpen (19 %), der Luft-Wasser-Wärmepumpen und Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsonden (jeweils 14 %) sowie die Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmekollektoren (12 %), die den größten Effekt auf  $S_1$  haben.
3. Parametergruppe **Zusätzliche Berechnungsfaktoren (FAK<sub>k</sub>)**: Hier ist die gleiche Erklärung gültig, wie bereits bei den vorherigen Indikatoren angeführt.
4. Parametergruppe **U-/g-Werte (UGW)**: Es sind im Besonderen die U-Werte der Außenwand, die mit 74 % den größten Anteil an  $S_1$  einnehmen. Der energetische Standard der Gebäudehülle kann somit deutliche Auswirkungen auf die Varianz der Operativen Kosten nehmen.

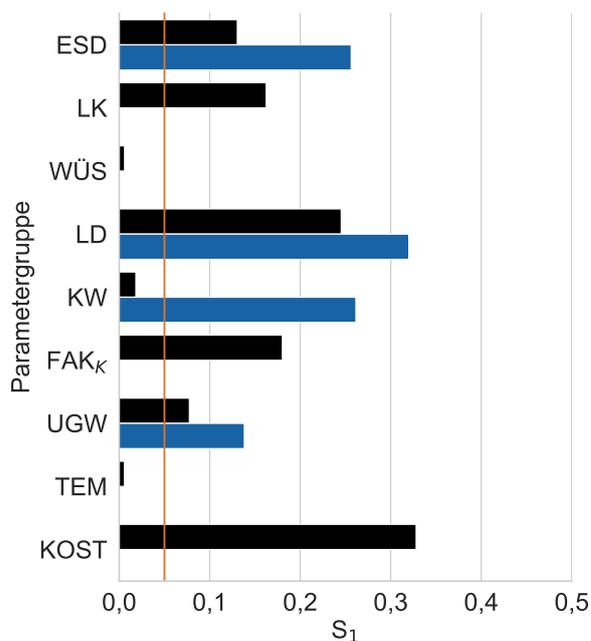


Abbildung 4.16.:  $S_1$  für die Kosten  
(eigene Abbildung)

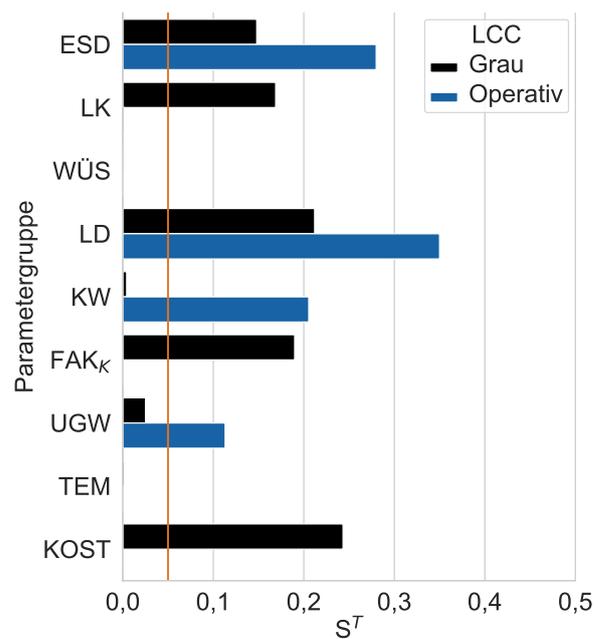


Abbildung 4.17.:  $S^T$  für die Kosten  
(eigene Abbildung)

Bei den **Grauen Kosten** in Bezug auf  $S_1$  sind es die folgenden Parametergruppen, die den größten Effekt auf das Indikator-Ergebnis haben:

- Parametergruppe **Kostenwerte aller betrachteten Komponenten (KOST)**: Die Parameter, die die Herstellungs-, Nutzungs- (Austausch und Ersatz) sowie Entsorgungskosten von Solarthermieanlagen angeben, weisen den höchsten Anteil an  $S_1$  auf.

- Parametergruppe **Durchschnittliche Lebensdauer Wohngebäude und Entwicklungszeitraum (LD)**: Der Parameter, der die durchschnittliche Lebensdauer der Gebäude darstellt, ist für den größten Anteil an  $S_1$  verantwortlich.
- Parametergruppe **Zusätzliche Berechnungsfaktoren (FAK<sub>K</sub>)**: In dieser Parametergruppe ist mit 94 % der zusätzliche Kostenfaktor (Personalkosten, zusätzliche Komponentenkosten etc.) für den Wert von  $S_1$  ausschlaggebend. Hierbei ist zu beachten, dass sich die zusätzlichen Berechnungsfaktoren bei der Kostenbetrachtung von denen bei der Betrachtung der Indikatoren GWP, PENRT und PERT unterscheiden (siehe Kapitel 4.2.2).
- Parametergruppe **Lebensdauer Komponenten (LK)**: Hier hat der Parameter, der die Lebensdauer der Erdsonden bzw. des Brunnensystems der Wasser-Wasser-Wärmepumpe definiert, mit 60 % den höchsten Einfluss auf  $S_1$ .

Auch beim Indikator Kosten bestimmt, ebenso wie bei allen vorherigen Indikatoren, die Parametergruppe mit dem höchsten Wert für  $S_1$  auch den höchsten Wert für  $S^T$  (siehe Abbildung 4.17 auf Seite 139). Aus den Ergebnissen der Unsicherheitsanalyse auf Stadtquartiersebene und der dafür benötigten Input-Parameter lassen sich über alle vier betrachteten Indikatoren hinweg Parameter identifizieren, die besonders die Varianz des Endergebnisses beeinflussen.

Es fällt auf, dass sich bei allen betrachteten Indikatoren die gleichen Parameter(gruppen) als die wichtigsten erweisen - mit Ausnahme des Kosten Indikators. Der Parameter, der die durchschnittliche Lebensdauer der betrachteten Wohngebäude bestimmt, hat aufgrund seines Variierens im Mittel über alle Indikatoren hinweg den größten Einfluss auf  $S_1$  und  $S^T$  (sowohl auf den Operativen als auch auf den Grauen Anteil).

Aus den vorgestellten Ergebnissen zu den vier Indikatoren lassen sich folglich datenbezogene und methodische Verbesserungen für zukünftige Forschungen ableiten, um LCA- und LCC-Ergebnisse auf der Basis großer Gebäudebestände mit geringeren Unsicherheiten durch Annahmen zu ermöglichen:

1. Um genauere Abschätzungen der Lebens- bzw. Nutzungsdauer eines Gebäudes zu erhalten, sollten gebäudespezifische Informationen über den Sanierungsstand (U- und g-Werte) und den baulichen Zustand eines Gebäudes vorliegen. Daraus können Rückschlüsse auf den Sanierungsbedarf oder die Notwendigkeit eines Abrisses und einer Neuerrichtung eines Gebäudes gezogen werden. Im städtischen Kontext wären zusätzliche Informationen über den Denkmalschutz historischer Gebäude hilfreich, da diese besonderen Vorschriften unterliegen.
2. Darüber hinaus würden gebäudespezifische Informationen über die Art und das Alter des Wärmeerzeugers bzw. der Heizungsanlage einschließlich ihrer Hauptkomponenten die Genauigkeit der LCA- und LCC-Berechnungen entscheidend verbessern. TGA-Komponenten können bei Bedarf unabhängig von einer gesamten Gebäudesanierung ausgetauscht und erneuert werden. Deshalb ist es herausfordernd, auf den Typ und das Alter des Systems zu schließen, wenn nur die Information über das Baualter des Gebäudes verfügbar ist.

3. Für die LCA und LCC sollten alle Komponenten der eingesetzten Technischen Gebäudeausrüstung bekannt sein. Dazu gehören z. B. Aufzüge, Elektroinstallationen, Lüftungs- und Klimaanlageanlagen. Diese werden derzeit wegen der damit verbundenen fehlenden Informationen nur durch einen Faktor mit großem Variationsbereich berücksichtigt. Zusätzliche Installationen, wie z. B. aktive Lüftungs- und Klimaanlageanlagen, führen jedoch nicht nur zu einem höheren Energiebedarf und zu höheren Emissionen während der Nutzungsphase von Gebäuden, sondern benötigen auch Graue Energie und verursachen Graue Emissionen. In Passivhäusern mit hohem Dämmstandard bspw. können Lüftungsanlagen in einigen Ländern bereits vorgeschrieben sein. Klimaanlageanlagen werden in Wohngebäuden immer beliebter, vor allem in Ländern mit wärmerem Klima und in Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel.
4. Insbesondere beim Strom sollte klar definiert werden, aus welchen Quellen dieser gewonnen wird. Da diese Entscheidung gebäude- bzw. wohnungsspezifisch (z. B. bei elektrischen Durchlauferhitzern) von den jeweiligen Bewohnern getroffen werden kann, sollte diese Information auch in dieser Auflösung vorhanden sein. Wie die Ergebnisse zeigen, können sowohl der Primärenergiefaktor für die Indikatoren des Operativen PENRT und Operativen PERT als auch der nicht-erneuerbare und erneuerbare Anteil des Stroms, insbesondere in Bezug auf den Indikator Operativen GWP, einen großen Einfluss auf die Varianz des Ergebnisses haben. Daher sollten gebäude- und wohnungsspezifische Informationen zum Stromverbrauch unter Beachtung des Datenschutzes zur Verfügung stehen.

Wenn diese Informationen für LCAs und LCCs auf der Basis großer Gebäudebestände zur Verfügung gestellt werden, könnten insgesamt gesehen genauere Berechnungen und Interpretationen über die lebenszyklusbasierte Energie-, Emissions- und Kostenbilanz von Gebäuden getroffen werden. In Bezug auf urbi+ wäre die Bereitstellung der gebäudespezifischen Informationen über ein semantisches 3D-Stadtmodell im CityGML-Format die praktikabelste Lösung. Die Informationen würden dann in einem zentralen Datenformat zur Verfügung stehen und könnten für gebäudespezifische Berechnungen und Analysen verwendet werden. Um die oben genannten Informationen zu erhalten und zentral zur Verfügung zu stellen, ist es notwendig, dass sich Kommunen und Stadtwerke bemühen, diese Informationen zusammenzuführen. Die Herausforderung besteht dabei nicht direkt in der Erfassung der Daten, da diese in den meisten Fällen bereits vorhanden sind, sondern vielmehr darin, diese zu sammeln, zu bereinigen und in anonymisierter Form in einem einheitlichen Format zur Verfügung zu stellen. Zur Erarbeitung übergreifender Strategien zur Realisierung einer nachhaltigen Entwicklung des Gebäudesektors muss eine Datenbasis für deren Entwicklung zur Verfügung stehen.

### **Berechnungsergebnisse LCA und LCC auf Stadtquartiersebene**

Grundlegend für die lebenszyklusbasierte Betrachtung ist zunächst die Berechnung des Heizenergiebedarfs und der Heizlast. Darauf aufbauend werden die betrachteten TGA-Komponenten dimensioniert und die LCA und LCC berechnet. Bei der Betrachtung des Status quo wird die Herstellung und der Austausch und Ersatz der im Bestand verbauten TGA-Komponenten nicht mitberechnet. Deren Entsorgung wird im Zuge der beiden Entwicklungs- oder Sanierungsszenarien entsprechend berücksichtigt.

## Berechnungsergebnisse Status quo Stadtquartiersebene

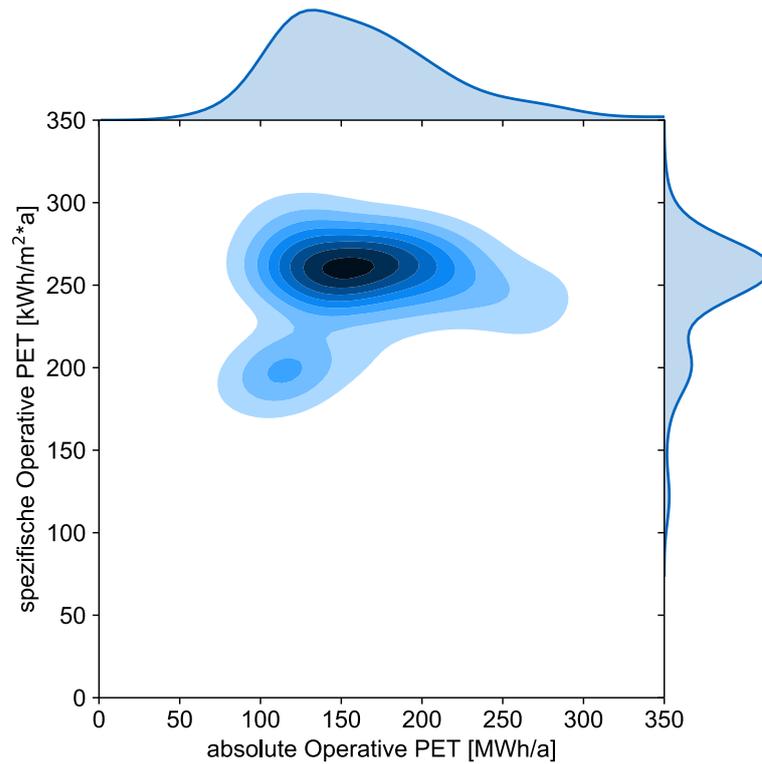
Für den Status quo ergeben die Berechnungen in Summe über alle 196 Wohngebäude für das Heizen und das TWW (Nutzungsphase) die in der Tabelle 4.23 (siehe Seite 142) aufgeführten Werte. Die Werte für die Energiebedarfe (PET, PENRT, PERT) sowie die Emissionen (GWP) und die Emissionskosten (GWP-Kosten) beziehen sich auf den Operativen Anteil jeweils eines Jahres (siehe Tabelle 4.23). Die auf den Quadratmeter Wohnfläche bezogenen Durchschnittswerte in der rechten Spalte beziehen sich somit ebenfalls auf ein Jahr. Dabei entfallen rund 90 % der Endenergie auf die Heizwärme und die restlichen 10 % auf das TWW. Bei den Kosten werden rund 80 % der benötigten Endenergie der Raumheizung und 20 % dem TWW angerechnet. Der prozentuale Unterschied zwischen Raumheizung und TWW, bezogen auf die Endenergie und Energiekosten, ergibt sich daraus, dass 50 % der Endenergie für TWW durch elektrische Durchlauferhitzer gedeckt werden. Der auf eine Kilowattstunde bezogene Strompreis liegt um 200 % höher als der entsprechende Preis für Heizöl und Gas.

**Tabelle 4.23.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für den Status quo (SQ) - Stadtquartier Moosach

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>
Heizlast [kW]	14.130	70	0,10
Endenergiebedarf [kWh/a]	29.235.383	145.450	214
PET [kWh/a]	33.516.284	166.748	245
PENRT [kWh/a]	28.108.560	139.844	206
PERT [kWh/a]	5.407.724	26.904	40
Energiekosten [€/a]	1.761.714	8.765	13
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	7.094.400	35.296	52
GWP-Kosten [€/a]	177.360	904	1,27

Die Summe des Primärenergiebedarfs (PET) wird im Status quo zu 84 % aus nicht-erneuerbaren Primärenergiequellen (PENRT) und zu 16 % aus erneuerbaren Quellen (PERT) gedeckt. Die Abbildung 4.18 (siehe Seite 143) zeigt in einer Heatmap die Häufigkeit der Werte im Vergleich zwischen spezifischer und absoluter PET auf. Je dunkler die eingefärbte Fläche ist, umso mehr Werte treten in diesem Bereich auf, relativ gesehen zu den anderen Bereichen. Aus dieser Abbildung lassen sich die bereits genannten Durchschnittswerte der Primärenergiebedarfe ablesen. Zudem ist eine breite Streuung sowohl der absoluten als auch der spezifischen Werte zu erkennen.

Eine statistische Untersuchung zeigt, dass eine lineare Korrelation zwischen PET und GWP der Nutzungsphase (Korrelationskoeffizient  $R = 0,99$  und Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,98$ ) besteht. Daraus lässt sich ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den beiden Werten ermitteln, der darauf hindeutet, dass die entstandenen Emissionen auf die Energieumwandlung (z. B. Verbrennung von Gas zur Stromproduktion) zurückzuführen sind. Die für die Emissionen anfallenden Kosten beziehen sich auf das Ausgangsjahr 2020 und beinhalten somit keine Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze.



**Abbildung 4.18.:** Heatmap zwischen absoluter und spezifischer PET im Status quo (eigene Abbildung)

Basierend auf den Energiebedarfs- und Heizlastergebnissen ergibt die Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für den Status quo im Fallbeispiel des Stadtquartiers Moosach die in der Tabelle 4.24 aufgeführte absolute und durchschnittliche gebäudebezogene Dimensionierung.

**Tabelle 4.24.:** Dimensionierung der betrachteten TGA Komponenten für den Status quo (SQ) - Stadtquartier Moosach

TGA-Komponente	Absolut	Ø Gebäude
Öl-Kessel - Heizen [kW]	2.714	13
Gas-Kessel - Heizen [kW]	10.858	52
Öl-Kessel - TWW [kW]	168	0,6
Gas-Kessel - TWW [kW]	672	2,6
Elektrische Durchlauferhitzer - TWW [kW]	823	2,9
Heizungsleitungen [m]	67.153	313
Trinkwarmwasserleitungen [m]	21.534	98
Radiatoren [kg]	459.579	2.249
Warmwasserspeicher [l]	124.733	593
Rohrleitungsdämmung [kg]	19.001	86
Öl-Tank [l]	636.456	3.076

Weiterführend ist das Ziel, den gesamten Wohngebäudebestand auf einen ambitionierten baukonstruktiven und energiesystemseitigen Standard zu sanieren. Wie im Kapitel zuvor erwähnt, wird der energetische Standard der Baukonstruktion durch die U-Werte abgebildet. Der energiesystemseitige Standard wird durch die vorgenommenen Definitionen bezüglich der prozentualen Verteilungen der jeweils betrachteten Wärmeerzeuger bestimmt. Zunächst werden die Ergebnisse für die im vorherigen Kapitel getroffenen Definitionen für Szenario 1 (Wasser-Wasser-Wärmepumpen mit Solarthermie und Fußbodenheizung) betrachtet. Da ein Entwicklungsprozess auf Stadtquartiersebene über mehrere Jahre vonstattengeht, wird zunächst eine Sanierungsreihenfolge für alle betrachteten Wohngebäude über den definierten Sanierungszeitraum von zehn Jahren erstellt. Wie in Kapitel 3.8.2 bereits beschrieben und in Abbildung 3.6 auf Seite 89 aufgezeigt, geschieht dies in urbi+ automatisiert in Bezug auf einen vordefinierten Entscheidungsraum. In diesem Fallbeispiel ergibt sich die Sanierungsreihenfolge aus dem dreidimensionalen Entscheidungsraum zwischen dem Baujahr, der absoluten und der spezifischen PET der Gebäude im Status quo. Dabei werden die Dimensionen (Baujahr, absolute und spezifische PET) des Entscheidungsraums jeweils gleich gewichtet. Hieraus ergeben sich in diesem Fallbeispiel 20 Gebäude, die in den ersten neun Jahren jährlich saniert werden. Im letzten Jahr des Sanierungszeitraums werden folglich 16 Gebäude saniert.

Daraus ergibt sich über den Entwicklungszeitraum eine durchschnittliche Sanierungsquote von rund 10 %. Die jährliche Sanierungsquote errechnet sich hierbei aus der Anzahl der pro Jahr sanierten Gebäudefassadenfläche, geteilt durch die Gesamtfassadenfläche aller betrachteten Gebäude. Die Sanierungsreihenfolge kann als eine Liste mit Gebäude-IDs exportiert und grafisch dargestellt werden (siehe Abbildung 4.19 auf Seite 145). Dabei ist die Sanierungsreihenfolge farblich nach dem Ampelsystem eingefärbt. Rot eingefärbte Gebäude werden zuerst und grün eingefärbte Gebäude zuletzt saniert.



**Abbildung 4.19.:** Sanierungsreihenfolge eines ausgewählten Bereiches in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (Quellen: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109])

### Berechnungsergebnisse Szenario 1 Stadtquartiersebene

Werden alle Wohngebäude über zehn Jahre hinweg saniert, dann ergeben sich die in Tabelle 4.25 aufgezeigten Werte für die Nutzungsphase. In der rechten Spalte der Tabelle wird jeweils die prozentuale Veränderung zum Status quo (vgl. Tabelle 4.23 auf Seite 142) angegeben ( $\Delta$  SQ). Bei den Kostenwerten für Szenario 1 werden Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze für das erste Jahr, nachdem alle Gebäude saniert wurden (Jahr 2031), angenommen.

**Tabelle 4.25.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 1, inkl. einem Vergleich zum Status quo (SQ) - Stadtquartier Moosach

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	Δ SQ
Heizlast [kW]	3.747	19	0,03	- 73 %
Endenergiebedarf [kWh/a]	904.867	4.502	6,7	- 97 %
PET [kWh/a]	1.039.185	5.170	7,7	- 97 %
PENRT [kWh/a]	284.945	1.418	2,1	- 99 %
PERT [kWh/a]	754.240	3.752	5,6	- 86 %
Energiekosten [€/a]	184.312	917	1,3	- 90 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	306.872	1.527	2,3	- 96 %
GWP-Kosten [€/a]	10.768	11	0,08	- 94 %

Es ist über alle Indikatoren (Heizlast, Energiebedarfe, Emissionen und Kosten) hinweg, durch die Sanierungen in Szenario 1, eine deutliche Reduktion zu erkennen. Die höchste Reduktion wird für den Indikator PENRT und die geringste Reduktion für den Indikator Heizlast erzielt. Zudem ist zu erkennen,

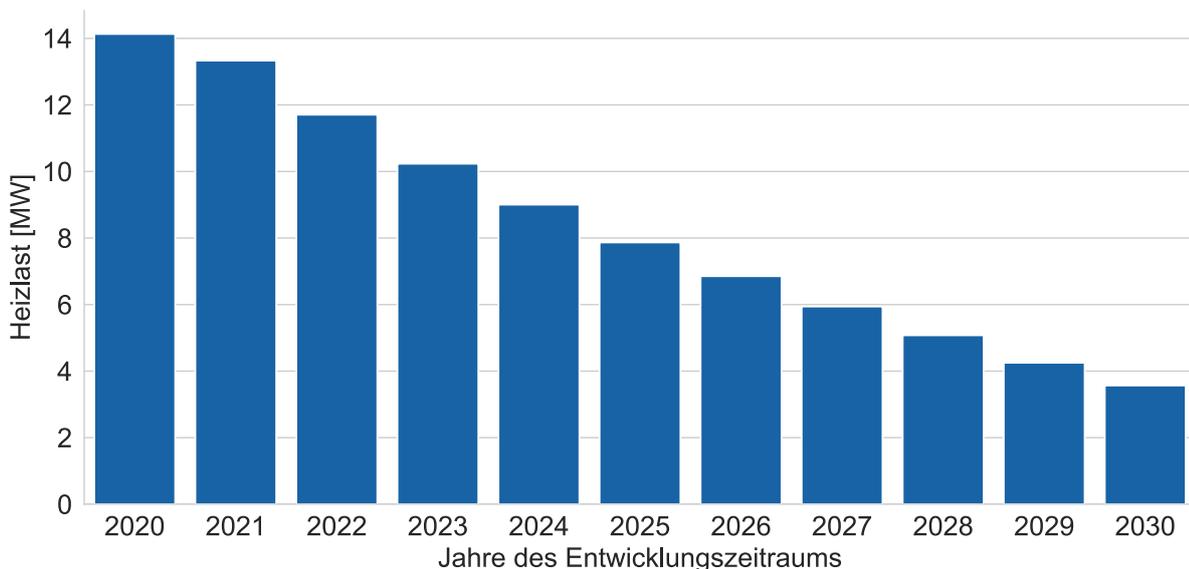
dass sich der Anteil von PENRT an PET von 84 % im Status quo auf 27 % in Szenario 1 verringert hat. Die Tabelle 4.26 listet wiederum die Aufwendungen an Grauer Energie, Grauen Emissionen und Grauen Kosten auf, die erbracht werden müssen, um die in Tabelle 4.25 (siehe Seite 145) aufgeführte Einsparung zu realisieren. Die Werte beziehen sich hierbei auf die Dauer des Entwicklungsszenarios. Da keine der betrachteten TGA-Komponenten eine Nutzungsdauer von unter zehn Jahren aufweist, fallen im Entwicklungszeitraum für die Austauschphase bei keinem Indikator Werte an, die in den in Tabelle 4.26 aufgeführten Werten verrechnet sind. Erst wenn weiterführend die Betrachtung den gesamten Lebenszyklus der Gebäude miteinbezieht, fallen Werte für die Austauschphase an.

**Tabelle 4.26.:** Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten zur Sanierung für das Szenario 1 - Stadtquartier Moosach

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>
PET [kWh]	2.850.805	12.840	18
PENRT [kWh]	2.268.886	11.288	16
PERT [kWh]	311.919	1.552	2,2
Komponentenkosten [€]	19.587.279	97.449	140
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	578.444	2.878	4,1
GWP-Kosten [€]	17.211	96	0,14

## Ergebnisse Heizlast

In Abbildung 4.20 ist der Verlauf der absoluten Reduktion der Heizlast über den Entwicklungs- bzw. Sanierungszeitraum mit einer durchschnittlichen Reduktion von 12 % pro Jahr deutlich zu erkennen.



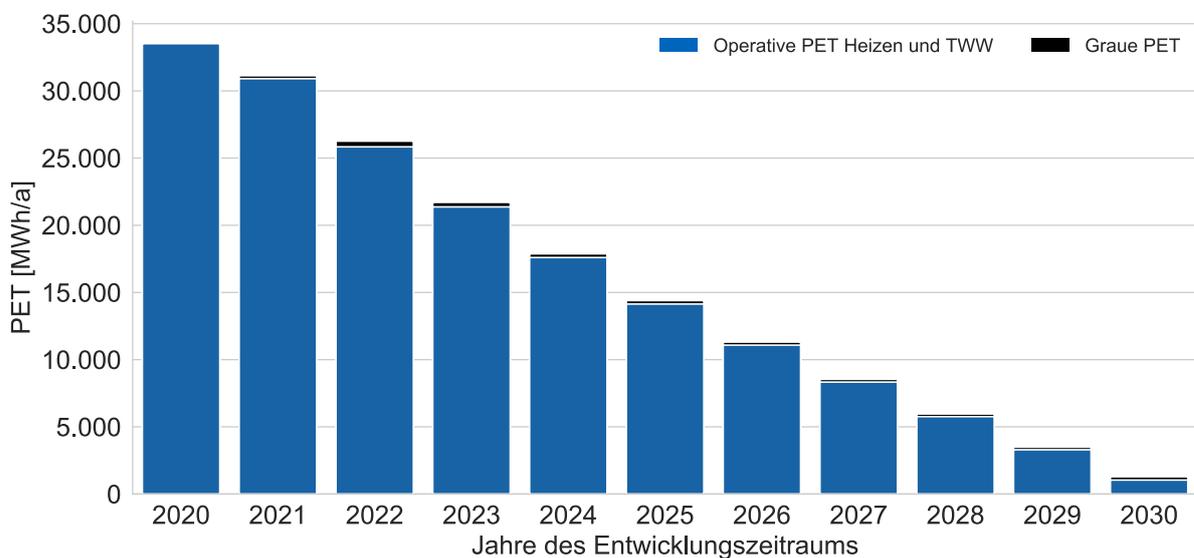
**Abbildung 4.20.:** Reduktion der Heizlast über den Entwicklungszeitraum in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Das Jahr 2020 bildet dabei den Startzeitpunkt (Status quo), in dem jedoch noch keine Sanierungen vorgenommen werden. In den Jahren 2021 bis 2029 werden jährlich 20 Gebäude und im Jahr 2030 werden die letzten 16 Gebäude saniert. Der in Abbildung 4.20 (siehe Seite 146) aufgezeigte jährliche Wert bildet den Stand am Ende des jeweiligen Jahres ab, also nach der Sanierung der für das entsprechende Jahr vorgesehenen Gebäude.

Die gleichen Verläufe wie für die Heizlast lassen sich für die Operative PET (PENRT und PERT), das Operative GWP, die Operativen GWP-Kosten und die Energiekosten aufstellen. Im Gegensatz zur Heizlast werden hierbei jedoch zusätzlich der jeweilige lebenszyklusbasierte Graue Anteil, also die Graue Energie, Grauen Emissionen oder Grauen Kosten mitberücksichtigt. Zum Beispiel wird in Bezug auf die PET nicht nur diejenige im Gebäudebetrieb berücksichtigt, sondern auch die PET für den Ausbau und die Entsorgung der im Status quo verbauten Komponenten wie auch die Herstellung der neuen Komponenten in Szenario 1. Falls eine Komponente über den Entwicklungszeitraum hinweg bereits die Lebensdauer überschreiten würde, würde deren Austausch und Ersatz im Rahmen des Entwicklungszeitraums mitbilanziert.

### Ergebnisse Primärenergiebedarf

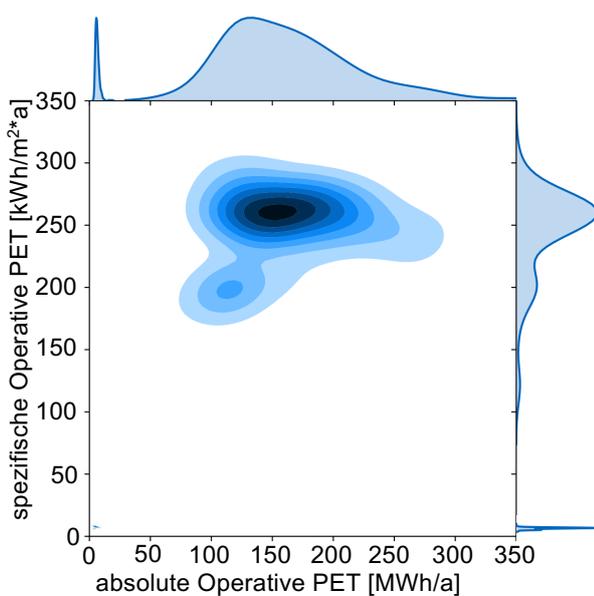
Um direkt beim Beispiel der PET zu bleiben, wird in der nachfolgenden Abbildung 4.21 die Reduktion der PET inklusive des Einsatzes an Grauer PET über den Entwicklungszeitraum hinweg aufgezeigt.



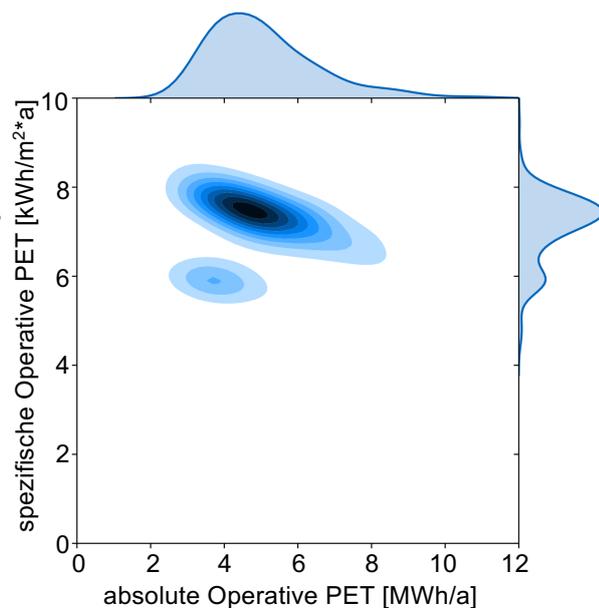
**Abbildung 4.21.:** Reduktion der PET für das Heizen und das TWW in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Im Gesamten wird dabei über den Entwicklungszeitraum in der Nutzungsphase (B6) eine Reduktion von rund 32.477 MWh PET (86 % aus nicht-erneuerbaren Primärenergiequellen) bei einem Einsatz von 2.581 MWh in Form von Grauer Energie (88 % aus nicht-erneuerbaren Primärenergiequellen)

erreicht. Die Reduktion besteht aus der Summe der jährlichen Einsparungen im Vergleich zum Status quo über zehn Jahre Entwicklungszeitraum hinweg. Insgesamt reduziert sich die jährliche PET der Nutzungsphase um 97 %. Dabei beträgt der Anteil an der PET für die Nutzungsphase, der aus nicht-erneuerbaren Primärenergiequellen gedeckt wird, noch 27 %. Das ergibt sich daraus, dass der in Szenario 1 definierte Heizwärmebedarf anhand von Wärmepumpen (Umweltwärme und Strom als Energiequelle) gedeckt wird. Die Umweltwärme, an der die Wärmepumpe sich bedient, wird als erneuerbare Energie deklariert und hat somit einen Primärenergiefaktor von 0,0. Zudem soll laut Umweltbundesamt [188] der Anteil an erneuerbarer Energie im deutschen Strom-Mix bis zum Jahr 2030 von 30 % auf 70 % steigen. Hinzu kommt, dass 60 % des Heizwärmebedarfs für TWW durch Solarthermieanlagen gedeckt werden. Der Primärenergiefaktor für Sonnenenergie wird ebenfalls mit 0,0 angenommen. Die Verteilung der absoluten und der spezifischen PET, im Vergleich zwischen den Werten des Status quo und von Szenario 1, wird in der Heatmap der Abbildung 4.22 aufgeführt. Die Werte für Szenario 1 sind in dieser Heatmap nur als Punkte nahe dem Schnittpunkt von x- und y-Achse zu erkennen. Das liegt an der deutlichen Reduktion der Energiebedarfe und der Streuung dieser Werte nach Sanierung. Bei der Heatmap der Abbildung 4.23 sind die Werte für Szenario 1 nochmals mit angepassten Maximalwerten der Achsen aufgeführt.



**Abbildung 4.22.:** Heatmap PET Status quo zu Szenario 1 (eigene Abbildung)

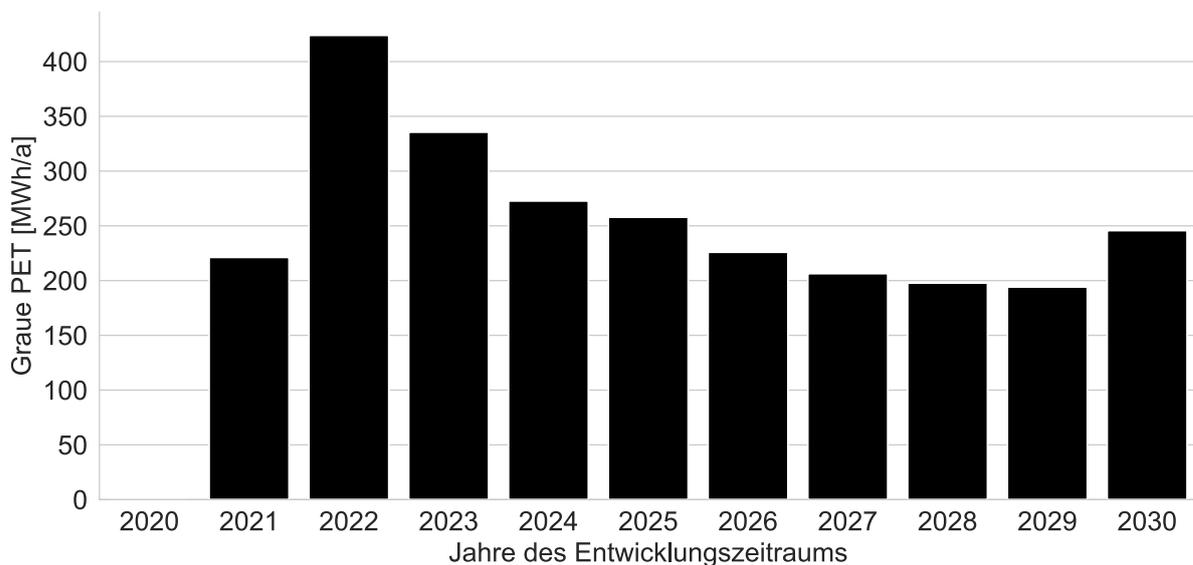


**Abbildung 4.23.:** Heatmap PET des Szenario 1 (eigene Abbildung)

In Bezug auf die PET im betrachteten Entwicklungszeitraum lässt sich somit festhalten, dass sich, energetisch betrachtet, eine Sanierung der betrachteten TGA-Komponenten bereits im ersten Jahr amortisiert. Das liegt daran, dass die Aufwendungen an Grauer Energie für die Entsorgung der TGA-Komponenten des Status quo und die Herstellung der neuen Komponenten einen geringeren Wert aufweisen als die erzielte Reduktion des Energiebedarfs in der Nutzungsphase. Die Reduktion in der Nutzungsphase ist im Mittel über die zehn Jahre des gesamten Entwicklungszeitraums hinweg um das 12,5-fache höher als die Aufwendung an Grauer Energie. Jedoch muss hier darauf hingewiesen werden, dass die für die Sanierung der baukonstruktiven Elemente anfallende Graue

Energie und die damit in Verbindung stehenden Emissionen und Kosten außerhalb des definierten Betrachtungsrahmens dieser Arbeit fallen. Vorausblickend lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass die Thematik der Lebenszyklusanalyse der baukonstruktiven Elemente großer Gebäudebestände in einer parallel am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München laufenden Dissertation erarbeitet und in der im Rahmen des Forschungsprojekts „Grüne Stadt der Zukunft“ laufenden Forschungsarbeit [34] in urbi+ integriert wird.

In Abbildung 4.21 auf Seite 147 ist zu erkennen, dass der Anteil an Grauer Energie nur einen geringen Anteil von durchschnittlich 4 % pro Jahr einnimmt. Das ist der Fall, da sich die PET der unsanierten Gebäude in der Nutzungsphase im Durchschnitt auf 167 MWh/a je Gebäude beläuft. Mit steigendem Anteil an sanierten Gebäuden und somit sinkender PET in der Nutzungsphase erhöht sich der prozentuale Anteil an Grauer Energie am jährlichen Gesamtenergiebedarf auf bis zu 22 % im Jahr 2030. Die Betrachtung der Grauen PET (siehe Abbildung 4.24), die über den Entwicklungszeitraum aufzuwenden ist, zeigt keinen gleichförmigen Verlauf wie bei der Operativen PET (siehe Abbildung 4.21 auf Seite 147) auf.



**Abbildung 4.24.:** Einsatz an Grauer PET in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Die Gebäudespezifika zeigen, dass die im Jahr 2021 zu sanierenden Gebäude ein durchschnittliches Baujahr von 1957 aufweisen, wobei das durchschnittliche Baujahr der im Jahr 2022 zu sanierenden Gebäude auf 1966 steigt. Das spricht zunächst gegen den in Abbildung 4.24 vorgestellten Verlauf. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Wohnfläche und das Gebäudevolumen der im Jahr 2021 zu sanierenden Gebäude mit 12.345 m<sup>2</sup> und 29.314 m<sup>3</sup> um 48 % bzw. 62 % geringere Werte aufweisen als die im Jahr 2022 zu sanierenden Gebäude. Die zu beheizende Fläche und das zu beheizende Volumen der im Jahr 2021 zu sanierenden Gebäude, ist somit geringer. Dies führt zu einer um 49 % geringeren Heizlast und zu einer um 49 % geringeren absoluten PET der im Jahr 2021 zu sanierenden Gebäude. Das wiederum bedeutet, dass im Vergleich der Gebäude es insgesamt ebenfalls zu einer geringeren Dimensionierung der Wärmeerzeuger und zu einem geringeren Wert

von Grauer PET im Jahr 2021 kommt. Die gleiche Erklärung kommt beim Vergleich der Jahre 2029 und 2030 zum Tragen.

### Ergebnisse Kosten (TGA-Komponenten und Energiebedarf Heizen und TWW)

Bezugnehmend auf die in Szenario 1 anfallenden Kosten (jahresbezogener Netto-Barwert in Abbildung 4.25) ergibt sich ein deutlich anderer Verlauf als bei der PET. Im Mittel nehmen die Grauen Kosten für die Entsorgung der im Status quo verbauten Komponenten sowie die Anschaffung und den Einbau der im Szenario 1 neuen TGA-Komponenten einen Anteil von 74 % ein. Durch die Sanierung aller betrachteten Wohngebäude wird eine Einsparung von 90 % im Vergleich zum Status quo erzielt. Jedoch werden dabei rund 19,6 Mio. € in die Sanierung der TGA-Komponenten investiert. Eine Amortisation der Kosten der Sanierung wird sich also erst nach weiteren rund 12 1/4 Jahren ergeben (Wartung und Austausch der Komponenten nicht miteinberechnet). Der Verlauf der Grauen Kosten über das Entwicklungsszenario lässt sich ebenfalls mit den im vorherigen Absatz für Abbildung 4.24 auf Seite 149 angeführten Erklärungen beschreiben.

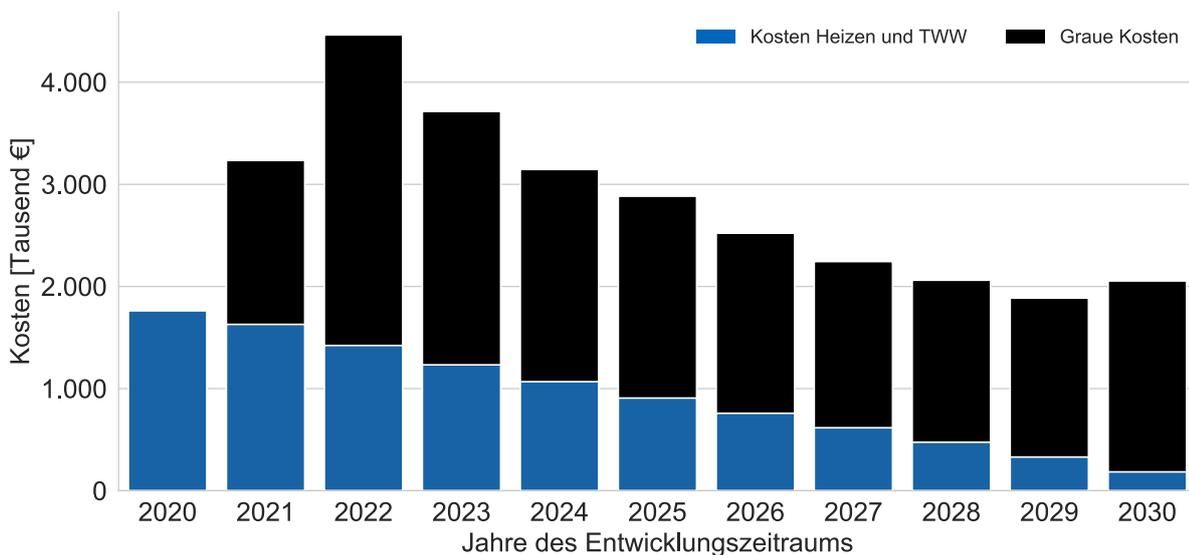
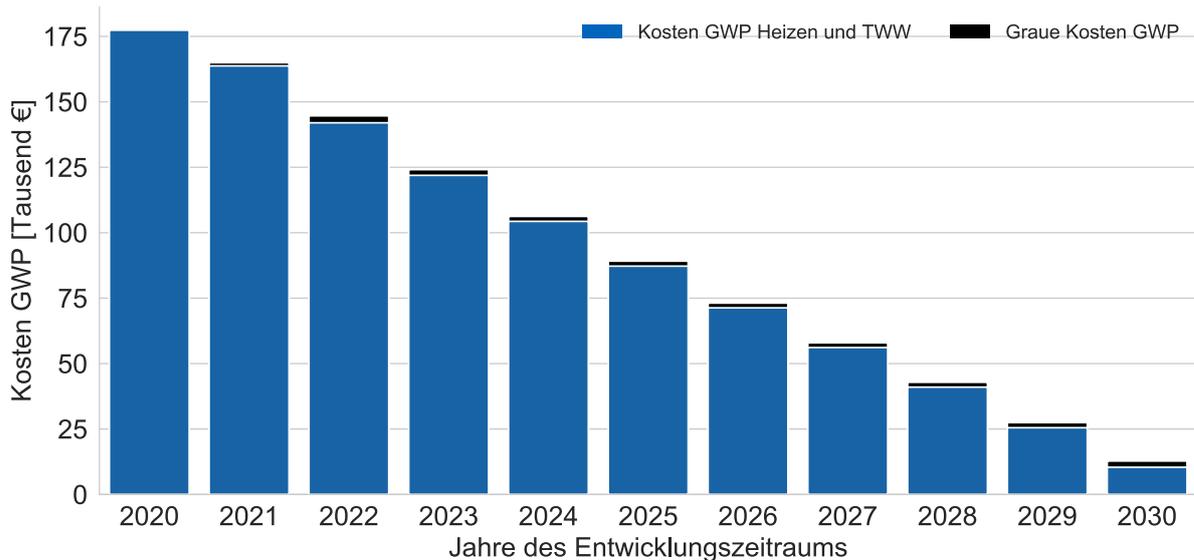


Abbildung 4.25.: Kostenwerte in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

### Ergebnisse GWP und GWP-Kosten

Ein statistischer Vergleich der Ergebniswerte der Grauen PET und Grauen Emissionen bzw. GWP zeigt, dass auch hier, gleich wie bei der Nutzungsphase, ein Zusammenhang bzw. eine Korrelation (Korrelationskoeffizient  $R = 0,99$  und Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,99$ ) zwischen den beiden Indikatorwerten besteht. Aus diesem Grund gibt die Reduktion des GWP der Nutzungsphase und des Grauen GWP-Einsatzes über den Entwicklungszeitraum das gleiche Bild ab wie die in Abbildung 4.21 (siehe Seite 147) und 4.24 (siehe Seite 149) aufgeführte Reduktion und der gezeigte Einsatz der Grauen PET. Lediglich die Einheit ändert sich von [kWh/a] auf [kg CO<sub>2</sub>-Äq./a].

Durch die im Entwicklungsszenario durchgeführten Sanierungen können rund 96 % des GWP in der Nutzungsphase der Gebäude eingespart werden, bei einer Aufwendung von 734 t CO<sub>2</sub>-Äq. an Grauem GWP. Nach Sanierung aller Gebäude entspricht das einer jährlichen Einsparung von 6.800 t CO<sub>2</sub>-Äq. Die absolute Menge an GWP ist unmittelbar verknüpft mit den hierfür ab 2021 entstehenden Kosten. Bei der GWP-Kostenberechnung werden Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze berücksichtigt. Daraus folgt der über den Entwicklungszeitraum in Abbildung 4.26 aufgezeigte emissionsbezogene Kostenverlauf.

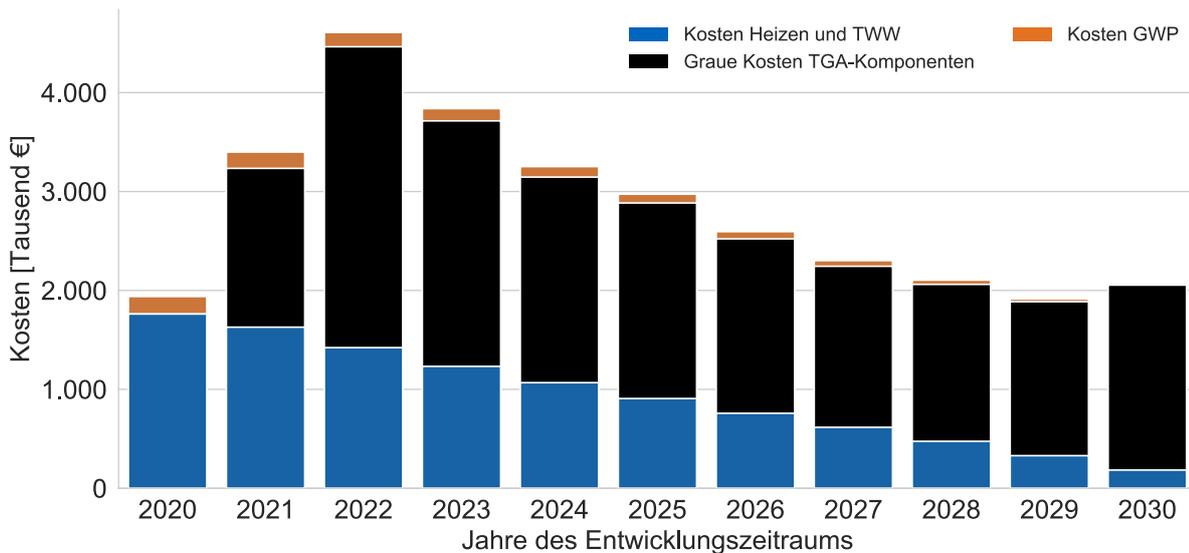


**Abbildung 4.26.:** Verlauf der GWP-Kosten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Durch das Miteinbeziehen der Preissteigerung und Kalkulationszinssätze ergibt sich zwar kein veränderter Verlauf der Einsparung über das Entwicklungsszenario im Vergleich zur Operativen PET oder dem Operativen GWP; jedoch verringert sich die Kosteneinsparung sowohl bei den Kosten für das Operative GWP aus der Nutzungsphase als auch beim Grauen GWP um 29 %. In Summe reduzieren die sich jährlich entstehenden GWP-Kosten aus der Nutzungsphase um 94 %. Dabei ergeben sich über den Entwicklungszeitraum insgesamt 19.621 € (0,14 €/m<sup>2</sup>) an Emissionskosten in Bezug auf das Graue GWP.

### Ergebnisse Gesamtkosten

Werden nun alle im Entwicklungsszenario anfallenden Kostenwerte zusammengeführt, dann stellt sich der in Abbildung 4.27 auf Seite 152 aufgezeigte Verlauf dar. Dabei nehmen die Grauen Kosten der TGA-Komponenten, mit im Durchschnitt 66 % über das Entwicklungsszenario, den höchsten Anteil ein, gefolgt von den Operativen Kosten für Heizen und TWW mit 31 % und den GWP-Kosten mit 3 %. Ab dem Jahr 2031 fallen dann jährlich rund 197.094 € (∅ 1.006 €/a je Gebäude) für Heizen und TWW sowie für die dabei verursachten Emissionen an. Die Emissionskosten belaufen sich im Jahr 2031 auf rund 6 % der Gesamtkosten.



**Abbildung 4.27.:** Zusammenführung aller Kostenwerte in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

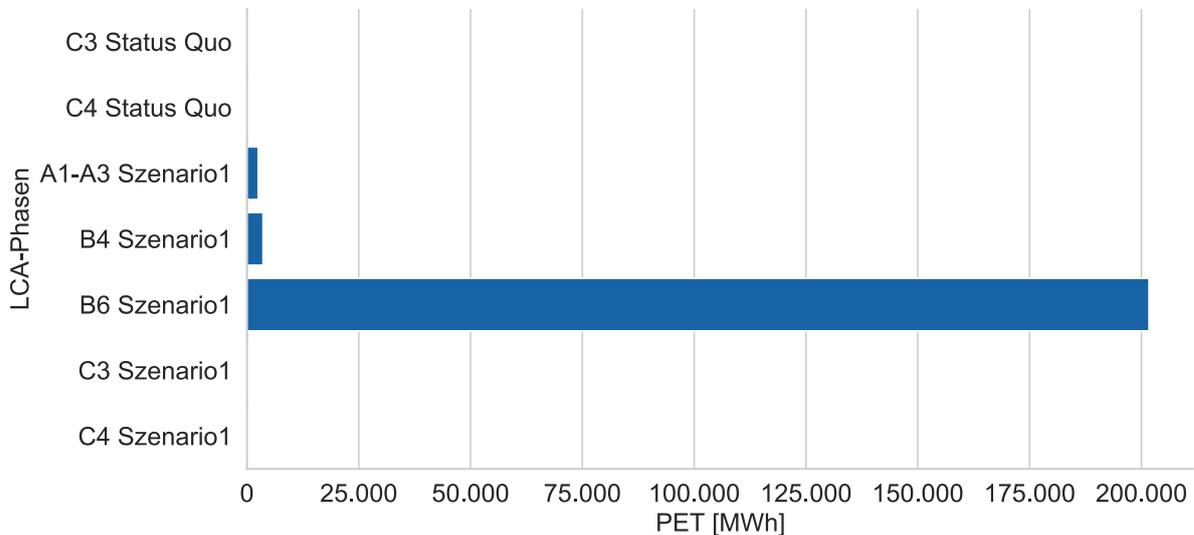
Daraus lässt sich schlussfolgern, dass im Durchschnitt rund 86 % der Primärenergie und Emissionen und 80 % der Kosten für die Bereitstellung von Heizwärme für die Raumheizung und TWW auf die Nutzungsphase entfallen. Eine weitere Erkenntnis ist, dass der Anteil an Grauer Energie, Grauen Emissionen und Grauen Kosten steigt, je stärker der Operative Anteil der Indikatoren in der Nutzungsphase sinkt. Das bedeutet, dass bei Gebäuden, die einen niedrigen Energiebedarf in der Nutzungsphase aufweisen (Niedrigstenergiegebäude oder Passivhäuser etc.), die Graue Energie, Grauen Emissionen und Grauen Kosten stärker ins Gewicht fallen. Dabei können diese den Wert der Nutzungsphase sogar übersteigen. Bei den Kosten ist das im aufgezeigten Entwicklungszeitraum bereits annähernd der Fall.

Weiterführend wird der Betrachtungshorizont über den Entwicklungszeitraum hinaus erweitert und die Ergebnisse sowohl in Bezug auf die LCA- und LCC-Phasen als auch in Bezug auf die betrachteten TGA-Komponenten dargestellt. Damit werden alle nach der Sanierung der Gebäude anfallenden Energiebedarfe, Emissionen und Kosten über deren Lebenszyklus von 50 Jahren mitbilanziert.

### Ergebnisse bezogen auf LCA- und LCC-Phasen

Dass die Grauen Werte die Werte der Nutzungsphase übersteigen, kann dann eintreten, wenn die Perspektive über das Entwicklungsjahr 2030 hinweg erweitert wird und die über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude von 50 Jahren anfallende PET und die damit verbundenen Emissionen und Kosten betrachtet werden. Über den Zeitraum von 50 Jahren muss zusätzlich der Austausch und Ersatz von TGA-Komponenten berücksichtigt werden, der über den gesamten Lebenszyklus ins Gewicht fallen kann (siehe LCA-Ergebnisse der Einzelgebäudebetrachtung). Zudem weisen ab Ende des Jahres 2030 alle betrachteten Gebäude eine geringe PET und somit geringe Emissions- und Kostenwerte in der Nutzungsphase auf.

In Bezug auf die PET zeigt Abbildung 4.28, dass trotz einer ambitionierten energetischen Sanierung der Gebäude und einer damit einhergehenden Reduktion, der PET in der Nutzungsphase mit 98 % immer noch den größten Anteil über den gesamten Lebenszyklus (50 Jahre) einnimmt.



**Abbildung 4.28.:** Verteilung der PET über die LCA-Phasen in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Auf die LCA-Phase Austausch und Ersatz (B4) entfällt ein geringer Wert von rund 1 %, was bei diesem Vergleich zu vernachlässigen ist. Das gilt auch für alle anderen LCA-Phasen. Dabei ist zu bedenken, dass der Energiebedarf in den zehn Jahren des Entwicklungszeitraums rund 86 % des Gesamtenergiebedarfs der Nutzungsphase über die gesamten 50 Jahre ausmacht. Dabei stammen rund 64 % der Primärenergie aus nicht-erneuerbaren und 36 % aus erneuerbaren Quellen. Würde nach diesen 50 Jahren ein weiterer Entwicklungszeitraum folgen, dann würde die Verteilung der PET deutlich stärker als in der Nutzungsphase (79 %) in Richtung der LCA-Phasen Herstellung (7 %) sowie Austausch und Ersatz (13 %) tendieren. Dabei sind die prozentualen Anteile von Herstellung, Austausch und Ersatz nicht zu vernachlässigen. Es muss vor allem darauf hingewiesen werden, dass sich diese Werte rein auf die betrachteten TGA-Komponenten (inklusive Faktor zur Berücksichtigung weiterer TGA-Komponenten) beziehen und die baukonstruktiven Elemente, die erfahrungsgemäß nochmals höhere Werte aufweisen, noch nicht in die Bilanz miteinbezogen sind. Mit dem nur im Entwicklungszeitraum anfallenden PET könnten die Gebäude im sanierten Zustand rund 166 Jahre mit Energie für Raumheizung und TWW versorgt werden. Dabei fließt in die Betrachtung die PET des Status quo der Gebäude bis zum Zeitpunkt der Sanierung innerhalb des Entwicklungsszenarios mit ein. Nach der Sanierung eines Gebäudes wird noch ein Zeitraum von 50 Jahren durchschnittlicher Lebensdauer mitbilanziert, in dem TGA-Komponenten, die das Ende der Lebensdauer erreicht haben, ausgetauscht werden.

Mit Blick auf den Indikator GWP ergibt sich aufgrund der Korrelation der Indikatorwerte PET und GWP für das GWP eine gleiche Verteilung über die LCA-Phasen. Dabei nimmt die Nutzungsphase

einen Anteil von 96 %, der Austausch und Ersatz einen Anteil von 2 %, die Herstellung einen Anteil von 1 % und die Entsorgung gerundet ebenfalls 1 % ein. Rund 79 % stammen aus den ersten zehn Jahren des Entwicklungszeitraums. In Summe ergeben sich über die Gesamtlebensdauer der betrachteten Gebäude von 50 Jahren, inklusive des Entwicklungsszenarios in den ersten zehn Jahren, die in Tabelle 4.27 aufgelisteten Werte für die PET und das GWP.

**Tabelle 4.27.:** Summe des Primärenergiebedarfs und des GWPs, nach LCA-Phasen über 50 Jahre Nutzungszeitraum aller Gebäude - Stadtquartier Moosach

LCA-Phase	PET [MWh]	GWP [t CO <sub>2</sub> -Äq.]
Entsorgung Status quo (C3 und C4)	60	142
Herstellung Szenario1 (A1-A3)	2.510	436
Austausch und Ersatz Szenario 1 (B4)	4.972	1.166
Nutzung Status quo / Szenario 1 (B6)	201.683	45.069
Entsorgung Szenario 1 (C3 und C4)	21	145
<b>Summe</b>	<b>255.101</b>	<b>46.958</b>

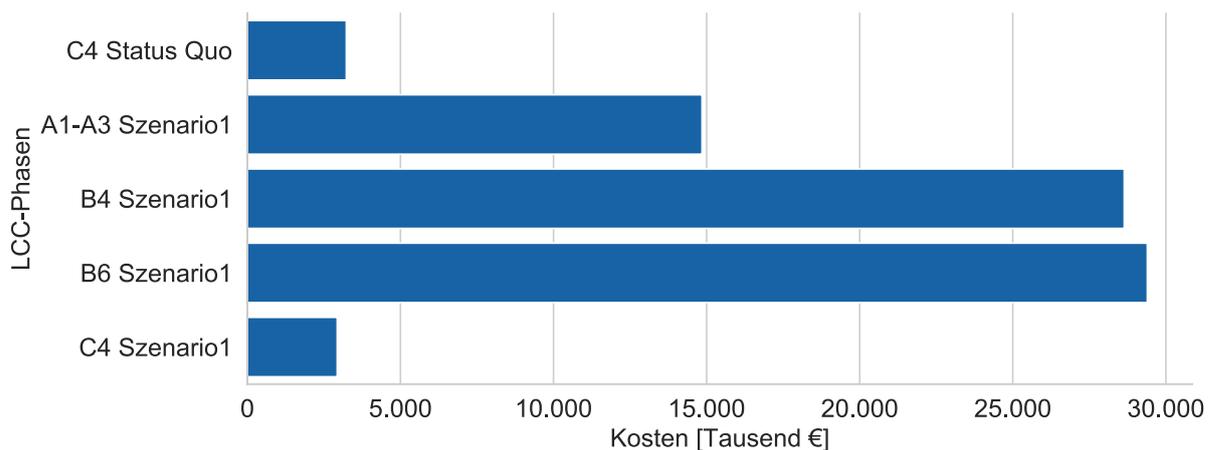
Für die GWP-Kosten sowie die Komponenten- und Energiekosten ergibt sich eine andere Aufstellung wie für die zuvor betrachteten Indikatoren, da bei den Kostenwerten beachtet werden muss, dass über den Jahresverlauf Preissteigerungen bzw. Kalkulationszinssätze berücksichtigt werden (siehe Tabelle 4.28). Bei den GWP-Kosten entfallen rund 96 % der Kosten auf die Nutzungsphase, 2 % auf den Austausch und Ersatz und jeweils 1 % auf die Herstellungsphase und die Summe aus den Entsorgungsphasen.

**Tabelle 4.28.:** Summe der GWP-Kosten sowie Komponenten- und Energiekosten, nach LCC-Phasen über 50 Jahre Nutzungszeitraum aller Gebäude - Stadtquartier Moosach

LCC-Phase	GWP-Kosten [€]	Kosten [€]
Entsorgung Status quo (C3 und C4)	4.094	3.231.378
Herstellung Szenario1 (A1-A3)	12.571	14.848.878
Austausch und Ersatz Szenario 1 (B4)	34.531	28.638.732
Nutzung Status quo / Szenario 1 (B6)	2.072.565	29.392.275
Entsorgung Szenario 1 (C3 und C4)	24.339	2.933.742
<b>Summe</b>	<b>2.148.100</b>	<b>73.837.962</b>

Bei den GWP-Kosten aus der Nutzungsphase stammen rund 47 % aus den ersten zehn Jahren des Entwicklungszeitraums. Das liegt daran, dass die Preissteigerung und der Kalkulationszinssatz zu einer deutlichen jährlichen Steigerung der Kosten in der Nutzungsphase über 50 Jahre führen. Das kommt auch bei der Summe aus den Entsorgungsphasen am Ende der Lebensdauer der Gebäude zum Tragen, auch wenn daraus nur rund 1 % der Gesamtkosten entstehen.

Verglichen mit den vorherigen Indikatoren zeigt sich eine deutlich veränderte Aufteilung der Gesamtkosten. Es ergeben sich rund 37 % der Kosten aus der Nutzungsphase, 19 % aus der Herstellung und 37 % aus dem Austausch und Ersatz der TGA-Komponenten von Szenario 1, also Graue Kosten (siehe Abbildung 4.29). Jeweils rund 4 % der Kosten beziehen sich am Ende der Lebensdauer der Gebäude auf den Ausbau und die Entsorgung der TGA-Komponenten des Status quo und von Szenario 1. Aus der bereits diskutierten Abbildung 4.27 auf Seite 152 wird ersichtlich, dass die Grauen TGA-Kosten rund 2,5 % unter den Kosten der Nutzungsphase liegen. Das ist auch dann der Fall, wenn der Energiebedarf in der Nutzungsphase, z. B. in Jahr 2021, noch hohe Werte einnimmt. Dabei beanspruchen die Energiekosten über die zehn Jahre des Entwicklungszeitraums rund 13 % der Gesamtkosten. Im Vergleich zu allen anderen Indikatoren liegt dieser Wert niedriger und spiegelt den höheren Grauen Anteil in der Nutzungsphase wider.



**Abbildung 4.29.:** Verteilung der Kosten über die LCC-Phasen in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

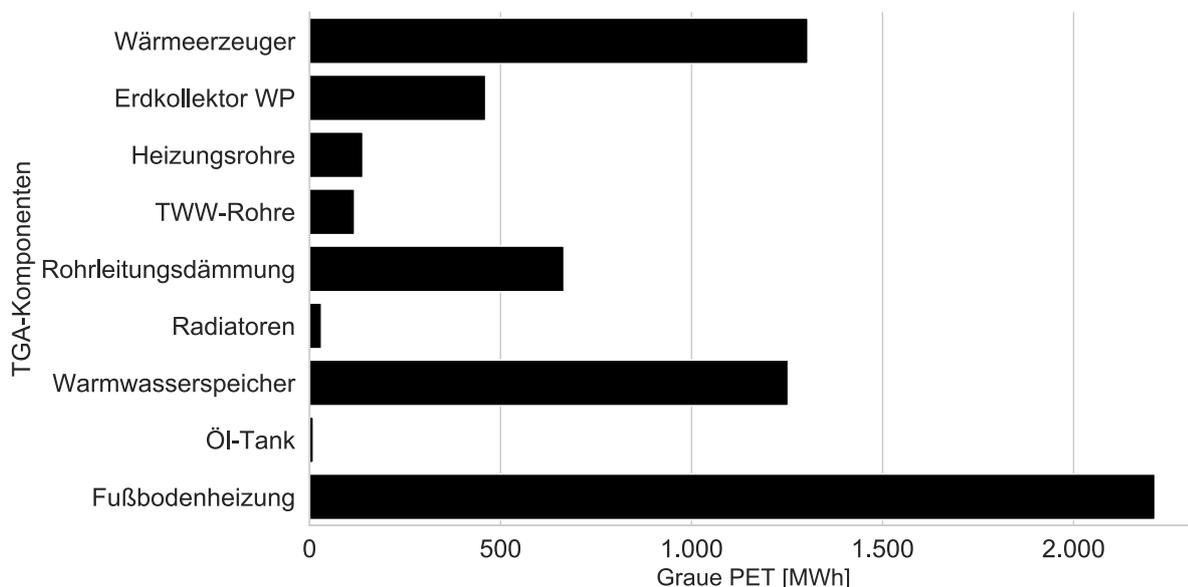
### Ergebnisse bezogen auf TGA-Komponenten

Neben der Verteilung der Gesamtwerte der Indikatoren über die LCA- und LCC-Phasen wird untersucht, welche der betrachteten TGA-Komponenten für den größten Anteil an der Grauen Summe der Primärenergie (PET), Grauen Emissionen und Kosten verantwortlich ist. Hierfür werden für die Entsorgungsphasen (C3 und C4) der TGA-Komponenten des Status quo die Dimensionierungen aus Tabelle 4.24 (siehe Seite 143) und für alle weiteren LCA- und LCC-Phasen die Dimensionierungen der TGA-Komponenten von Szenario 1 aus Tabelle 4.29 (siehe Seite 156) betrachtet.

**Tabelle 4.29.:** Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das Szenario 1 (S1) - Stadtquartier Moosach

TGA-Komponente	Absolut	Ø Gebäude
Wasser-Wasser-Wärmepumpe - Heizen und TWW [kW]	1.058	4,6
Solarthermie - TWW [m <sup>2</sup> ]	590	3,0
Warmwasser Heizungsleitungen [m]	15.578	74
TWW Warmwasserleitungen [m]	32.101	140
Fußbodenheizung [kg]	34.034	146
Warmwasserspeicher [l]	129.044	593
Rohrleitungsdämmung [kg]	5.245	23
Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe [kg]	3.490	15

Die spezifische auf die TGA-Komponenten bezogene Auswertung in der Abbildung 4.30 zeigt, dass die Fußbodenheizung mit rund 36 % für den größten Teil des Grauen Primärenergiebedarfs verantwortlich ist. Das ist neben der im Vergleich zu den anderen Komponenten hohen Materialmasse auch auf deren Material- und Produktionsart zurückzuführen (siehe Ökobaudat [59]). Die Ökobaudat-Datensätze lassen in vielen Fällen jedoch keine weitere spezifische Analyse der Daten zu, weswegen die genaue Ursache für den Wert an Grauer Energie bis zu dessen Ursprung nicht gänzlich nachvollzogen werden kann. Den zweithöchsten Wert nehmen, mit rund 21 % am der Grauen PET, die Wärmeerzeuger ein. Davon beansprucht die Solarthermieanlage einen Anteil von 83 %. Den drittgrößten Anteil machen mit 20 % die Puffer- und Trinkwarmwasserspeicher. Dabei entfallen rund 96 % des Speichervolumens, und somit der Grauen PET, auf die Speicherung von TWW.

**Abbildung 4.30.:** Verteilung der Grauen PET über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Den viertgrößten Anteil erzielt mit 10 % die Rohrleitungsdämmung der Heizungs- und Trinkwarmwasserleitungen. Trotz der eher geringen Materialmasse ist das Ergebnis nachvollziehbar, da der Herstellungsprozess des Dämmmaterials laut Ökobaudat-Datensatz, im Vergleich zu allen weiteren betrachteten Datensätzen, eine hohe PET aufweist. Darauf folgen die Erdwärmesonden bzw. das Brunnensystem inklusive der Zuleitungen für die Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit rund 10 %. Durch die stark verminderte Heizlast der Gebäude sinkt ebenfalls die benötigte Leistung der Wärmeerzeuger. So muss die Wasser-Wasser-Wärmepumpe im Schnitt eine Leistung von 5 kW aufbringen können (Wirkungsgrad der Wärmepumpe ist berücksichtigt). Radiatoren und Öl-Tanks kommen im Szenario 1 nicht zum Einsatz, deshalb wird lediglich die Entsorgung der im Status quo verbauten Komponenten berücksichtigt. Diese spielt jedoch in der Gesamtbetrachtung eine untergeordnete Rolle.

Die Graue PET wird in Summe aus 89 % nicht-erneuerbaren und 12 % erneuerbaren Quellen gedeckt. Hier offenbart sich ein nicht zu vernachlässigendes Potenzial zur Steigerung des Einsatzes Erneuerbarer Energien im Produktions- und Entsorgungsprozess der betrachteten TGA-Komponenten.

Weiterführend wird der Umwelt-Indikator GWP näher betrachtet. Statistische Untersuchungen zeigen, dass eine lineare Korrelation zwischen der Grauen Primärenergie und den Grauen Emissionen (Korrelationskoeffizient  $R = 0,99$  und Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,99$ ) besteht. Daraus lässt sich ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den beiden Werten ermitteln, der darauf hindeutet, dass die Emissionen auf die bei der Energieumwandlung (z. B. Verbrennung von Gas zur Stromproduktion) entstandenen Emissionen zurückzuführen sind. Dennoch verschieben sich bei der Verteilung des GWP über die verschiedenen TGA-Komponenten die prozentualen Anteile (siehe Tabelle 4.30).

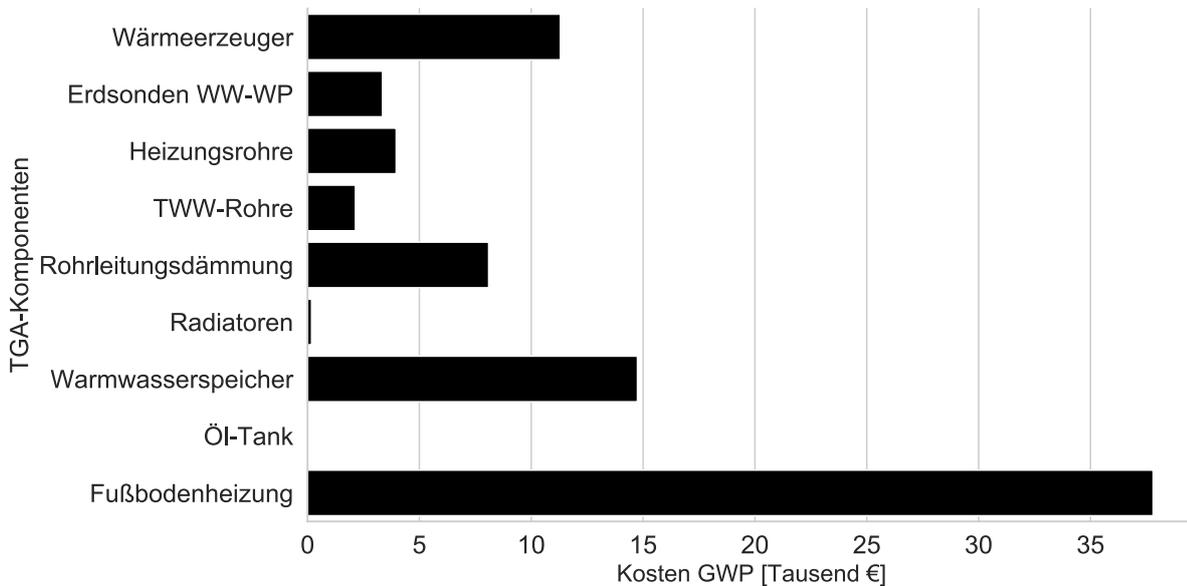
**Tabelle 4.30.:** Prozentuale Verteilung PET, PENRT, PERT und GWP über die betrachteten TGA-Komponenten - Stadtquartier Moosach

TGA-Komponente	PET [%]	PENRT [%]	PERT [%]	GWP [%]
Wärmeerzeuger (inkl. Solarthermie)	21,1	18,7	37,5	20,1
Erdsonden WW-WP	7,4	7,7	5,6	4,7
Heizungsrohre	2,3	2,3	1,8	5,7
Trinkwarmwasserohre	1,9	2,0	1,4	2,0
Rohrisolierung	10,7	10,9	9,9	12,4
Radiatoren	0,5	0,4	1,0	0,4
Warmwasserspeicher	20,2	20,3	19,4	21,7
Öl-Tank	0,1	0,2	0,2	0,0
Fußbodenheizung	35,7	37,5	23,2	33,0

Für das Graue GWP kann, gleich wie bei der PET des Status quo, angemerkt werden, dass sich rund 84 % der Emissionen aus der Energiebereitstellung aus nicht-erneuerbaren Primärenergiequellen und rund 16 % aus erneuerbaren Quellen zusammensetzen. Für die Emissionen nach der Sanierung aller Gebäude verbleiben dann rund 21 % aus nicht-erneuerbaren Primärenergiequellen. Während

des Entwicklungsszenarios weist der jährliche Anteil an Grauen Emissionen im Vergleich zu den Emissionen aus der Nutzungsphase der Gebäude einen ebenfalls nur geringen Anteil von durchschnittlich 4 % auf. Gleich wie bei der PET steigt jedoch auch hier, verglichen mit den Emissionen aus der Nutzungsphase, der Anteil an Grauen Emissionen bis zum Jahr 2030 auf 18 %.

In Bezug auf die Verteilung der Kostenwerte auf die TGA-Komponenten zeigen sich sowohl bei den Grauen GWP-Kosten als auch bei den Grauen Kosten der TGA-Komponenten unterschiedliche Verteilungen (siehe Tabelle 4.31). Bei der Betrachtung der Verteilung der GWP-Kosten wird deutlich, dass sie eine stark unterschiedliche Verteilung im Vergleich zum GWP aufweisen (siehe Abbildung 4.31 für die Verteilung GWP-Kosten). Das liegt daran, dass zum Zeitpunkt des jeweiligen Austauschs der TGA-Komponenten die jahresspezifische Kostensteigerung und der Kalkulationszinssatz angesetzt werden, die bei der Berechnung des GWP nicht anfallen. Da der einmalige Austausch der Fußbodenheizung nach 30 Jahren stattfindet und hierbei bereits der höchste Anteil des GWPs aufkommt, vergrößert sich deren Anteil an GWP-Kosten nochmals von 33,0 % beim GWP auf 46,3 % bei den GWP-Kosten.



**Abbildung 4.31.:** Verteilung der Grauen GWP-Kosten über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

**Tabelle 4.31.:** Prozentuale Verteilung der GWP-Kosten und der Komponentenkosten über die betrachteten TGA-Komponenten - Stadtquartier Moosach

TGA-Komponente	GWP-Kosten [%]	Komponentenkosten [%]
Wärmeerzeuger (inkl. Solar)	13,9	35,7
Erdsonden WW-WP	4,1	10,5
Heizungsrohre	4,9	10,3
Trinkwarmwasserleitungen	2,6	15,0
Rohrisolierung	9,9	2,3
Radiatoren	0,2	1,1
Warmwasserspeicher	18,1	17,9
Öl-Tank	0,0	0,0
Fußbodenheizung	46,3	7,1

Bei den Komponentenkosten fallen die Kosten für Wärmeerzeuger (35,7 %), gefolgt von den Kosten für die Warmwasserspeicher (17,9 %), am höchsten aus (siehe Tabelle 4.31 und Abbildung 4.32). Im Vergleich dazu ist der Wert bei der Fußbodenheizung mit 7,1 % gering. Das liegt hauptsächlich an der höheren technischen Komplexität der Wärmeerzeuger und -speicher, die zwangsläufig zu hohen Entwicklungs- und somit auch Anschaffungskosten führen. Zudem ist der Einbau und Anschluss sowie die Entsorgung komplexerer Systeme aufwendiger, was zwangsläufig zu höheren Kosten führt. Zusätzlich wird deutlich, dass die Erdwärmesonden bzw. das Brunnensystem der Wasser-Wasser-Wärmepumpen die gleichen lebenszyklusbasierten Kosten ergeben wie die Summe aller Heizungsrohre. Jedoch entstehen weniger Kosten als für die Trinkwarmwasserleitungen.

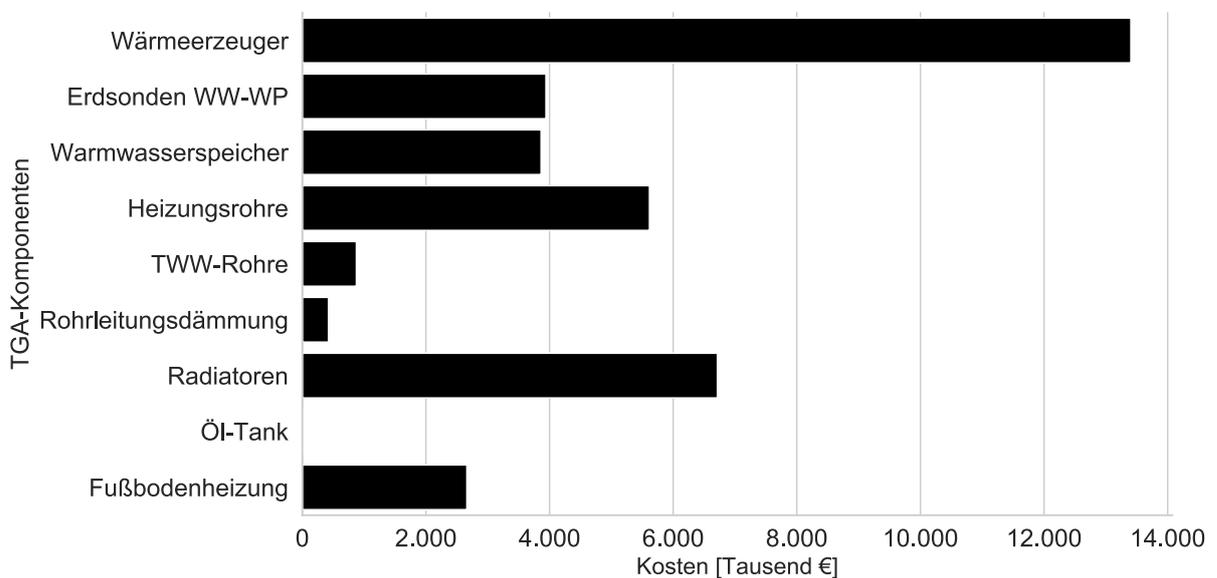
**Abbildung 4.32.:** Verteilung der Grauen Kosten über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Tabelle 4.32 zeigt die Summenwerte aller Indikatoren und Gebäude über deren gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren, inklusive des Entwicklungs- bzw. Sanierungszeitraums von 10 Jahren, auf. Hierbei sind alle Grauen Indikatorwerte, inklusive der Austauschzyklen aller TGA-Komponenten, und die Nutzungsphase (Operative Indikatorwerte) über den gesamten Zeitraum, inklusive der Preissteigerung und Kalkulationszinssätze für die Kostenwerte, berücksichtigt. Diese Summenwerte können den Werten beliebiger weiterer Szenarien gegenübergestellt werden, um in der Gesamtheit und im Vergleich der Indikatoren untereinander zwischen verschiedenen Szenarien und Indikatoren zu priorisieren. Eine solche Gegenüberstellung zwischen Szenario 1 und 2 wird nach der Vorstellung der Ergebnisse für Szenario 2 aufgezeigt (siehe bspw. Abbildung 4.34 auf Seite 163 und Abbildung 4.35 auf Seite 164).

**Tabelle 4.32.:** Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 1 - Stadtquartier Moosach

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>
PET [kWh]	207.870.986	1.034.184	1.483
PENRT [kWh]	132.760.469	660.500	947
PERT [kWh]	75.110.517	373.684	536
Komponenten-/Energiekosten [€]	66.892.510	332.799	477
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	46.631.604	231.998	333
GWP-Kosten [€]	2.154.152	10.717	15

### Berechnungsergebnisse Szenario 2 Stadtquartiersebene

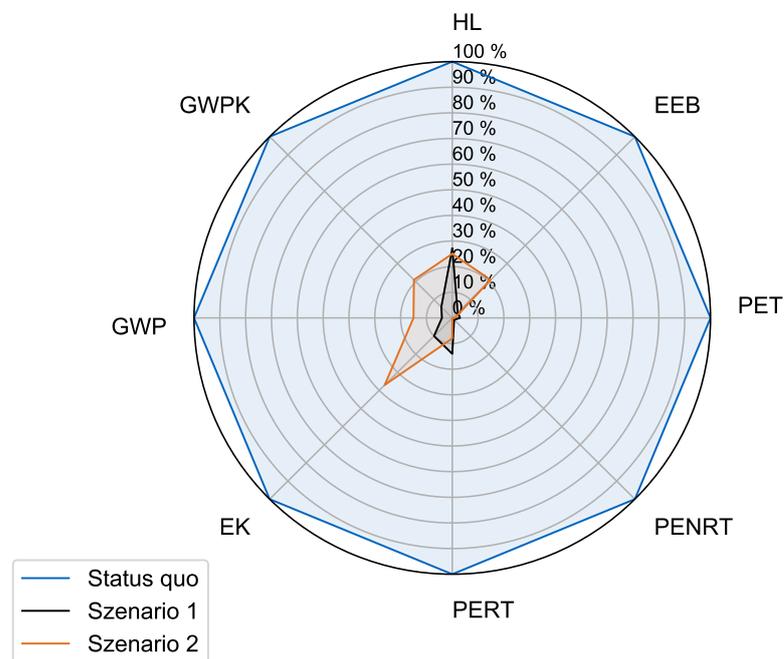
Die im Folgenden aufgezeigten Ergebnisse für das Szenario 2 (Fernwärme, Solarthermie, Fußbodenheizung) dienen als Beispiel für den Vergleich von Szenario 1 und 2. In diesem Abschnitt geht es speziell um den Szenarienvergleich zur Entscheidungsunterstützung auf Stadtquartiersebene.

Grundsätzlich wird zu Beginn der Analyse der Ergebniswerte jedes Szenarios der Wert der Heizlast, der Heizkosten und des Heizenergiebedarfs mit denen des Status quo verglichen (siehe Tabelle 4.33). Hieraus ergibt sich eine mittlere Einsparung über alle Indikatoren von rund 84 %. Zudem stellt die aufgeführte Tabelle die prozentualen Unterschiede ( $\Delta$  SQ und  $\Delta$  S1) zwischen den Werten der beiden Szenarien dar.

**Tabelle 4.33.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 2 (S2) im Vergleich mit dem Status quo ( $\Delta$  SQ/S2) und Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - Stadtquartier Moosach

Bewertungsparameter	Absolut	$\varnothing$ Gebäude	$\varnothing$ m <sup>2</sup>	$\Delta$ SQ/S2	$\Delta$ S1/S2
Heizlast [kW]	3.566	18	0,03	-75 %	-5 %
Endenergiebedarf [kWh/a]	6.181.630	30.754	45	-79 %	+85 %
PET [kWh/a]	455.801	2.268	3	-99 %	-56 %
PENRT [kWh/a]	40.571	202	0,30	-100 %	-86 %
PERT [kWh/a]	415.229	2.066	3	-92 %	-45 %
Energiekosten [€/a]	646.908	3.218	5	-63 %	+72 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	1.086.620	5.406	8	-85 %	+72 %
GWP-Kosten [€/a]	38.129	38	0,27	-79 %	+72 %

Die Abbildung 4.33 zeigt die Einsparung in Szenario 1 und 2 gegenüber dem Status quo für alle acht Indikatoren auf. Dies sind die Heizlast (HL), der Endenergiebedarf (EEB), die Summe des Primärenergiebedarfs (PET), der Primärenergiebedarf aus nicht-erneuerbaren Energien (PENRT), der Primärenergiebedarf aus erneuerbaren Energien (PERT), die Energiekosten (EK), das Global Warming Potential (GWP) und die GWP-Kosten (GWPK). Dabei wird der Status quo für alle Indikatoren als 100 %-Wert definiert. Die Einsparung in jedem Indikator ergibt sich aus der prozentualen Reduktion, die im Radar-Diagramm der Abbildung 4.33 abgelesen werden kann.



**Abbildung 4.33.:** Reduktion der Indikatoren (normiert) im Vergleich von Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Durch diese Darstellung lässt sich schnell erkennen, welches Szenario in Bezug auf die jeweiligen Dimensionen, aber auch in Summe zu höheren Einsparungen bzw. Reduktionen führt. Werden die jeweiligen Punkte der Indikatorwerte eines Szenarios verbunden, ergibt sich ein Polygon mit einem Flächeninhalt. Je kleiner der Flächeninhalt, umso höher ist in Summe die Einsparung bzw. Reduktion. Im angeführten Beispiel ist somit durch Szenario 1 eine höhere Reduktion zu erzielen als durch Szenario 2. Im Speziellen bezieht sich das auf das GWP und die daraus resultierenden Emissions- und Energiekosten. Gegenüber Szenario 2 ermöglicht die Ausführung des Szenario 1 signifikant geringere Emissions- und Energiekosten. Grund hierfür ist der in Szenario 1 um 85 % geringere Endenergiebedarf als in Szenario 2. Das ist hauptsächlich auf den um 77 % höheren Wirkungsgrad der Wärmepumpen im Vergleich zur Fernwärmeabnahmestation zurückzuführen.

Zudem lassen sich folgende weitere wichtige Erkenntnisse aus den Ergebnissen ableiten:

- Die Verteilung zwischen nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Primärenergiequelle beim Strom mit 30 % zu 70 % im Vergleich zur Fernwärme mit 10 % zu 90 % verringert dabei nur geringfügig die Differenz zwischen den Einsparungen in Szenario 1 und 2.
- Im Falle der Energiekosten ist die Einsparung in Szenario 1 um 72 % höher als in Szenario 2, obwohl der Preis pro kWh Strom um rund 53 % höher liegt als der für Fernwärme. Das ergibt sich aus dem um 85 % höheren Endenergiebedarf in Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1. Das wiederum ist auf die um 74 % höhere Erzeugeraufwandszahl bzw. schlechtere Effizienz der Wärmeerzeugung aus Fernwärme im Vergleich zur Wasser-Wasser-Wärmepumpe zurückzuführen.
- Der Unterschied bei der Einsparung der Heizlast geht zurück auf den Unterschied in den U-Werten der baukonstruktiven Elemente.
- Der Unterschied im Primärenergiebedarf lässt sich hauptsächlich auf den sich deutlich unterscheidenden Primärenergiefaktor zurückführen. Auch wenn der Endenergiebedarf in Szenario 2 um 85 % über dem Bedarf in Szenario 1 liegt, so führt die um 89 % geringere PET für Fernwärme in Szenario 2 in Summe zu einer um 56 % geringeren PET. Der PENRT und der PERT sind in Szenario 2 folglich ebenfalls geringer als in Szenario 1.
- Die PET hingegen ergibt sich in Szenario 1 zu 27 % aus dem PENRT und zu 73 % aus dem PERT. In Szenario 2 besteht die PET zu 9 % aus dem PENRT und zu 91 % aus dem PERT. Das ist mit der bereits genannten Differenz bei der Verteilung zwischen nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Primärenergiequelle bei Strom und Fernwärme zu begründen.
- Dass die Verteilung zwischen dem PENRT und dem PERT nicht der Verteilungsdefinition zwischen nicht-erneuerbaren und erneuerbaren Primärenergiequellen bei Strom und Fernwärme entspricht, liegt unter anderem daran, dass zusätzlich Hilfsenergien für Pumpen im Heizkreis mitbetrachtet werden.

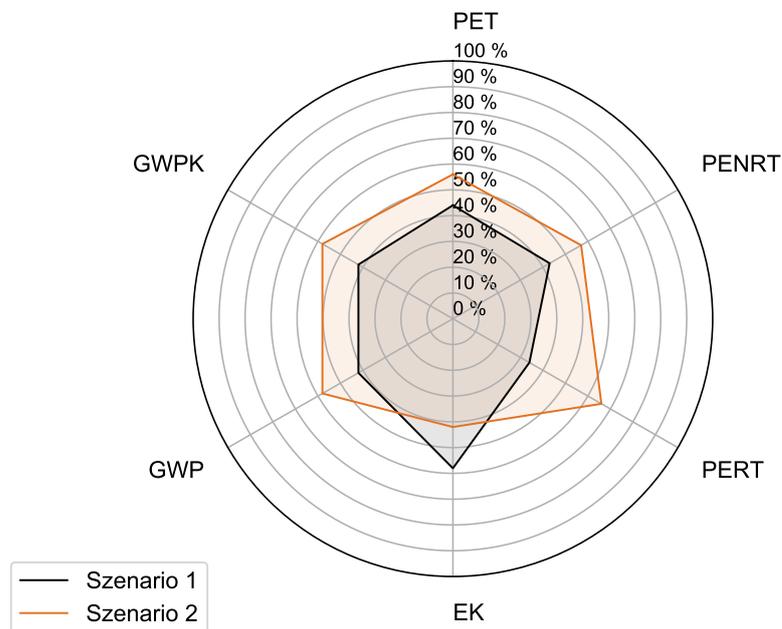
Die Tabelle 4.34 auf Seite 163 fasst, genauso wie bei Szenario 1, die im Rahmen des Entwicklungsszenarios aufzubringenden Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten zur Sanierung aller Gebäude zusammen. Auch in dieser Tabelle wird der prozentuale Unterschied zu Szenario 1 dargestellt. Dabei amortisieren sich, gleich wie bei Szenario 1, bis

auf die Komponentenkosten alle Grauen Aufwendungen der weiteren Indikatoren bereits über das Entwicklungsszenario hinweg. Beim Primärenergiebedarf im Gebäudebetrieb werden zum Beispiel bereits rund 33.060 MWh im Entwicklungszeitraum eingespart, wohingegen 3.602 MWh an Grauer PET aufgewendet werden. Ein ähnliches Bild zeigt sich ebenfalls bei den Indikatoren PENRT, PERT, GWP und GWP-Kosten. Beim Kostenindikator ergibt sich ein anderes Bild. Hierbei werden über das Entwicklungsszenario hinweg 1,1 Mio. € an Energiekosten eingespart, jedoch 14,3 Mio. € in Form von Grauen Kosten investiert. Unter Berücksichtigung von Preissteigerung und Kalkulationszinssatz findet nach sieben weiteren Jahren eine Amortisation der eingesetzten Grauen Kosten statt.

**Tabelle 4.34.:** Graue Energie, Graues GWP, Graue GWP-Kosten und Graue Kosten zur Sanierung für das Szenario 2 im Vergleich mit Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - Stadtquartier Moosach

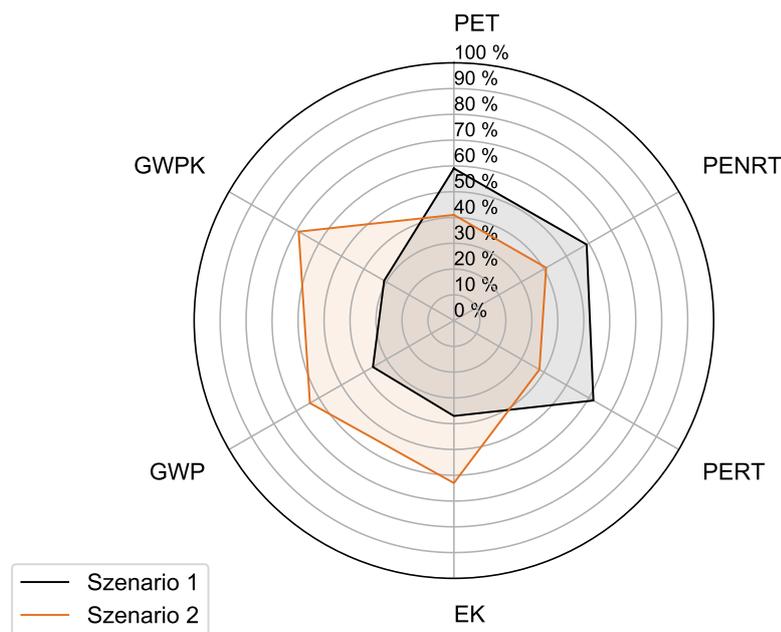
Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ S1/S2
PET [kWh]	3.601.729	17.919	26	+26 %
PENRT [kWh]	3.003.547	14.943	21	+32 %
PERT [kWh]	598.181	2.976	4	+92 %
Komponentenkosten [€]	14.366.328	71.474	102	-27 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	805.574	4.008	6	+39 %
GWP-Kosten [€]	23.957	98	0,14	+39 %

Der Wert 100 % zeigt in Abbildung 4.34 die Summe der Indikatorwerte aus Szenario 1 und 2 auf.



**Abbildung 4.34.:** Aufwendungen pro Indikator (normiert), Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Der jeweilige prozentuale Wert eines Szenarios innerhalb eines Indikators stellt hiermit den Anteil an der Gesamtsumme dar. Somit lassen sich die einzelnen Indikatoren unabhängig von deren Einheit miteinander vergleichen und die prozentual höhere und niedrigere Aufwendung an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten erklären. Werden je Szenario die einzelnen Punkte, die den prozentualen Wert innerhalb der Indikatoren beschreiben, miteinander verbunden, dann ergibt sich, gleich wie in Abbildung 4.33 auf Seite 161, ein Polygon, das eine Fläche umfasst. Je kleiner die Fläche, umso geringer ergibt sich in Summe die Aufwendung über alle Indikatoren hinweg. Ganz grundsätzlich lässt sich hieraus schlussfolgern, dass Szenario 1 innerhalb des Entwicklungsszenarios insgesamt zu geringeren Aufwendungen über alle Indikatoren hinweg führt. Lediglich bei den Komponentenkosten überwiegen die Kosten des Szenario 1. Da bei diesem Indikator keine Energiekosten mitberücksichtigt sind und die Kosten für die Wasser-Wasser-Wärmepumpen, inklusive der Kosten für Erdwärmesonden bzw. für das Brunnensystem mit Zuleitungen, deutlich höher sind als für die Fernwärmeübergabestation (siehe Tabelle A.39, Anhang A, Seite 272), ergibt sich der höhere Wert in Szenario 1. Die PET und somit ebenfalls der PENRT und der PERT und das GWP (inklusive GWP-Kosten) beziehen sich auf die Graue Energie und die Grauen Emissionen, also auf jene, die für den Ausbau und die Entsorgung der im Status quo verbauten Komponenten und für die Herstellung der neuen Komponenten in den Szenarien anfallen.



**Abbildung 4.35.:** Absolute Indikatorwerte (normiert) über 50 Jahre, Vergleich von Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung)

Die Werte der Tabelle 4.34 auf Seite 163 beziehen sich auf den Entwicklungszeitraum, wohingegen die Tabelle 4.35 auf Seite 165 die über den gesamten Lebenszyklus (50 Jahre) aller betrachteten Gebäude anfallenden Indikatorwerte zusammenfasst. In Tabelle 4.35 sind somit alle Grauen und Operativen Werte aller Indikatoren erfasst und sie bietet dadurch die Grundlage für übergeordnete, lebenszyklusbasierte Entscheidungsfindungen. Der Vergleich der Szenarien lässt sich zudem in Form eines Radar-Diagramms (siehe Abbildung 4.35 auf Seite 164) darstellen.

**Tabelle 4.35.:** Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 2 im Vergleich mit Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - Stadtquartier Moosach

<b>Bewertungsparameter</b>	<b>Absolut</b>	<b>Ø Gebäude</b>	<b>Ø m<sup>2</sup></b>	<b><math>\Delta</math> S1/S2</b>
PET [kWh]	142.032.656	706.630	1.013	-32 %
PENRT [kWh]	93.084.701	463.108	664	-30 %
PERT [kWh]	45.947.955	243.522	349	-39 %
Komponentenkosten [€]	112.256.827	558.492	801	+68 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	83.104.920	413.457	593	+78 %
GWP-Kosten [€]	4.900.744	24.382	35	+128 %

Der Vergleich der Werte von Szenario 2 mit den Werten von Szenario 1 zeigt, dass Szenario 1 grundsätzlich zu mehr PET führt als Szenario 2. Wie in Bezug auf Tabelle 4.35 erwähnt, führt die um 89 % geringere PET von Fernwärme im Vergleich zu Strom für die Wärmepumpen maßgeblich zu diesem Ergebnis. Diese Verteilung ändert sich auch nicht durch die Hinzunahme der Grauen Energie, denn diese hat über den gesamten Lebenszyklus hinweg nur einen geringen Einfluss. Die Energie- und Komponentenkosten und das GWP bzw. die GWP-Kosten fallen wiederum in Szenario 2 höher aus.

In Abbildung 4.33 auf Seite 161 ist zu erkennen, dass die geringere Reduktion des Endenergiebedarfs (EEB) in Szenario 2 über die 50 Jahre hinweg zu höheren Energiekosten im Vergleich zu Szenario 1 führt. Dabei sind die Grauen Kosten in Szenario 2 um 13 % geringer als in Szenario 2, die Operativen Kosten allerdings um 171 % höher. Im Falle der Grauen Kosten liegt der Grund für die höheren Kosten in Szenario 1 hauptsächlich an den zusätzlichen Aufwendungen für die Erdwärmesonden bzw. Brunnensysteme der Wasser-Wasser-Wärmepumpen.

Ohne eine Gewichtung der einzelnen Indikatoren vorzunehmen, ergeben sich in Summe über alle Indikatoren hinweg im Mittel um 29 % höhere Werte für Szenario 2 als für Szenario 1.

Die Thematik der Lebenszyklusanalyse ist nicht nur auf Stadtquartiers- und Stadtebene, sondern auch auf Gebäudeebene ein multidimensionaler Themenkomplex, der sich aufgrund seiner Komplexität nicht auf einen einzelnen Indikatorwert oder eine prozentuale Abweichung reduzieren lässt. Die verschiedenen Betrachtungshorizonte weisen unterschiedliche Abhängigkeiten und Wechselwirkungen auf, die fallspezifisch explizit aufgezeigt und untersucht werden müssen. Hinzu kommt, dass sich unterschiedliche Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtstrukturen selten gleichen. Deshalb müssen Gewichtungen bezüglich der Indikatoren bei ihrer Analyse und Bewertung angeführt werden. Anhand derer können spezifische Fallentscheidungen getroffen bzw. Strategien erarbeitet werden. Soll bspw. das Ziel der Klimaneutralität als Ziel der Sanierungsstrategie eines Stadtquartiers definiert wird, dann bedarf es einer höheren Gewichtung des Indikators GWP im Vergleich zu allen weiteren betrachteten Indikatoren.

#### 4.2.4. Fazit Stadtquartiersebene

Anhand der Ergebnisse können folglich Szenarien präferiert oder verworfen werden. Zudem besteht die Möglichkeit, in Kombination mit den Ergebnissen aus der Unsicherheitsanalyse Strategien zur weiteren Reduktion von Parametern zu erarbeiten, um Optimierungen zu erzielen. Ist das übergeordnete Ziel z. B. das Erreichen eines klimaneutralen Gebäudebestandes, dann sollte ganz grundsätzlich Szenario 1 weiter verfolgt werden. Zusammen mit den Informationen bzw. Ergebnissen aus der Unsicherheitsanalyse können Strategien zur Minderung des GWP erarbeitet werden (siehe Abbildungen 4.10 und 4.11 auf Seite 134). An dieser Stelle muss nochmals angemerkt werden, dass die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse keine Optimierung darstellen. Die Ergebnisse zeigen die Auswirkung des Variierens bzw. der Unsicherheit von Input-Parametern auf die Varianz des Endergebnisses auf. Werden die Erkenntnisse für das GWP aus der Unsicherheitsanalyse (siehe Abbildungen 4.10 und 4.11 auf Seite 134) mit den aus den LCA-Ergebnissen resultierenden Erkenntnissen zusammengeführt, dann ist zu erkennen, dass die Nutzungsphase für 97 % des GWP über den gesamten Lebenszyklus verantwortlich ist. Deshalb kann die in den Abbildungen 4.10 und 4.11 (siehe Seite 134) aufgeführte Kategorie *FAK* (siehe Tabelle 4.16 auf Seite 127) zunächst einmal vernachlässigt werden. Der Fokus liegt vorerst auf der Kategorie *LD* (durchschnittliche Lebensdauer Gebäude). Je höher die Lebensdauer von Gebäuden, umso höher die Emissionen im Gebäudebetrieb. Im Sinne einer nachhaltigen Nutzung von Gebäuden sollten diese jedoch so lange wie möglich betrieben und die Bausubstanz erhalten bleiben. Forschungsarbeiten haben bereits belegt, dass der Abriss und Neubau von Gebäuden in den meisten Fällen auf den Lebenszyklus bezogen schlechter zu bewerten ist als eine Kernsanierung [93]. In Bezug auf die LCA wird für ein saniertes wie auch für ein neu errichtetes Gebäude eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen. Wird sowohl bei der Sanierung als auch beim Neubau derselbe energetische Standard erreicht, dann gleichen sich der Energiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen aus.

Ein klimaneutraler Gebäudebetrieb kann nur durch den Einsatz Erneuerbarer Energien erfolgen. Ein klimapositiver Gebäudebetrieb kann nur gelingen, wenn die Grauen Energien, Grauen Emissionen und Grauen Kosten, die im Rahmen einer Sanierung anfallen, durch den Einsatz Erneuerbarer Energien kompensiert werden. Grundsätzlich müssen Kompensationsmaßnahmen auf unterschiedlichster Ebene diskutiert, berechnet, analysiert, dimensioniert und umgesetzt werden.

Die im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten Werte können sowohl als Planungsgrundlage für Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtentwicklungskonzepte dienen als auch als Grundlage für die Berechnung und Dimensionierungen von ökologischen Ausgleichsflächen zur Kompensation der von Gebäuden über deren Lebenszyklus verursachten Emissionen herangezogen werden.

### 4.3. Anwendung der Methode auf Stadtebene

Im folgenden Schritt wird urbi+ auf den gesamten Wohngebäudebestand Münchens angewandt. Die Methode sowie deren Anwendung auf Stadtebene wurde im Rahmen der 3D GeoInfo 2020 Konferenz in Form einer wissenschaftlichen Ausarbeitung von Harter et. al publiziert und präsentiert [191]<sup>2</sup>.

In Bezug auf die Rahmenbedingungen und das grundsätzliche Vorgehen bei der Durchführung der Berechnungen und Analysen gelten auf Stadtebene die gleichen Grundsätze wie auf Stadtquartiersebene. Die Berechnung erfolgt iterativ über alle zu betrachtenden Wohngebäude hinweg. Dabei wird zunächst der Status quo des Gebäudebestandes errechnet und darauf aufbauend eine Sanierungsreihenfolge erstellt. Anhand der Sanierungsreihenfolge werden alle Gebäude innerhalb eines definierten Entwicklungszeitraums auf einen ebenfalls definierten energetischen und energiesystemseitigen Standard gebracht. Hierfür wird im folgenden Kapitel 4.3.1 zunächst das Fallbeispiel des Wohngebäudebestands Münchens betrachtet und charakterisiert. Darauf aufbauend werden die nötigen Berechnungsparameter für den Status quo wie auch für die beiden Entwicklungsszenarien definiert.

Die Endergebnisse können als technische und politische Entscheidungshilfen für übergeordnete Stadtentwicklungsprozesse herangezogen werden. Hierzu zählen z. B. die Dimensionierung zukünftiger Leistungswerte (Netzdimensionierung, Leistungswerte der Kraftwerke) für die zentrale Bereitstellung von Fernwärme durch die Stadtwerke oder auch die Berechnung von Szenarien in Hinblick auf das Ziel der *Klimaneutralität der Stadt München* bis zum Jahr 2035 [37].

#### 4.3.1. Definition Fallbeispiel Stadtebene

Bei der Berechnung und Analyse der Wohngebäude auf der Stadtebene München werden 115.305 Wohngebäude betrachtet, die wiederum in unterschiedliche Baualtersklassen eingeteilt werden (siehe Tabelle A.42, Anhang A, Seite 285 und Abbildung 4.36 auf Seite 168). Diese Ermittlung erfolgt auf Basis einer vom Planungsreferat der Landeshauptstadt München (LHM) bereitgestellten Datei aus dem Jahr 2014. Darin sind u.a. münchenweit georeferenzierte Daten zu den Baujahren der Gebäude enthalten. Diese Daten wurden vorab für die Analysen den jeweiligen Gebäuden im 3D-Stadtmodell (CityGML) zugewiesen, indem eine geometrische Schnittmengenoperation zwischen den Gebäudgrundflächen und den Hauskoordinaten durchgeführt wurde. Hierbei führen nicht vorhandene Parameter (z. B. gebäudespezifische/s Baujahr oder Nutzungsart) zum Ausschluss von Gebäuden. Ein Vergleich der Anzahl der für die Berechnungen zur Verfügung stehenden Wohngebäude (115.305) mit der Anzahl an Wohngebäuden in München im Jahr 2014 zeigt, dass rund 83 % aller Wohngebäude Münchens im Rahmen dieser Berechnung und Analyse automatisiert berechnet werden können [192].

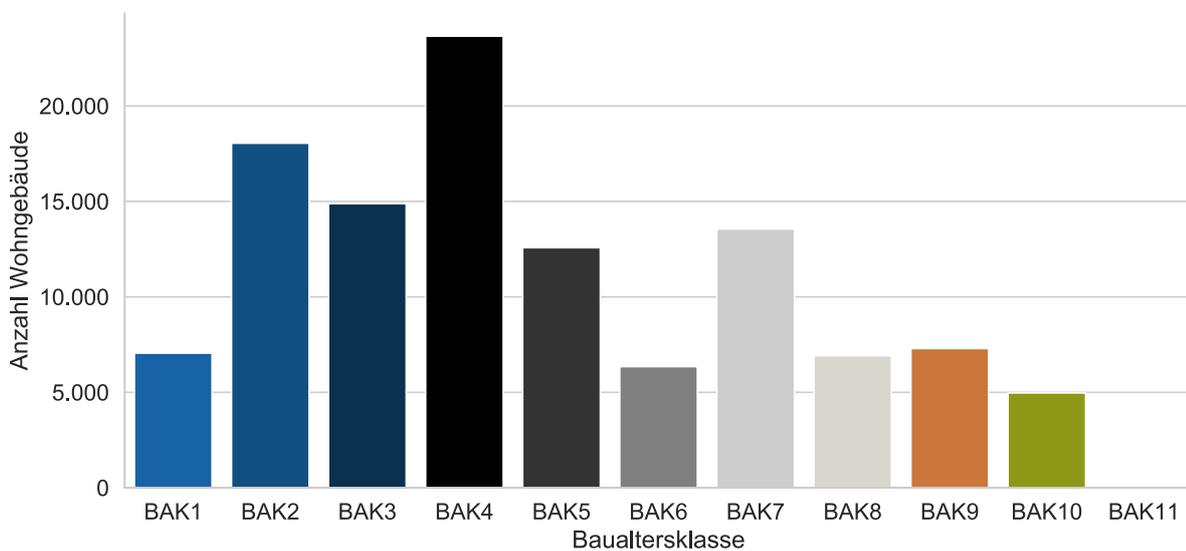
---

<sup>2</sup> Die in diesem Konferenzbeitrag publizierten Ergebnisse können von den im Folgenden präsentierten Ergebnissen abweichen. Das liegt daran, dass urbi+ kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert wird und die Berechnungen auf Basis zweier unterschiedlicher Entwicklungsstände von urbi+ durchgeführt wurden. Zudem gehen die hier präsentierten Ergebnisse über den im Rahmen der Konferenz publizierten Zwischenstand hinaus. Die Visualisierung der Ergebnisse kann unter folgendem Link eingesehen werden: <https://github.com/tum-gis/LCA-TGA>.

In folgenden drei Baualtersklassen (BAKs) sind die meisten Gebäude vertreten (siehe Abbildung 4.36 und Tabellen A.1 und A.42, Anhang A, Seiten 249 und 285):

1. 21 % in BAK4 (Baujahr  $\geq 1969$  und  $\leq 1978$ )
2. 16 % in BAK2 (Baujahr  $\geq 1919$  und  $\leq 1948$ )
3. 13 % in BAK3 (Baujahr  $\geq 1949$  und  $\leq 1957$ )

Dabei wurden rund 35 % aller betrachteten Wohngebäude vor dem Jahr 1957 errichtet. Das ist unter anderem damit zu begründen, dass die durch den Zweiten Weltkrieg verursachte Materialknappheit zu Beginn der BAK4 langsam überwunden wurde. Die BAK11 mit den Baujahren  $\geq 2016$  ist in der Betrachtung nicht vertreten, da das 3D-Stadtmodell aus den Jahren vor 2016 stammt.

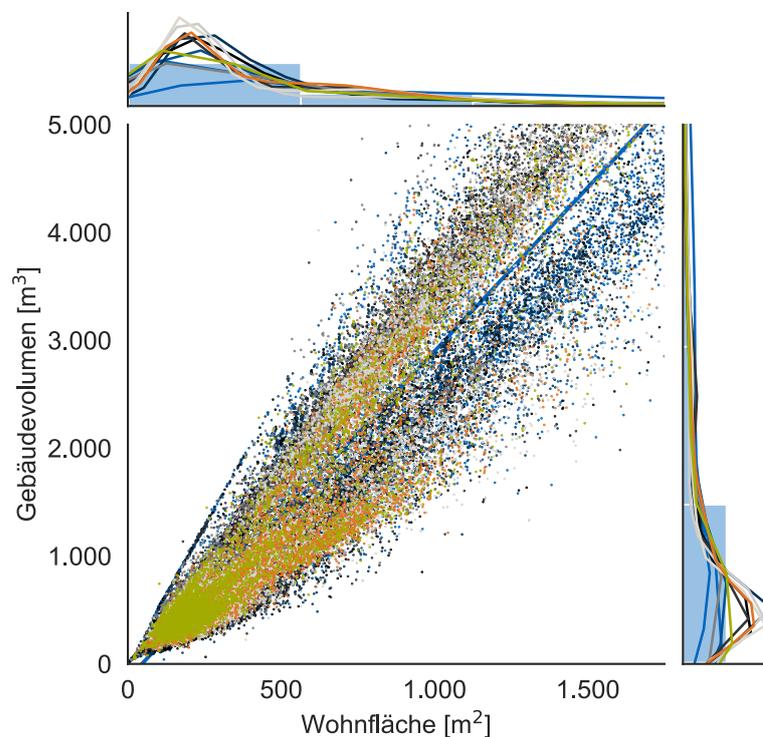


**Abbildung 4.36.:** Verteilung der Baualtersklassen der 115.305 Wohngebäude - Stadt München (eigene Abbildung)

Die in Abbildung 4.36 verwendete farbliche Kodierung der Baualtersklassen findet sich weiterführend in Abbildung 4.37 auf Seite 169 wieder, die das Gebäudevolumen in Relation zur Wohnfläche je nach Baualtersklasse aufzeigt. Neben der Korrelation der beiden Parameter (Korrelationskoeffizient  $R$ : 0,91; Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,83$ ) zeigt die Abbildung auf, dass die höheren Baualtersklassen (z. B. BAK9 und 10) mit dementsprechend jüngeren Gebäuden geringere Gebäudevolumen und Wohnflächen aufweisen. Ältere Gebäude bzw. Baualtersklassen (BAK2 bis 4) streuen deutlich mehr in den Bereichen mit größeren Gebäudevolumen und mehr Wohnfläche. Das ist plausibel, denn in älteren Gebäuden wurden hohe Decken bevorzugt.

Folgende weitere gebäudebezogenen Durchschnittswerte können zur Charakterisierung der Münchner Wohngebäude über alle Baualtersklassen hinweg angeführt werden:

- $\emptyset$  Wohnfläche: 547 m<sup>2</sup>
- $\emptyset$  Grundfläche: 146 m<sup>2</sup>
- $\emptyset$  Volumen: 1.522 m<sup>3</sup>
- $\emptyset$  Geschosshöhe je Gebäude: 3,3 m
- $\emptyset$  Gebäudehöhe: 12 m
- $\emptyset$  Geschossanzahl: 4



**Abbildung 4.37.:** Gegenüberstellung der Gebäudevolumen und der Wohnflächen, verteilt über Baualtersklassen - Stadt München (eigene Abbildung)

Bei der Betrachtung der Verteilung der Baualtersklassen im Zusammenhang mit der Verteilung der Verhältnisse zwischen Gebäudevolumen und Wohnfläche sowie den weiteren gebäudebezogenen Durchschnittswerten ergibt sich ein logischer Zusammenhang.

### 4.3.2. Definition Berechnungsparameter Stadtebene

Weiterführend werden die Definitionen für die Berechnung des Status quo und für die Entwicklungsszenarien aufgeführt. Da von der LHM keine öffentlich zugänglichen Angaben zum Sanierungsstand (U-Werte) und zu eingesetzten Energiesystemen des Wohngebäudebestandes vorliegen, müssen hierfür Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen sind exemplarisch und nicht repräsentativ, können aber trotzdem zur Demonstration der Anwendbarkeit von urbi+ herangezogen werden. In beiden Entwicklungsszenarien wird die Strategie eines steigenden Einsatzes an Erneuerbaren Energien berücksichtigt, gleich wie auf Stadtquartiersebene. Diese beziehen sich auf den Ausbau der Wärmebereitstellung aus Geothermie, also der Nutzung von Wasser-Wasser-Wärmepumpen und Wärmepumpen in Kombination mit Erdwärmesonden (in Szenario 1), und den Ausbau der Fernwärme (Szenario 2). Im Falle der Fernwärme zielen die Stadtwerke München darauf ab, den „Münchner Bedarf an Fernwärme CO<sub>2</sub>-neutral zu decken, überwiegend aus Geothermie“ [193].

Dennoch wäre es unrealistisch, eine alleinige Versorgung durch Wärmepumpen oder Fernwärme für alle Wohngebäude der LHM anzunehmen. Aufgrund dessen variiert die Verteilung der Energiesysteme auf Stadtebene mehr als auf Stadtquartiersebene, sowohl im Status quo als auch in den beiden Entwicklungsszenarien. Basierend auf dem von der LHM definierten Ziel der *Klimaneutralität Münchens 2035* wird der Entwicklungszeitraum in diesem Beispiel auf lediglich 15 Jahre, mit Beginn im Jahr 2020, angenommen [37]. Die Tabelle 4.36 führt die prozentualen Anteile der Verteilung der Wärmeerzeuger für Heizen und TWW sowie für die Wärmeübergabesysteme auf.

**Tabelle 4.36.:** Prozentuale Definition der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München

TGA-Komponente	Status quo [%]	Szenario 1 [%]	Szenario 2 [%]
Gas-Kessel - Heizen	70	20	-
Öl-Kessel - Heizen	20	-	-
Fernwärme - Heizen	10	10	80
Luft-Wasser-Wärmepumpe - Heizen	-	40	-
Sole-Wasser-Wärmepumpe EK - Heizen	-	5	-
Sole-Wasser-Wärmepumpe ES - Heizen	-	5	-
Wasser-Wasser-Wärmepumpe - Heizen	-	20	20
Gas-Kessel - TWW	20	20	-
Öl-Kessel - TWW	40	-	-
Gas-Speicheröfen - TWW	10	-	-
Durchlauferhitzer - TWW	20	-	-
Fernwärme - TWW	10	10	70
Wärmepumpen - TWW	-	30	-
Solarthermie - TWW	-	40	30
Radiatoren	80	-	-
Fußbodenheizung	20	100	100

TGA-Komponenten, die automatisch in jede Betrachtung aufgenommen werden, wie z. B. Warmwasserspeicher, Rohrleitungen etc., werden hier nicht explizit mit aufgeführt, da diese in jedem Fall mit in die Betrachtung einfließen. Die Tabelle 4.37 führt jedoch alle betrachteten Komponenten mit auf und zeigt zudem deren durchschnittliche Lebensdauer auf. Bei der LCA der TGA-Komponenten wird ein Zuschlagsfaktor von 1,2 berücksichtigt, der nicht im Detail mitbilanzierte TGA-Komponenten wie z. B. Rohführungsschienen, Elektrokabel, Heizkreispumpen etc. pauschal miteinschließt. Beim Einsatz von Fußbodenheizungen bei der Sanierung von Gebäuden muss auch an dieser Stelle angemerkt werden, dass hierfür genügend Raumhöhe zur Verfügung stehen muss. Des Weiteren wird mit einem Austauschzyklus der Fußbodenheizungen über die durchschnittliche Lebensdauer der Gebäude von 50 Jahren gerechnet. Das ergibt sich aus der Definition der Lebensdauer der Fußbodenheizungsrohre in der ÖkobaDat [59]. Soll bei zukünftigen Berechnungen kein Austausch der Fußbodenheizungen berücksichtigt werden, dann kann die Lebensdauer über die GUI von urbi+ beliebig angepasst und somit ein Austausch verhindert werden.

**Tabelle 4.37.:** Definition der Lebensdauer der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München

TGA-Komponente	Status quo [a]	Szenario 1 [a]	Szenario 2 [a]
Wärmeerzeuger Raumheizung und TWW	20	20	20
Durchlauferhitzer TWW	15	-	-
Erdkollektoren	-	30	-
Erdsonden	-	30	-
Erdsonden/Brunnensystem	-	30	-
Radiatoren	30	-	-
Fußbodenheizung	30	30	30
Warmwasserspeicher	20	20	20
Heizleitungen	25	25	25
Trinkwarmwasserleitungen	25	25	25
Leitungsisolierung	20	20	20
Öl-Tank	30	-	-

In der Tabelle 4.38 sind die Primärenergiefaktoren für die in den Szenarien berücksichtigten Primärenergiequellen definiert.

**Tabelle 4.38.:** Primärenergiefaktoren für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München (Quelle: [113])

Primärenergiequelle	Status quo [-]	Szenario 1 [-]	Szenario 2 [-]
Gas	1,1	-	-
Öl	1,1	-	-
Fernwärme	0,11	0,11	0,05
Strom	1,8	1,0	1,5
Erneuerbare Energien	0,0	0,0	0,5

Zudem sind in Tabelle 4.39 die jeweiligen nicht-erneuerbaren und erneuerbaren Anteile in Bezug auf die Primärenergiequelle festgelegt, z. B. die Anteile an Erdgas und Biogas im Gas-Netz.

**Tabelle 4.39.:** Nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Anteil an den Primärenergiequellen für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München

Primärenergiequelle	Status quo [%]	Szenario 1 [%]	Szenario 2 [%]
	nicht-erneuerbar/ erneuerbar	nicht-erneuerbar/ erneuerbar	nicht-erneuerbar/ erneuerbar
Gas	80/20	80/20	-
Öl	100/0	-	-
Fernwärme	20/80	20/80	10/90
Strom	70/30	30/70	50/50

Für die kostenbezogene Bewertung des Endenergiebedarfs sowie der Emissionen werden Ausgangswerte und Kostenwerte für das Jahr 2020 für den Status quo in der Tabelle 4.40 festgelegt. Diese Werte sind die gleichen wie auf Stadtquartiersebene und beziehen sich somit auf die gleichen Definitionsgrundlagen (siehe Tabelle 4.21). Die Kostenwerte werden zudem im zeitlichen Verlauf über das Entwicklungsszenario bzw. über den gesamten Lebenszyklus hinweg mit jährlichen Preissteigerungen und Kalkulationszinssätzen für die Berechnungen versehen. Bei den LCC-Preisen für die TGA-Komponenten wird ein Aufschlagsfaktor von 1,8 für zusätzliche TGA-Komponentenkosten und der ortsbezogene Kostenfaktor von 1,326 [152] für die Stadt München dazugerechnet.

**Tabelle 4.40.:** Kostenwerte der Endenergie und des GWPs für den Status quo (SQ) - Stadt München (Quellen: [151][166][167])

Endenergie/Emissionen	Status quo
Gas	0,0577 €/kWh
Öl	0,0377 €/kWh
Fernwärme	0,089 €/kWh
Strom	0,19 €/kWh
GWP	25 €/t

Zuletzt bleibt anzumerken, dass die U-Werte für den Status quo sowie für Szenario 1 und 2 gleich wie auf Stadtquartiersebene definiert werden. Die U-Werte des Status quo beziehen sich demnach auf die jeweilige Baualtersklasse des Gebäudes (siehe Tabelle A.2 und A.3, Anhang A, Seiten 249 und 250). Die U-Werte für die Bauteile nach Sanierung in Szenario 1 (KfW55) und 2 (Passivhaus) sind der Tabelle A.4 im Anhang A (siehe Seite 250) zu entnehmen.

### 4.3.3. Berechnungsergebnisse Stadtebene

Wie bereits auf Stadtquartiersebene werden auch auf Stadtebene zuerst die Daten zur Bewertung des Gebäudebestands für den Status quo aufgeführt. Das ermöglicht einen Vergleich der Ergebnisse auf Stadtebene mit denen auf Stadtquartiersebene (siehe Tabelle 4.41 und Tabelle 4.49 auf Seite

182). Grundsätzlich ist dabei zu erkennen, dass die homogenere Verteilung der Baualtersklassen auf Stadtebene und vor allem das Miteinbeziehen von Gebäuden mit jüngerem Baualter im Gesamten betrachtet zu geringeren Indikatorwerten auf Stadtebene führt.

**Tabelle 4.41.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für den Status quo (SQ) - Stadt München

<b>Bewertungsparameter</b>	<b>Absolut</b>	<b>∅ Gebäude</b>	<b>∅ m<sup>2</sup></b>
Heizlast [kW]	5.108.831	44	0,08
Endenergiebedarf [kWh/a]	11.265.430.000	97.701	179
PET [kWh/a]	11.620.290.000	100.779	184
PENRT [kWh/a]	9.097.833.000	78.902	144
PERT [kWh/a]	2.522.461.000	21.876	40
Energiekosten [€/a]	673.223.400	5.839	11
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	2.549.448.000	22.110	40
GWP-Kosten [€/a]	63.736.198	553	1,01

Die Ergebnisse aus Tabelle 4.41 dienen als Grundlage für die weitere Berechnung der Szenarien bzw. für die Erstellung der Sanierungsreihenfolge der Gebäude. Für den Status quo ergeben sich unter anderem die in Tabelle 4.42 aufgeführten Dimensionierungen der betrachteten TGA-Komponenten. Werden diese Dimensionierungen in Zukunft mit Materialwerten verknüpft, dann lassen sich z. B. stadtweite Ressourcenströme in Bezug auf die betrachteten TGA-Komponenten ermitteln.

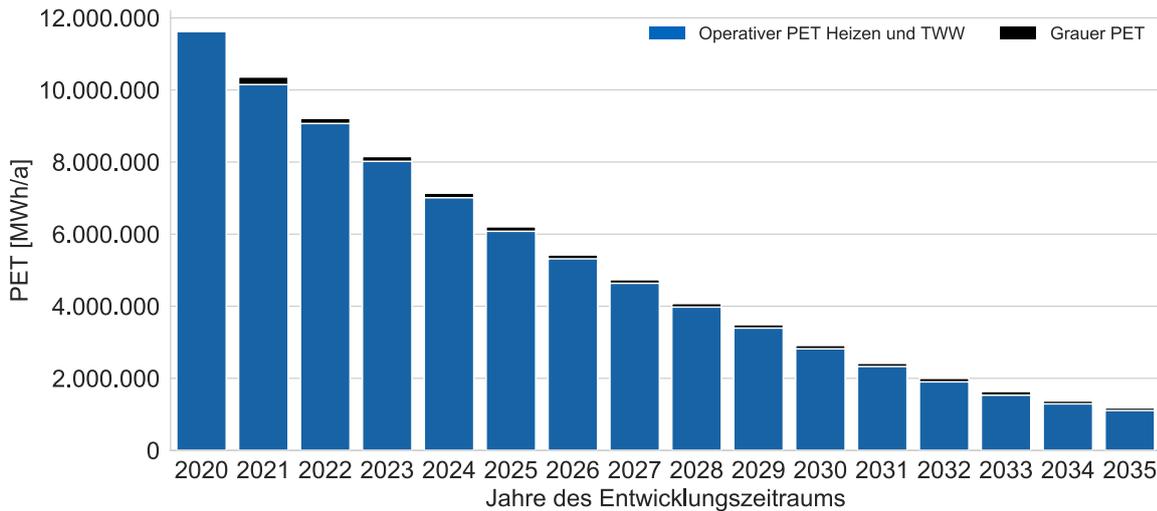
**Tabelle 4.42.:** Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für den Status quo (SQ) - Stadt München

<b>TGA-Komponente</b>	<b>Absolut</b>	<b>∅ Gebäude</b>
Gas-Kessel [kW]	1.550.343	13
Öl-Kessel [kW]	3.952.296	34
Durchlauferhitzer TWW [kW]	257.147	2,2
Gas-Speicherofen TWW [kW]	156.778	1,4
Fernwärme [kW]	662.523	5,7
Rohrleitungen [m]	40.755.410	353
Radiatoren [kg]	151.069.100	1.310
Fußbodenheizung [kg]	3.031.011	26
Warmwasserspeicher [l]	61.379.540	532
Rohrleitungsdämmung [kg]	10.197.360	88
Öl-Tank [l]	254.702.200	2.209

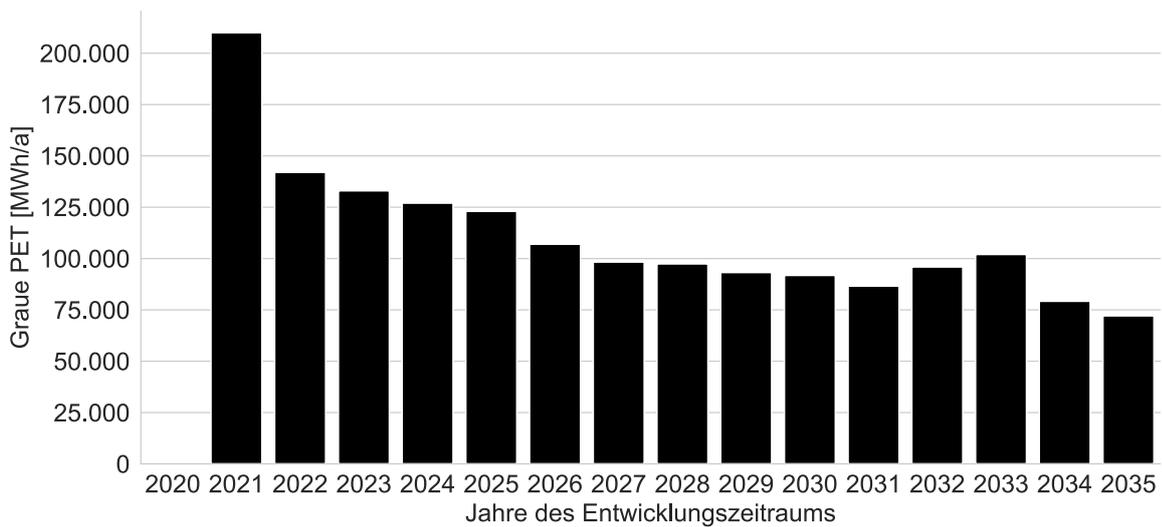
## Ergebnisse Szenario 1

Wenn über 15 Jahre hinweg, von 2021 bis einschließlich 2035, jährlich 7.687 Gebäude saniert werden würde, ergäbe sich der in Abbildung 4.38 auf Seite 174 aufgezeigte Verlauf der PET (Operativer und Grauer Anteil). Hieraus ergibt sich für den Entwicklungszeitraum eine durchschnittliche jährliche

Sanierungsquote von 6,7 %. Laut Aussage der Deutschen Energieagentur (dena) aus dem Jahr 2019 stagniert die Sanierungsquote in Deutschland jedoch seit Jahren bei rund einem Prozent [194]. Der Verlauf der Aufwendung an Grauer PET ist nochmals spezifisch in Abbildung 4.39 aufgezeigt, da dieser in Abbildung 4.38 nur schwer zu erkennen ist. Auch auf Stadtebene nimmt im Verhältnis von Grauer zu Operativer Energie die Operative Energie den größten Anteil ein. Beim GWP, PENRT und PERT ergeben sich gleiche Kurvenverläufe, deshalb werden diese Indikatorwerte nicht explizit in Abbildungen aufgeführt.

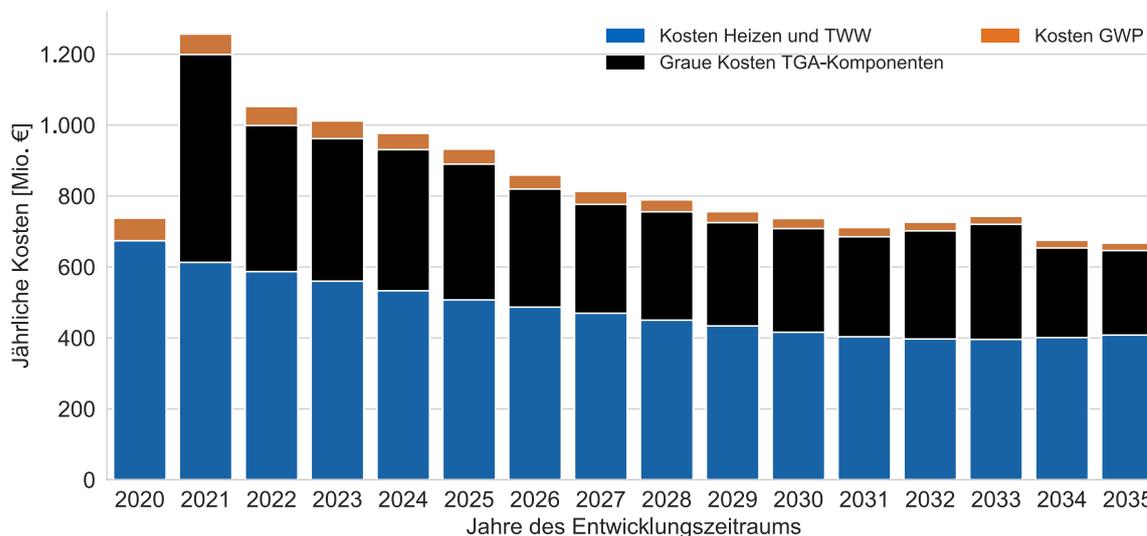


**Abbildung 4.38.:** Reduktion der PET für das Heizen und das TWW in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung)



**Abbildung 4.39.:** Aufwendungen an Grauer PET in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung)

Bei den Kosten hingegen ist der in Abbildung 4.40 aufgezeigte Verlauf über das Entwicklungsszenario zu erkennen. Bei den Energiekosten ist interessant zu sehen, dass ab dem Jahr 2034 die Operativen Energiekosten, trotz andauernder Sanierung von Gebäuden, wieder steigen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die jährlich erzielte Einsparung durch die Sanierung niedriger ist als die jährliche Preissteigerung der Energiekosten von 5 %. Die GWP-Kosten nehmen im Mittel über das Szenario 1 hinweg lediglich einen Anteil von 0,13 % ein.



**Abbildung 4.40.:** Verlauf der Gesamtkosten in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung)

In Tabelle 4.43 sind die durch Szenario 1 erzielten jährlichen Energiebedarfe, Emissionen und Kosten sowie die Heizlast aufgeführt. In der rechten Spalte ist die prozentuale Veränderung zum Status quo zu erkennen. Dabei ist für alle Indikatoren eine Reduktion festzustellen. Die höchste Reduktion kann bei der PENRT (-96 %) und die geringste bei den Energiekosten (-39 %) erzielt werden.

**Tabelle 4.43.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 1 im Vergleich zum Status quo ( $\Delta$  SQ/S1) - Stadt München

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ SQ/S1
Heizlast [kW]	1.732.179	15	0,03	-66 %
Endenergiebedarf [kWh/a]	1.969.138.000	17.078	31	-83 %
PET [kWh/a]	1.106.590.000	9.597	18	-90 %
PENRT [kWh/a]	391.421.500	3.395	6	-96 %
PERT [kWh/a]	715.168.500	6.202	11	-72 %
Energiekosten [€/a]	407.749.660	3.536	7	-39 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	498.378.800	4.322	8	-80 %
GWP-Kosten [€/a]	20.718.026	180	0,33	-67 %

Die Tabelle 4.44 (siehe Seite 176) listet die Dimensionierungen der betrachteten TGA-Komponenten in Szenario 1 auf. In Summe sinkt dabei die Gesamtleistung der Wärmeerzeuger im Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 um 84 % von 6,58 TW auf 1,05 TW. Mit Blick auf den Unterschied

der Dimensionierungen zwischen Status quo und Szenario 1 fällt auf, dass die Dimensionierung der Gas-Kessel aufgrund des Einsatzes weiterer Wärmeerzeuger der Erneuerbaren Energien im Rahmen des Szenarios gesunken ist. Zudem haben sich die Rohrleitungslängen (Heizen und TWW) reduziert. Das liegt daran, dass eine zentrale Wärmeerzeugung (Heizen und TWW) in Kombination mit Fußbodenheizungen angenommen wird. Das wiederum bedeutet, dass wenig Verteilungen zu einzelnen Radiatoren benötigt werden, sondern hauptsächlich vertikale Steigleitungen durch das Gebäude hin zum zentralen Anschluss der Fußbodenheizungsrohre verlegt werden müssen. Da im Vergleich zum Status quo niedrigere Heizlasten anfallen und zusätzlich die Fußbodenheizungen deutlich effizienter betrieben werden kann als die Radiatoren im Status quo, verringert sich der Rohrdurchmesser für die Heizleitungen. Der sinkende Rohrdurchmesser führt zu einer Abnahme in Bezug auf das Gewicht für Rohrleitungen und folglich ergibt sich auch eine Reduktion der Rohrleitungsdämmung. Der Warmwasserbedarf sinkt durch die Sanierung der Gebäudehülle und des Energiesystems nicht, sondern bleibt ein von den Bewohner/-innen abhängiger Wert. Da im Rahmen dieser Dissertation mit einem normenseitig definierten wohnflächenbezogenen Durchschnittswert bezüglich des Nutzenergiebedarfs für TWW gerechnet wird, verändert sich dieser im Zuge der Sanierung nicht.

**Tabelle 4.44.:** Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das Szenario 1 - Stadt München

<b>TGA-Komponente</b>	<b>Absolut</b>	<b>∅ Gebäude</b>
Gas-Kessel [kW]	507.300	4,4
Fernwärme [kW]	179.498	1,6
Luft-Wasser-Wärmepumpe [kW]	193.706	1,7
Wasser-Wasser-Wärmepumpe [kW]	101.563	0,9
Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektor [kW]	32.645	0,3
Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonde [kW]	32.645	0,3
Rohrleitungen [m]	22.849.643	198
Fußbodenheizung [kg]	18.622.210	162
Warmwasserspeicher [l]	61.379.540	532
Rohrleitungsdämmung [kg]	2.521.120	22
Solarthermie [m <sup>2</sup> ]	698.267	6,1
Erdkollektoren [kg]	464.748	4,0
Erdsonden [m]	327.647	2,8
Erdsonden/Brunnensystem [kg]	304.113	2,6

Der Aufwand an Grauen Energien, Emissionen und Kosten, die innerhalb des Entwicklungsszenarios von 15 Jahren bei den Sanierungen anfallen, wird wiederum in Tabelle 4.45 auf Seite 177 aufgezeigt. Die Graue PET ergibt sich dabei zu 84 % aus nicht-erneuerbaren Quellen (PENRT). Daraus kann geschlossen werden, dass ein Potenzial im Einsatz Erneuerbarer Energien im Produktionsprozess der TGA-Komponenten steckt. Zur Amortisation der Grauen Aufwendungen lässt sich sagen, dass sich bei den energie- und emissionsbezogenen Indikatoren (PENRT, PERT und GWP) der Aufwand im Vergleich zur erzielten Einsparung bereits innerhalb des Entwicklungsszenarios amortisiert. Bei der Amortisation der Grauen Komponentenkosten ergibt sich auch in Zukunft keine Amortisation (vgl.

Abbildung 4.40 auf Seite 175). Der Einsatz an Grauen Kosten führt insgesamt gesehen auch zukünftig nicht zu einer Amortisation. Das beruht darauf, dass die durch die Sanierungen erzielte Einsparung bei den Operativen Kosten geringer ist als die jährliche Preissteigerung für Energie- und Emissionskosten. Hieraus ergeben sich Anknüpfungspunkte bzw. zukünftige Forschungsmöglichkeiten in Bezug auf Preisentwicklungsmodelle und Subventionsmaßnahmen etc.

**Tabelle 4.45.:** Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten für das Szenario 1 - Stadt München

<b>Bewertungsparameter</b>	<b>Absolut</b>	<b>∅ Gebäude</b>	<b>∅ m<sup>2</sup></b>
PET [kWh]	1.659.113.375	14.389	26
PENRT [kWh]	1.400.779.270	12.148	22
PERT [kWh]	258.334.106	2.240	4
Komponentenkosten [€]	8.022.657.505	69.577	126
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	369.118.077	3.201	6
GWP-Kosten [€]	11.314.542	98	0,18

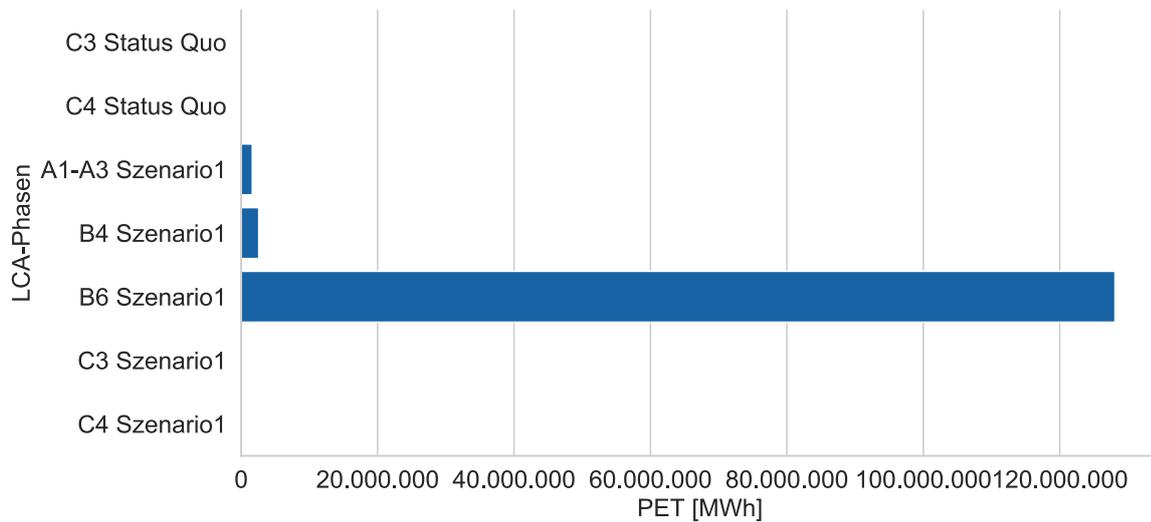
Wird der gesamte Lebenszyklus von 50 Jahren aller betrachteten Gebäude miteinbezogen, ergeben sich die in Tabelle 4.46 aufgeführten Indikatorwerte. In Summe über 50 Jahre hinweg betrachtet werden rund 46 % der PET in Szenario 1 aus erneuerbaren Quellen (PERT) gedeckt. Am gesamten Primärenergiebedarf nimmt die Graue PET der TGA-Komponenten einen Anteil von 3 % ein. In Bezug auf die Gesamtkosten (exklusive GWP-Kosten) beanspruchen die Grauen Kosten 32 %. Werden die GWP-Kosten mit hinzugenommen, dann betragen diese 4 % über den gesamten Lebenszyklus. Würden die vom Deutschen Umweltbundesamt (uba) vorgeschlagenen Kosten von 195 bzw. 680 €/t CO<sub>2</sub>-Äq. angesetzt [195], dann ergäben sich anstatt der GWP-Kosten von 2,4 Mrd. € (siehe Tabelle 4.46) Kosten von rund 16,3 bzw. 62,9 Mrd. €. Die Kosten des Umweltbundesamtes beziehen dabei die Gewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen mit ein.

**Tabelle 4.46.:** Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude (50 Jahre) für das Szenario 1 - Stadt München

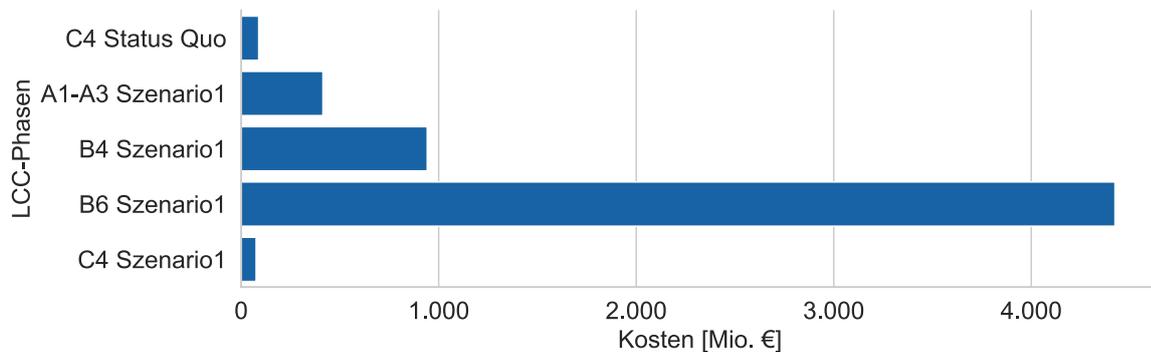
<b>Bewertungsparameter</b>	<b>Absolut</b>	<b>∅ Gebäude</b>	<b>∅ m<sup>2</sup></b>
PET [kWh]	132.357.469.702	1.147.890	2.099
PENRT [kWh]	72.105.865.374	625.349	1.143
PERT [kWh]	60.251.631.328	522.541	956
Gesamtkosten [€]	59.527.336.661	516.260	944
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	42.841.449.836	371.549	679
GWP-Kosten [€]	2.438.685.101	21.150	16

Die Indikatorwerte lassen sich wiederum den einzelnen Lebenszyklusphasen und TGA-Komponenten zuweisen. Exemplarisch werden hierfür im Folgenden die Indikatorwerte der PET und der Gesamtkosten aufgezeigt. Die Aufteilung des PENRT, des PERT, des GWP und der GWP-Kosten auf die Lebenszyklusphasen verläuft gleich wie bei der PET, mit einer ausgeprägten Nutzungsphase (siehe

Abbildung 4.41). 97 % der PET resultieren aus der Nutzungsphase und lediglich 1,2 % aus dem Austausch und Ersatz der TGA-Komponenten. Bei den Kosten entfallen rund 74 % auf die Nutzungsphase, 16 % auf den Austausch und Ersatz und 7 % auf die Herstellungsphase (siehe Abbildung 4.42). Ähnlich wie auf Stadtquartiersebene ergibt sich der größte Primärenergiebedarf (62 %) im Entwicklungszeitraum (hier: 15 Jahre). Das resultiert vornehmlich aus den noch unsanierten Gebäuden in den Anfangsjahren des Entwicklungszeitraums. Die schlechtere Dämmqualität des Bestands spiegelt sich dabei in hohen Primärenergiebedarfen wider.

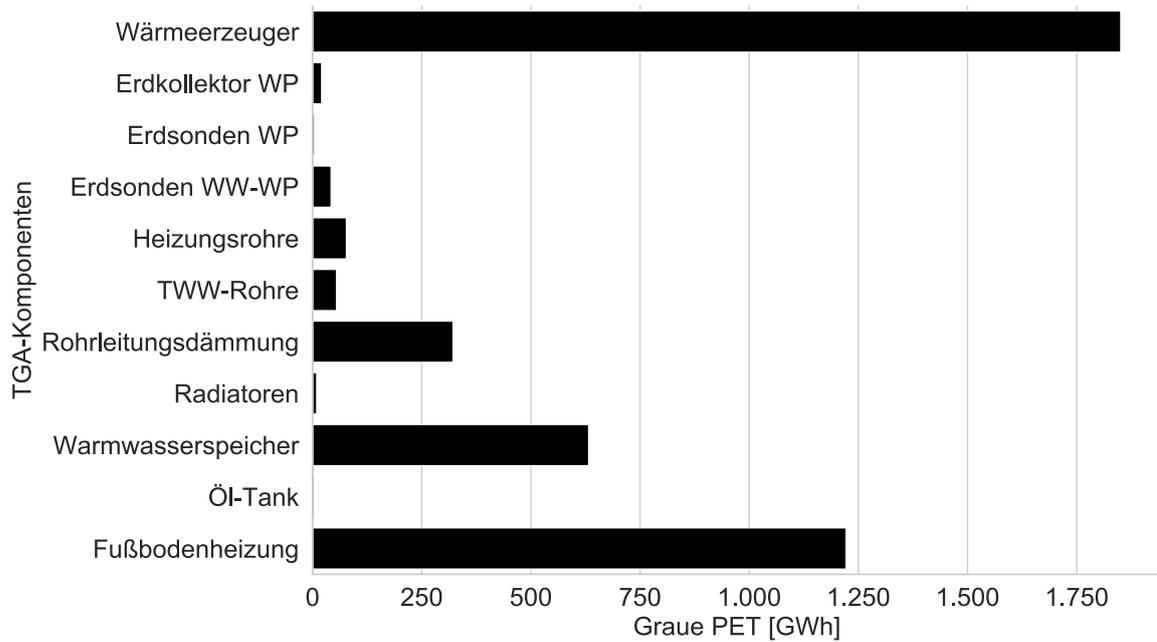


**Abbildung 4.41.:** PET aller Wohngebäude über 50 Jahre - Stadt München (eigene Abbildung)

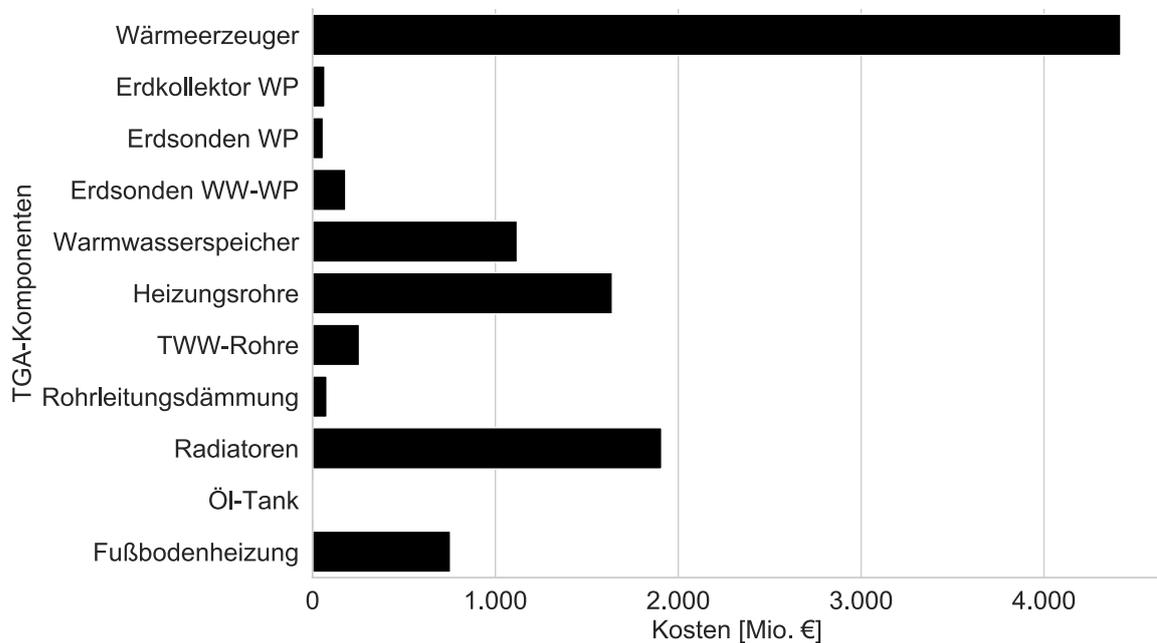


**Abbildung 4.42.:** Summe der Kosten aller Wohngebäude über 50 Jahre - Stadt München (eigene Abbildung)

Bei der Aufteilung der PET auf die TGA-Komponenten zeigt sich, dass sowohl bei der PET als auch bei den Kosten die Wärmeerzeuger den größten Anteil einnehmen (siehe Abbildungen 4.43 und 4.44 auf Seite 179). Bei den Indikatorwerten PENRT, PERT und GWP sind die Wärmeerzeuger, die Fußbodenheizungen und die Warmwasserspeicher ebenfalls die Komponenten mit den höchsten Werten.



**Abbildung 4.43.:** Verteilung der Grauen PET über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung)



**Abbildung 4.44.:** Verteilung der Grauen Kosten über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung)

Auf Gebäude- und Stadtquartiersebene war jeweils die Fußbodenheizung der größte Faktor über alle energetischen und emissionsbezogenen Indikatoren hinweg. Auf Stadtebene sind es jedoch die Wärmeerzeuger. Das liegt unter anderem daran, dass auf Stadtebene Wärmeerzeuger zum Einsatz kommen, die nicht ausschließlich auf Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energien beruhen. Zudem fallen die Solarthermieanlagen unter die Kategorie der Wärmeerzeuger und deren Dimensionierung erweist sich auf der Stadtebene im Durchschnitt pro Gebäude als doppelt so hoch wie auf Stadtquartiersebene. Das wiederum lässt sich mit dem höheren Endenergiebedarf für TWW auf der Stadtebene begründen, der zur Berechnung der TWW-Heizlast herangezogen wird. Das ergibt sich auf der Stadtebene aus der Nutzung von Wärmeerzeugern mit schlechterem Wirkungsgrad, im Vergleich zur Stadtquartiersbetrachtung. Anhand der Aufschlüsselung auf der Komponentenebene können auf verschiedenen Ebenen Optimierungsstrategien zum Einsatz von TGA-Komponenten erarbeitet und abgeleitet werden.

## Ergebnisse Szenario 2

Die im Folgenden aufgeführten Tabellen und Abbildungen fassen die Ergebniswerte aller betrachteten Indikatoren für Szenario 2 zusammen und stellen diese in Relation zum Status quo ( $\Delta$  SQ) und zu Szenario 1 ( $\Delta$  S1) dar.

Die Tabelle 4.47 stellt, gleich wie bei Szenario 1, die Heizlast, den Heizenergiebedarf und die dabei anfallenden Emissionen und Kosten nach der Sanierung aller betrachteten Gebäude im Jahr 2036 dar. Der Fokus liegt dabei auf der Betrachtung der prozentualen Veränderungen sowohl zum Status quo ( $\Delta$  SQ) als auch zu Szenario 1 ( $\Delta$  S1). Bei der prozentualen Reduktion aller Indikatoren im Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 ergibt sich eine durchschnittliche Reduktion von 74 % pro Indikator. Der Vergleich zwischen dem Status quo und Szenario 2 resultiert in einem Wert von durchschnittlich 77 %. Dabei sinken, bis auf den Endenergiebedarf, alle Indikatorwerte in Szenario 2 stärker als in Szenario 1. Das ist auf den um 74 % höheren Wirkungsgrad der gebäudeseitigen Fernwärmeübergabestation im Vergleich zur Wärmepumpe zurückzuführen.

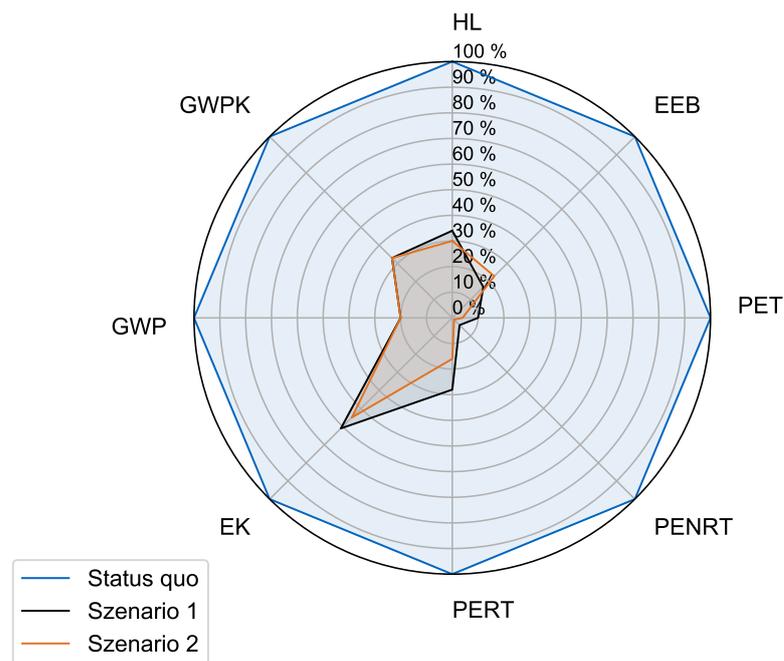
**Tabelle 4.47.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 2 im Vergleich zum Status quo ( $\Delta$  SQ/S2) und zu Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - Stadt München

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ SQ/S2	$\Delta$ S1/S2
Heizlast [kW]	1.552.747	13	0,02	-70 %	-10 %
Endenergiebedarf [kWh/a]	2.591.851.000	22.478	41	-77 %	+32 %
PET [kWh/a]	488.922.500	4.240	7,8	-96 %	-56 %
PENRT [kWh/a]	80.648.110	699	1,3	-99 %	-79 %
PERT [kWh/a]	408.274.400	3.541	6,5	-84 %	-43 %
Energiekosten [€/a]	371.852.429	3.225	5,9	-45 %	-9 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	506.317.700	4.391	8,0	-80 %	+2 %
GWP-Kosten [€/a]	21.048.053	183	0,33	-67 %	+2 %

Trotz höherem Endenergiebedarf in Szenario 2 ist eine 9 % höhere Reduktion der Energiekosten im Vergleich zu Szenario 1 zu erzielen. Das liegt daran, dass der Preis pro Kilowattstunde Strom um 53 % über dem Preis für eine Kilowattstunde Fernwärme liegt. Die PET ist aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors für Fernwärme (Primärenergiefaktor (PEF): 0,05) deutlich geringer und der Anteil an PERT an der PET beträgt in Szenario 2 rund 84 %. Die Reduktion des GWP und der GWP-Kosten fällt in beiden Szenarien nahezu gleich aus. Die Heizlast sinkt in Szenario 2 mehr als in Szenario 1, was durch die niedrigeren U-Werten bei der Berechnung verursacht wird.

Der Vergleich der berechneten Heizlast von absolut 1.553 MW in Szenario 2 mit der thermischen Leistung der drei Kraftwerke der Stadtwerke München, die in das Fernwärmenetz einspeisen (Heizkraftwerk Nord und Süd sowie Freimann), von 1.839 MW [196] zeigt, dass eine Deckung der Heizlast der Gebäude im Szenario 2 bereits jetzt möglich wäre. Allerdings würden dann rund 84 % der Leistung der Kraftwerke durch Wohngebäude beansprucht werden.

Abbildung 4.45 zeigt die Einsparung, die durch Sanierungen in Szenario 1 und 2 erzielt wurden, in einem Radar-Diagramm auf. Es wird deutlich, dass durch das Szenario, in Summe über alle Indikatoren hinweg, eine höhere Einsparung erreicht werden kann.



**Abbildung 4.45.:** Reduktion der Indikatoren (normiert), Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadt München (eigene Abbildung)

Aus den in Tabelle 4.47 aufgezeigten Werten werden die in Tabelle 4.48 auf Seite 182 aufgeführten Dimensionierungen der TGA-Komponenten in Szenario 2 errechnet. Durch den Fokus auf die Fernwärme in Szenario 2 ergeben sich die aufgeführten prozentualen Änderungen in den Dimensionierungen der Wärmeerzeuger. Bei Szenario 2 werden insgesamt 2,15 TW Wärmeerzeugerleistung

benötigt. Die Reduktion in Szenario 2 ist nochmals um 51 % höher als bei Szenario 1. Da sowohl in Szenario 1 als auch in Szenario 2 auf Fußbodenheizungen gesetzt wird, fallen hier die Rohrleitungslängen (Heizen und TWW) gleich aus und somit auch die Dimensionierung der Rohrleitungsdämmung. Die Dimensionierung der Fußbodenheizung ist in Szenario 2 um 21 % geringer als in Szenario 1, was auf die niedrigere Heizlast und den daraus resultierenden höheren Verlegeabstand der Fußbodenheizungsrohre zurückzuführen ist. Da der Warmwasserbedarf in diesem Szenario dem im Status quo gleicht, gibt es hier keine Veränderung. Die Solarthermiefläche steigt in Szenario 2 um 50 % an, da der Anteil an der Trinkwarmwasser-Heizlast, der durch die Solarthermie abgedeckt werden muss, größer ist. Das ist dadurch erklärbar, dass die Effizienz der Fernwärmeübergabestation geringer ist als die für die Wärmepumpen in Szenario 1. Zudem fällt die Dimensionierung des Brunnensystems geringer aus weil sich die Dimensionierung der Wasser-Wasser-Wärmepumpe aufgrund der reduzierten Heizlast ebenfalls geringer zeigt.

**Tabelle 4.48.:** Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das Szenario 2 - Stadt München

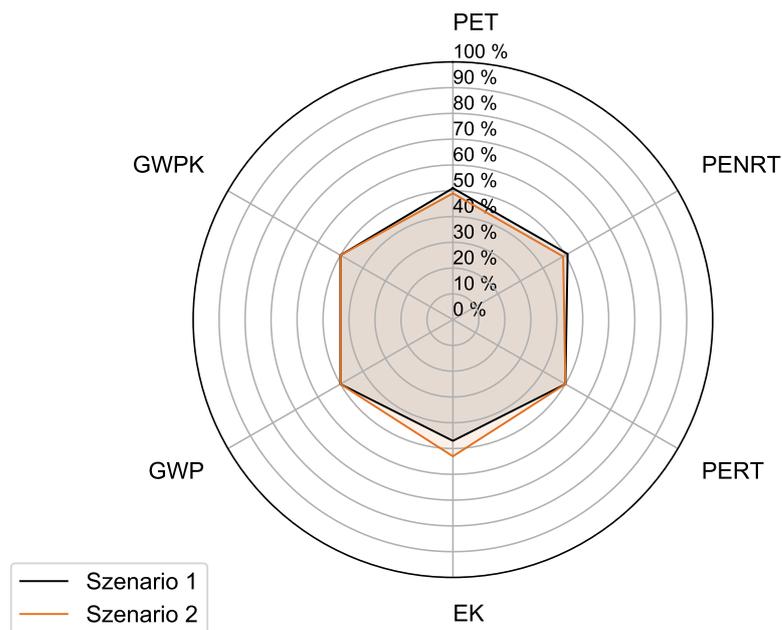
TGA-Komponente	Absolut	∅ Gebäude
WW Wärmepumpe [kW]	82.644	0,7
Fernwärme [kW]	2.068.053	18
Rohrleitungen [m]	22.849.643	198
Rohrleitungsdämmung [kg]	2.521.120	22
Fußbodenheizung [kg]	15.430.650	134
Warmwasserspeicher [l]	61.379.540	532
Solarthermie [m <sup>2</sup> ]	1.040.050	9,0
Erdsonden/Brunnensystem [kg]	272.724	2,4

Die Tabelle 4.49 zeigt die für die Einsparung im Rahmen der Sanierung in Szenario 2 zu erbringenden Grauen Aufwendungen über den Entwicklungszeitraum von 15 Jahren auf. Generell fallen diese fast gleich aus, wobei die zu investierenden Komponentenkosten in Szenario 2 um 15 % höher liegen. Insgesamt ergeben sich über alle Indikatoren hinweg 10 % mehr Graue Aufwendungen, wohingegen die eingebrachte PET geringfügig niedriger ist.

**Tabelle 4.49.:** Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten zur Sanierung für das Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 (Δ S1/S2) - Stadt München

Bewertungsparameter	Absolut	∅ Gebäude	∅ m <sup>2</sup>	Δ S1/S2
PET [kWh]	1.614.153.339	13.999	26	-3 %
PENRT [kWh]	1.357.808.242	11.776	22	-3 %
PERT [kWh]	256.345.097	2.223	4	-1 %
Komponentenkosten [€]	9.201.281.742	79.799	146	+15 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	373.353.108	3.238	6	+1 %
GWP-Kosten [€]	11.437.880	99	0,18	+1 %

Bezogen auf die Grauen Komponentenkosten ist es auch in Szenario 2 der Fall, dass diese sich über den Zeitraum von 50 Jahren nicht amortisieren. Bei allen anderen Aufwendungen ist das schon bereits innerhalb des Entwicklungsszenarios geschehen. Das hat denselben Grund wie in Szenario 1, weil die Preissteigerung mit 5 % pro Jahr höher ist als die erzielte Kosteneinsparung durch die Reduktion der Endenergie durch die Sanierungen. Die Abbildung 4.46 zeigt nochmals die beschriebenen Aufwendungen im Vergleich auf. Hierbei ist zu erkennen, dass sich diese im Rahmen der beiden Entwicklungsszenarien, in Summe über alle Indikatoren hinweg, um durchschnittlich 4 % unterscheiden.



**Abbildung 4.46.:** Aufwendungen pro Indikator (normiert), Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadt München (eigene Abbildung)

In Tabelle 4.50 auf Seite 184 werden die Summenwerte aller betrachteten Wohngebäude und Indikatoren über 50 Jahre hinweg aufgeführt. Zu erkennen ist, dass sich die PET, aufgrund des großen Unterschieds der Primärenergiefaktoren, in Szenario 2 um mehr als 50 % niedriger zeigt als in Szenario 1. Bei den Emissions- und Kostenwerten ergeben sich jedoch nur geringe Unterschiede. Für die Betrachtung der Verteilung der Werte über die einzelnen Lebenszyklusphasen werden nicht nochmals Abbildungen aufgeführt, da die Nutzungsphase auch in Szenario 2 bei allen Indikatoren den höchsten Wert einnimmt (z. B. Primärenergie 95 % und Gesamtkosten 80 %).

**Tabelle 4.50.:** Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 2 im Vergleich mit Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - Stadt München

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ S1/S2
PET [kWh]	85.623.372.766	742.582	1.358	-55 %
PENRT [kWh]	45.942.752.161	398.445	729	-57 %
PERT [kWh]	39.680.620.605	344.136	629	-52 %
Gesamtkosten [€]	62.644.542.360	543.294	993	+5 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	42.032.715.851	355.862	651	+2 %
GWP-Kosten [€]	2.462.534.153	21.357	39	+1 %

Grundsätzlich fällt die Menge an GWP, also der Emissionen, die sich trotz der ambitionierten baukonstruktiven und energiesystemseitigen Sanierungen in Szenario 1 und 2 über die 50 Jahre ergeben, hoch aus in Bezug auf das Ziel *Klimaneutrales München 2035*. Werden in die Berechnung weiterführend die Grauen Emissionen für die Baukonstruktion der Wohngebäude miteinbezogen und die Betrachtung zudem noch auf Nichtwohngebäude erweitert, dann ergeben sich daraus zwangsläufig noch höhere Emissionswerte. Zudem sind die sich daraus ergebenden GWP-Kosten von knapp 2,5 Mrd. € über 50 Jahre (49 Mio. € pro Jahr) konservativ berechnet. Wird der Preis für eine Tonne GWP nicht auf 25 €, sondern z. B. auf 300 € gesetzt, dann entstehen daraus in Zukunft enorme Kosten. Wenn jedoch alle Wohngebäude in ihrem jetzigen Zustand (Status quo) ohne Sanierung über weitere 50 Jahre betrieben werden würden, dann wäre die Menge an Emissionen um 67 % (Gesamtwert: 127,5 Mrd. kg CO<sub>2</sub>-Äq.) höher als im Vergleich zu Szenario 2. Pro Einwohner/-in (1.526.056 Personen - Stand 2017)<sup>3</sup> ergäbe das, bezogen auf das Szenario ohne Sanierung, einen Wert von 1,67 t CO<sub>2</sub>-Äq./a. Die von der LHM veröffentlichte Zahl beläuft sich auf 1,72 t CO<sub>2</sub>-Äq./a pro Einwohner/-in [198], bezogen auf den Sektor „Private Haushalte“. Würde das Szenario 2 Anwendung finden, dann würden sich die Emissionen ebenfalls um 67 % auf 0,55 t CO<sub>2</sub>-Äq./a pro Einwohner/-in reduzieren, wobei hierbei, wie bereits erwähnt, noch die Grauen Emissionen der baukonstruktiven Elemente und rund 17 % der Wohngebäude fehlen. Das Ziel der LHM ist jedoch, die Reduktion der Emissionen pro Kopf, insgesamt über alle Sektoren hinweg, auf 0,3 t CO<sub>2</sub>-Äq./a pro Einwohner/-in zu reduzieren.

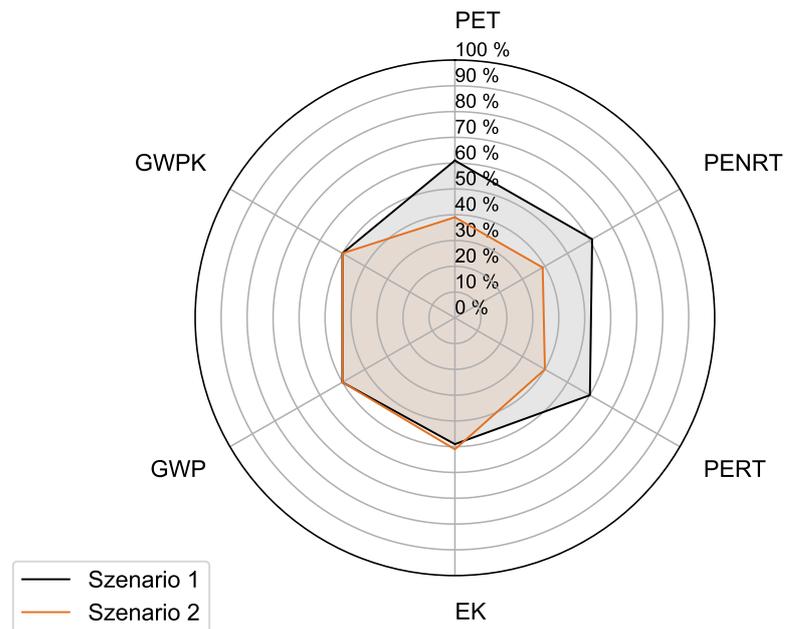
<sup>3</sup> Wird über die durchschnittlich pro Person in München bewohnte Wohnfläche von 39 m<sup>2</sup> [197] die Personenanzahl der rund 115.000 Wohngebäude in München berechnet, dann resultiert daraus ein höherer Wert als von der LHM publiziert [198] wurde. In dieser Arbeit wird die von der LHM definierte Personenzahl für die Berechnungen herangezogen.

Die gleiche Berechnung lässt sich auch für alle anderen Indikatoren durchführen (siehe Tabelle 4.51).

**Tabelle 4.51.:** Indikatorwerte pro Kopf und Jahr für das Szenario 2 - Stadt München

Bewertungsparameter	Pro Einwohner/-in und Jahr
PET [kWh]	1.122
PENRT [kWh]	602
PERT [kWh]	520
Energie-/Komponentenkosten [€]	821
GWP [t CO <sub>2</sub> -Äq.]	0,55
GWP-Kosten [€]	32

Die Abbildung 4.47 zeigt die in Tabelle 4.50 auf Seite 184 aufgeführten Werte in normierter Form im Verhältnis zueinander auf. Hieraus lässt sich klar erkennen, dass Szenario 2, bezogen auf die PET gegenüber Szenario 1 zu favorisieren ist. Beim GWP und bei den Kosten ergeben sich lebenszyklusbasiert keine markanten Unterschiede. Das führt zu der Schlussfolgerung, dass in Bezug auf die Klimaneutralität keines der beiden Szenarien bevorzugt werden kann, dass jedoch in Anbetracht des gesamten hier aufgezeigten Entscheidungsraums, Szenario 2 präferiert werden sollte; dies vor allem in Bezug auf den Einsatz energetischer Ressourcen.



**Abbildung 4.47.:** Absolute Indikatorwerte (normiert) über 50 Jahre, Vergleich von Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadt München (eigene Abbildung)

#### 4.3.4. Fazit Stadtebene

Zur Erreichung des von der LHM gesteckten Ziels der Klimaneutralität bis 2035 müssen somit entweder deutlich straffere Maßnahmenpläne oder effizientere Treibhausgas-Kompensationsmaßnahmen erarbeitet werden. Das ist nötig, um die Menge von rund 42 Mrd. kg CO<sub>2</sub>-Äq. über 50 Jahre zu kompensieren. Hierbei bedarf es z. B. bei einer Kompensationsleistung von elf t CO<sub>2</sub> pro Hektar Bannwald und Jahr [199] einer Fläche von 763 Quadratkilometern, die über die gesamten 50 Jahre Kohlenstoff binden müsste. Diese Fläche entspricht dem 2,46-fachen der Fläche Münchens. Hiermit wären dann theoretisch die CO<sub>2</sub>-Emissionen kompensiert, der energetische und stoffliche Ressourcenverbrauch jedoch nicht.

Dadurch, dass die Nutzungsphase über 50 Jahre hinweg trotz der ambitionierten Sanierung immer noch für den Großteil der Emissionen, des Primärenergiebedarfs und der Kosten verantwortlich ist, ist es unumgänglich, auf 100 % Erneuerbare Energien zur Wärmeversorgung zu setzen. Die Ergebnisse haben zudem gezeigt, dass verschiedenste Parameter und Indikatoren voneinander abhängen und sich gegenseitig beeinflussen. Die Reduktion eines Parameters oder Indikators kann zur Steigerung eines anderen führen. Die erarbeitete Methode gibt Aufschluss über diese Zusammenhänge und kann als Grundlage für Optimierungs- und Entwicklungsstrategien auf städtischer Ebene genutzt werden. Die lebenszyklusbasierte Klimaneutralität im Gebäudesektor stellt eine große Herausforderung auf Bundes-, Landes- sowie kommunaler, aber auch privater Ebene dar und muss von allen Instanzen und Entscheidungsträgern schnellstmöglich thematisiert und umgesetzt werden.

Eine klimaneutrale Stadt beginnt dort, wo tiefgreifende und zukunftsweisende Konzepte erarbeitet, berechnet, analysiert und optimiert werden sowie lebenszyklusbasierte Betrachtungen und Bewertungen Eingang in sozial-politische und planerische Gremien finden.

#### 4.4. Übertragbarkeit der Methode auf Stadtebene

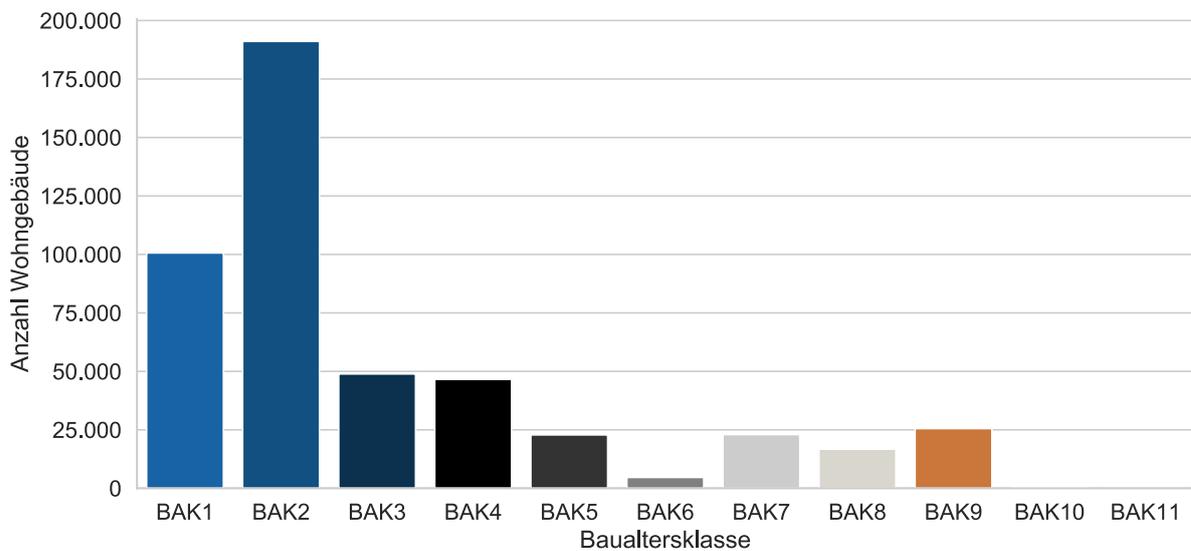
Die Anwendung der Methode auf ein weiteres Fallbeispiel zeigt die Übertragbarkeit der Methode auf beliebige Städte auf, für die ein semantisches 3D-Stadtmodell im CityGML-Format (LoD2) zur Verfügung steht. In diesem Beispiel wird die Anwendung der Methode auf die Wohngebäude der Stadt New York übertragen.

Dabei muss angemerkt werden, dass die in dieser Arbeit entwickelte Methode hauptsächlich auf deutschen Normen basiert. Die Validierung in Kapitel 4 hat jedoch gezeigt, dass sich die grundlegenden bauphysikalischen Herangehensweisen zwischen den deutschen und anderen europäischen und außereuropäischen Normen sowie bei dynamischen Gebäudesimulationen nicht unterscheiden [172]. Diese Thematik wurde auch im Rahmen des EU-Forschungsprojekts *EERAdata* (siehe Kapitel 2.1) [28] mit internationalen Experten diskutiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die hier entwickelte Methode auch auf internationaler Ebene dazu eignet, valide Ergebnisse zu erzielen.

Da sich die Herangehensweise der Auswertung des Fallbeispiels New York City (NYC) der des Fallbeispiels München gleicht, werden im Rahmen dieses Kapitels die wichtigsten lebenszyklusbasierten Indikatorergebnisse sowohl für den Status quo als auch für die beiden Entwicklungsszenarien für NYC dargestellt und analysiert. Auf Basis der aufgezeigten Werte können übergeordnete Erkenntnisse abgeleitet und die Übertragbarkeit der Methode aufgezeigt werden.

#### 4.4.1. Definition Fallbeispiel Übertragbarkeit Stadtebene

Insgesamt werden 480.575 Wohngebäude im Stadtgebiet NYC (Stand der CityGML-Datei: Jahr 2014) für die LCA und LCC herangezogen. Diese Auswahl bezieht sich auf alle Wohngebäude, für die die nötigen Input-Daten für die Berechnungen im 3D-Stadtmodell vorhanden sind. Im gesamten Stadtgebiet NYC sind im dazugehörigen 3D-Stadtmodell rund 800.000 Gebäude als Wohngebäude klassifiziert. Im Rahmen der Berechnungen werden somit rund 60 % aller Wohngebäude NYCs berücksichtigt. Diese Wohngebäude unterteilen sich nach der in Tabelle A.1 in Anhang A (Seite 249) definierten Klassifizierung auf die in Abbildung 4.48 aufgeführten Baualtersklassen. Die meisten Gebäude entfallen mit 40 % auf die BAK2, gefolgt von der BAK1 mit 20 %. Im Vergleich zu München drücken diese Zahlen einen wesentlich älteren Gebäudebestand aus. Allerdings sind auch im 3D-Stadtmodell NYCs keine flächendeckenden, gebäudespezifischen Informationen zum Sanierungsstand der Wohngebäude enthalten.



**Abbildung 4.48.:** Verteilung der Baualtersklassen der Wohngebäude - New York City (eigene Abbildung)

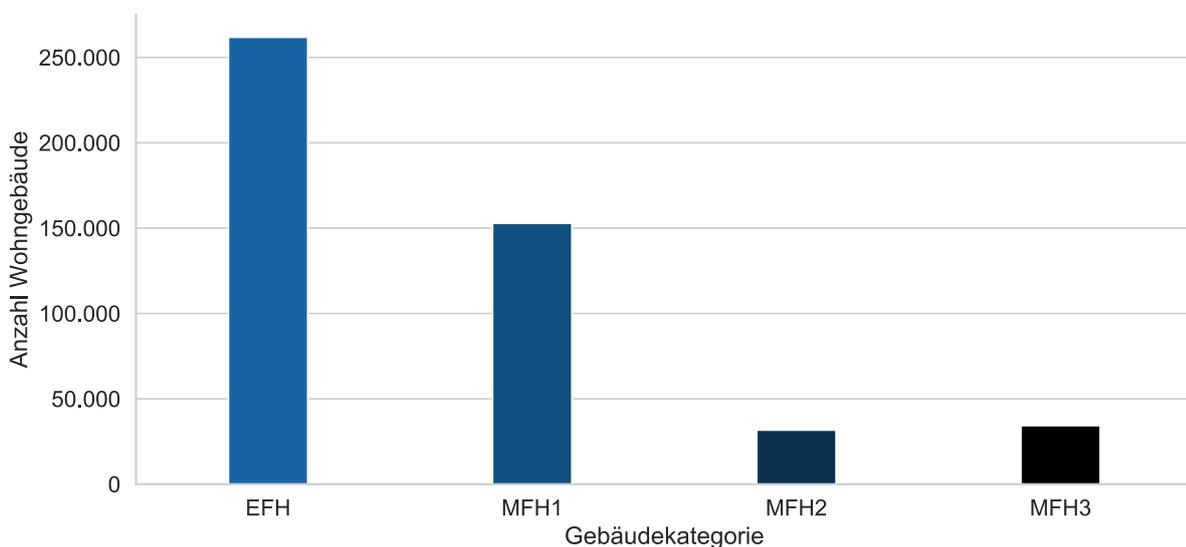
Für den Wohngebäudebestand in NYC ergeben sich je Gebäude folgende Durchschnittswerte:

- $\emptyset$  Wohnfläche: 459 m<sup>2</sup>
- $\emptyset$  Grundfläche: 131 m<sup>2</sup>
- $\emptyset$  Volumen: 1.378 m<sup>3</sup>
- $\emptyset$  Geschosshöhe je Gebäude: 3,6 m
- $\emptyset$  Gebäudehöhe: 10 m
- $\emptyset$  Geschossanzahl: 3

Die Stadtverwaltung NYCs definiert jedoch eigene Gebäudekategorien zur Klassifizierung ihrer Gebäude. Für Wohngebäude werden hier vier verschiedene Kategorien angeführt [200]:

- Einfamilienhäuser mit beliebigem Baujahr (EFH)
- Mehrfamilienhäuser mit Baujahr  $\leq$  1945 (MFH1)
- Mehrfamilienhäuser mit Baujahr  $>$  1945 und  $\leq$  1980 (MFH2)
- Mehrfamilienhäuser mit Baujahr  $>$  1980 (MFH3)

Die Unterteilung der 480.575 Wohngebäude in diese Kategorien wird in Abbildung 4.49 aufgezeigt.



**Abbildung 4.49.:** Verteilung der Anzahl der Wohnhäuser auf die Gebäudekategorien - New York City (eigene Abbildung)

Der Vergleich mit den Werten der Wohngebäude der Stadt München (siehe Kapitel 4.2.1) zeigt, dass die Gebäude Münchens im Durchschnitt für alle Parameter höhere Werte aufzeigen, jedoch nicht bei der Geschosshöhe. Durch die geringere Geschosanzahl ergeben sich in NYC höhere Geschosshöhen je Gebäude.

In NYC sind Wohngebäude für rund 70 % des gesamten Endenergieverbrauchs verantwortlich. Die daraus resultierenden Emissionen machen 75 % am gesamten Emissionsaufkommen der Stadt aus. Zur Reduktion dieser Werte definiert die Stadt das „80 x 50“ Ziel. Das bedeutet, dass eine Einsparung von 80 % an Emissionen bis zum Jahr 2050 erreicht werden soll. Die Einsparung ergibt sich aus dem Vergleich zu den Emissionen aus dem Jahr 2005. Hierfür müssen laut der Stadtverwaltung fast alle bestehenden Gebäude in der Stadt umgerüstet und saniert werden, um energieeffizienter zu werden und um Erneuerbare Energien zu nutzen [200].

#### 4.4.2. Definition Berechnungsparameter Übertragbarkeit Stadtebene

Die Energiesystemverteilung für den Status quo sowie für die Entwicklungsszenarien 1 und 2 werden in Tabelle 4.52 aufgeführt. Der Zeitraum beider Entwicklungsszenarien wird auf 30 Jahre, mit Beginn im Jahr 2020, angesetzt. Ende des Jahres 2050 sind somit alle Gebäude auf den definierten energetischen Standard saniert. Die durchschnittliche Lebensdauer der Gebäude nach der Sanierung wird mit 50 Jahren angenommen. Gleich wie beim Fallbeispiel München werden auch bei der Sanierung der Wohngebäude NYCs zuerst die Gebäude berücksichtigt, die die höchsten Werte im dreidimensionalen Entscheidungsraum zwischen Baujahr, spezifischem und absoluten Primärenergiebedarf aufweisen. Für das Szenario 1 ist eine Deckung der Heizwärme zu 100 % durch ein Fernwärmenetz angedacht. Beim TWW kommt zudem Solarthermie zum Einsatz. In Szenario 2 wird zu 100 % auf die Erzeugung der Heizwärme aus Strom gesetzt. Es wird von einem erneuerbaren Anteil von 95 % im Strom-Mix ausgegangen. Beim TWW kommen ebenfalls Solarthermieanlagen zum Einsatz.

**Tabelle 4.52.:** Prozentuale Definition der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City [200]

TGA-Komponente	Status quo [%]	Szenario 1 [%]	Szenario 2 [%]
Gas-Kessel - Heizen	53	-	-
Öl-Kessel - Heizen	18	-	-
Fernwärme - Heizen	4	100	-
Elektroheizungen - Heizen	25	-	100
Gas-Kessel - TWW	53	-	-
Öl-Kessel - TWW	18	-	-
Durchlauferhitzer - TWW	25	-	40
Fernwärme - TWW	4	40	-
Solarthermie - TWW	-	60	60
Radiatoren	90	-	-
Fußbodenheizung	10	100	100

Tabelle 4.53 zeigt die durchschnittliche Lebensdauer aller betrachteten Komponenten. Die durchschnittliche Lebensdauer entspricht dabei den deutschen Vorgaben [168]. Bei der Betrachtung der TGA-Komponenten wird ein Zuschlagsfaktor von 1,2 mitberücksichtigt, der nicht im Detail mitbilanzierte TGA-Komponenten, wie beim Fallbeispiel der LHM, pauschal mit einschließt.

**Tabelle 4.53.:** Definition der Lebensdauer der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City

TGA-Komponente	Status quo [a]	Szenario 1 [a]	Szenario 2 [a]
Gas-Kessel	20	-	-
Öl-Kessel	20	-	-
Fernwärme	20	20	-
Elektroheizung	20	-	20
Durchlauferhitzer TWW	15	-	15
Solarthermie TWW	-	20	20
Radiatoren	30	-	-
Fußbodenheizung	30	30	30
Warmwasserspeicher	20	20	20
Heizleitungen	25	25	25
Trinkwarmwasserleitungen	25	25	25
Leitungsisolierung	20	20	20
Öl-Tank	30	-	-

Die Tabelle 4.54 listet die Primärenergiefaktoren zur Berechnung der PET in allen betrachteten Szenarien auf. Die Primärenergiefaktoren für den Status quo sowie die Reduktionen für die Entwicklungsszenarien werden der Studie von Dixit et al. [201] entnommen. Daraus ergibt sich eine Reduktion des Primärenergiefaktors von Fernwärme (Szenario 1) und Strom (Szenario 2) von jeweils rund 89 % im Vergleich zum Status quo.

**Tabelle 4.54.:** Primärenergiefaktoren für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City (Quelle: [201])

Primärenergiequelle	Status quo [-]	Szenario 1 [-]	Szenario 2 [-]
Gas	1,1	-	-
Öl	1,1	-	-
Fernwärme	1,0	0,11	1,0
Strom	3,2	2,5	0,35

Die Tabelle 4.55 definiert die nicht-erneuerbaren und erneuerbaren Anteile in Bezug auf die Primärenergiequelle [202][203].

**Tabelle 4.55.:** Nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Anteil an Primärenergiequellen für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City

Primärenergiequelle	Status quo [%]	Szenario 1 [%]	Szenario 2 [%]
	nicht-erneuerbar/ erneuerbar	nicht-erneuerbar/ erneuerbar	nicht-erneuerbar/ erneuerbar
Gas	90/10	-	-
Öl	100/0	-	-
Fernwärme	80/20	5/95	80/20
Strom	85/15	70/30	5/95

Für die kostenbezogene Bewertung des Endenergiebedarfs sowie der Emissionen werden Kostenwerte für das Jahr 2020 in der Tabelle 4.56 definiert. Zu diesen Kosten kommen im zeitlichen Verlauf über das Entwicklungsszenario bzw. über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude hinweg jährliche Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze bei der Berechnung hinzu. Die in Tabelle 4.56 aufgeführten Kostenwerte wurden auf Basis des Wechselkurses vom 12.12.2020 von US-Dollar in Euro (ca. 0,87 \$/€) umgerechnet. Die Kostenwerte für Strom und Gas basieren auf publizierten Werten des *U.S. Bureau of Labor Statistics* [204] und die Werte für Öl auf Angaben des *New York States* [205]. In Deutschland liegt der Preis für Fernwärme im Mittel 46 % über den Preisen der anderen Energiequellen. Da keine spezifischen Kostenwerte für die Fernwärme in NYC veröffentlicht sind, wird diese prozentuale Verteilung für die Berechnungen der Fernwärmekosten angenommen. Der Wert für die CO<sub>2</sub>-Kosten ergibt sich aus einer Publikation der *New York Times* [206].

**Tabelle 4.56.:** Kostenwerte der Endenergie und des GWPs für den Status quo - New York City

Endenergie/Emissionen	Status quo
Gas	0,034 €/kWh
Öl	0,055 €/kWh
Fernwärme	0,13 €/kWh
Strom	0,17 €/kWh
GWP	13 €/t

In Bezug auf die Energiekosten wird eine Preissteigerung von jährlich 5 % und bei den TGA-Komponentenkosten eine Steigerung von jährlich 2 % angenommen. Der Kalkulationszinssatz von 1,5 % bleibt für alle Szenarien derselbe. Bei den LCC-Preisen für die TGA-Komponenten wird ein Aufschlagsfaktor von 1,8 miteinbezogen. Dieser schließt sowohl nicht mitberücksichtigte TGA-Komponenten als auch bspw. Personalkosten mit ein. Hinzu kommt ein ortsbezogener Kostenfaktor von 1,5, der zusätzlich zum Aufschlagsfaktor dazugerechnet wird. Die sich auf die Gebäudekategorien beziehenden U-Werte der Baukonstruktionen für den Status quo der Szenarien 1 und 2 sind in Tabelle 4.57 auf Seite 192 definiert und orientieren sich an den angegebenen Werten der Hochschule

für Technik (HFT) Stuttgart [207]. An der HFT Stuttgart wurden bereits Untersuchungen digitaler Stadtmodelle von NYC durchgeführt [208]. Die U-Werte nach der Sanierung in Szenario 1 und 2 sind gleich und ergeben sich aus einer Studie der *City of New York* [209]. Die g-Werte der Fenster orientieren sich an den für Deutschland definierten Werten (siehe Kapitel 3.4.1).

**Tabelle 4.57.:** U-Werte der Gebäudekomponenten für den Status quo sowie für Szenario 1 und 2 - New York City (Quellen: [203][207])

Gebäudekomponente je BAK	Status quo [W/m <sup>2</sup> *K]	Szenario 1 [W/m <sup>2</sup> *K]	Szenario 2 [W/m <sup>2</sup> *K]
Außenwand (EFH)	1,14	0,38	0,38
Außenwand (MFH1)	1,14	0,38	0,38
Außenwand (MFH2)	1,14	0,38	0,38
Außenwand (MFH3)	0,95	0,38	0,38
Dach (EFH)	0,38	0,12	0,12
Dach (MFH1)	0,47	0,12	0,12
Dach (MFH2)	0,47	0,12	0,12
Dach (MFH3)	0,3	0,12	0,12
Bodenplatte (EFH)	1,12	0,19	0,19
Bodenplatte (MFH1)	1,12	0,19	0,19
Bodenplatte (MFH2)	1,12	0,19	0,19
Bodenplatte (MFH3)	1,12	0,19	0,19
Fenster (EFH)	4,93	2,27	2,27
Fenster (MFH1)	4,99	2,27	2,27
Fenster (MFH2)	4,99	2,27	2,27
Fenster (MFH3)	4,49	2,27	2,27

Für die Berechnung der Heizenergiebedarfe wird eine Heizgradtagzahl  $G_t$  mit einem Wert von 4.565 festgelegt [210]. Aus der Formel 3.7 (siehe Seite 41) ergibt sich ein Gradtagzahlfaktor  $F_{GT}$  von 104, der für alle Berechnungen herangezogen wird. Zudem wird für die Heizlastberechnung eine durchschnittliche Mindesttemperatur von -14,4 °C [211] und eine Durchschnittstemperatur von 13,4 °C angenommen (Durchschnitt der letzten 10 Jahre) [212].

#### 4.4.3. Berechnungsergebnisse Übertragbarkeit Stadtebene

##### Status quo

Die anhand der definierten Annahmen durchgeführten Berechnungen ergeben die in Tabelle 4.58 auf Seite 193 dargestellten Ergebnisse. Bis auf die Heizlast spiegeln die aufgeführten Werte jahresbezogene Bedarfs-, Emissions- und Kostenwerte wider. Der ältere Gebäudebestand NYCs bedingt im Vergleich zu München eine um 49 % höhere Heizlast und einen um 29 % höheren Endenergiebedarf. Zudem ergibt sich in Bezug auf die PET für NYC ein um 84 % höherer Wert. Das ist hauptsächlich dem zuzuschreiben, dass in NYC bei 25 % der Gebäude Strom mit einem Primärenergiefaktor von 3,2 für Raumheizung und TWW verwendet wird. Dadurch, dass hier der Strom zu 80 % und Gas

zu 90 % aus nicht-erneuerbaren Quellen gewonnen wird, zeigt sich eine klare Verteilung hin zu der PENRT. Trotz niedrigerer Preise für Strom und Gas in NYC fallen im Vergleich zu München 62 % höhere Energiekosten an, verursacht durch den höheren Endenergiebedarf und durch höhere Kosten für Öl und Fernwärme. Da in NYC über die Gesamtheit aller Energiequellen hinweg 65 % weniger Erneuerbare Energien Einsatz finden, ergibt sich für die Stadt ein 56 % höherer Wert an GWP als in München. Dennoch entstehen für NYC 13 % geringere GWP-Kosten, was an den 48 % niedrigeren Emissionskosten liegt.

**Tabelle 4.58.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für den Status quo - New York City

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>
Heizlast [kW]	49.809.059	104	0,25
Endenergiebedarf [kWh/a]	56.047.662.238	116.626	276
PET [kWh/a]	91.658.125.782	190.726	451
PENRT [kWh/a]	77.772.260.912	161.832	382
PERT [kWh/a]	13.885.864.869	28.894	69
Energiekosten [€/a]	4.326.783.165	9.003	21
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	16.556.118.081	34.451	81
GWP-Kosten [€/a]	215.231.112	448	1,08

## Szenario 1

Werden die Gebäude, beginnend ab 2020, über 30 Jahre hinweg bis Ende des Jahre 2050 auf den für Szenario 1 definierten energetischen Standard saniert, dann ergeben sich ab dem Jahr 2051 die in der Tabelle 4.59 aufgezeigten jährlichen Bedarfs-, Emissions- und Kostenwerte. In Szenario 1 wird jedes Gebäude an das Fernwärmenetz angeschlossen, worüber 100 % der Raumheizung und 40 % des TWW abgedeckt werden. Anhand von Solarthermie werden die restlichen 60 % des TWW versorgt.

**Tabelle 4.59.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 1 im Vergleich zum Status quo ( $\Delta$  SQ/S1) - New York City

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ SQ/S1
Heizlast [kW]	18.970.286	39	0,09	-64 %
Endenergiebedarf [kWh/a]	17.943.918.508	37.338	88	-68 %
PET [kWh/a]	2.382.375.051	4.957	12	-97 %
PENRT [kWh/a]	122.816.464	235	0,6	-99 %
PERT [kWh/a]	2.269.558.587	4.723	11	-84 %
Energiekosten [€/a]	5.906.527.507	12.291	29	38 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	1.905.371.800	3.965	9	-89 %
GWP-Kosten [€/a]	66.206.246	138	0,3	-73 %

Der Vergleich mit dem Status quo zeigt, außer bei den Energiekosten, eine Einsparung in jedem Betrachtungshorizont auf. Die größte Einsparung zeigt der PENRT auf; wobei der nicht-erneuerbare Anteil an Fernwärme von 80 % auf 5 % sinkt. Trotz einer Reduktion des Endenergiebedarfs um 68 % steigen die Energiekosten um 38 %. Das ist beim Beispiel München nicht der Fall. Grund hierfür ist zum einen, dass die Kosten für eine Kilowattstunde Fernwärme in NYC um 46 % höher liegen als in München und zum anderen, dass beim Beispiel München der Entwicklungszeitraum auf zehn Jahre angesetzt wird. Nur für diesen Zeitraum werden Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze berücksichtigt. Im Falle von NYC kommen 20 weitere Jahre mit Preissteigerungen und Kalkulationszinssätzen zum Tragen, die eine deutliche Auswirkung auf das Endergebnis haben. Generell liegen die Werte nach der Sanierung für München um 31 % niedriger als die für NYC. Ein Hauptgrund dafür sind die für NYC um rund 15 % höheren U-Werte in Szenario 1, verglichen mit den Szenarien für München. Nichtsdestotrotz kann in Bezug auf die Nutzungsphase eine Reduktion der Emissionen von 89 % bis zum Ende des Jahres 2050 erreicht werden. Obwohl bei dieser Berechnung das Vergleichsjahr 2014 und nicht wie von der Stadt NYC definiert das Jahr 2005 das Vergleichsjahr ist, ist davon auszugehen, dass durch die Umsetzung von Szenario 1 eine Reduktion des GWP von mindestens 80 % zwischen 2005 und 2050 zu erreichen ist.

Werden alle Energiebedarfe, Emissionen und Kosten über den gesamten Entwicklungszeitraum und Lebenszyklus aller Gebäude von 50 Jahren mit eingerechnet, dann ergeben sich daraus die in der Tabelle 4.60 aufgeführten Werte. Die quadratmeterspezifischen Werte für München liegen im Durchschnitt um 77 % unter den Werten für NYC.

Das lässt sich hauptsächlich darauf zurückführen, dass der Entwicklungszeitraum für NYC um 20 Jahre länger ist als der im Beispiel München. In den Jahren des Entwicklungszeitraums fallen die noch unsanierten Gebäude mit ihren Energiebedarfen und ihrem Emissionsausstoß stark ins Gewicht. Dadurch, dass dieser Zeitraum in München um 15 Jahre kürzer ist, ergeben sich dementsprechend geringere Werte. Zudem liegen die jährlichen Bedarfs-, Emissions- und Kostenwerte in NYC im Mittel um 31 % höher als in München. Um eine signifikante Reduktion der lebenszyklusbasierten Indikatorwerte zu erreichen, ist es folglich notwendig, einen möglichst kurzen Entwicklungszeitraum mit maximaler Sanierungsquote umzusetzen.

**Tabelle 4.60.:** Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 1 - New York City

<b>Bewertungsparameter</b>	<b>Absolut</b>	<b>Ø Gebäude</b>	<b>Ø m<sup>2</sup></b>
PET [kWh]	1.415.102.161.000	2.944.602	6.956
PENRT [kWh]	1.007.976.550.000	2.097.439	4.955
PERT [kWh]	407.125.611.000	847.164	2.001
Gesamtkosten [€]	609.508.040.000	1.268.289	2.996
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	705.962	371.549	1.668
GWP-Kosten [€]	9.282.864.150	19.316	46

## Szenario 2

Die Tabelle 4.61 zeigt die jährlichen Bedarfs-, Emissions- und Kostenwerte NYCs zu Szenario 2 auf. Im Vergleich zum Status quo lässt sich durch die Sanierung aller Wohngebäude, auf den für Szenario 2 definierten energetischen Standard, eine durchschnittliche Einsparung der Indikatoren von 56 % erzielen. Identisch zu Szenario 1 wird auch bei Szenario 2 die größte Einsparung beim PENRT erzielt. Nur bei den Energiekosten ergibt sich keine Einsparung. Das liegt ebenfalls hauptsächlich an dem längeren Entwicklungszeitraum. Der Vergleich von Szenario 1 und 2 zeigt, dass die Indikatorwerte in Szenario 2 nochmals um 12 % unter den Werten in Szenario 1 liegen. Lediglich die Werte für die PET und den PENRT liegen in Szenario 2 über den Werten von Szenario 1. Das lässt sich vor allem mit dem um mehr als das Doppelte höheren Primärenergiefaktor für Strom im Jahr 2050, verglichen mit der Fernwärme, begründen. Bezogen auf die jährlichen Bedarfs-, Emissions- und Kostenwerte wäre ohne eine Gewichtung der Betrachtungshorizonte dennoch Szenario 2 dem Szenario 1 vorzuziehen. Auch in diesem Szenario 2 lässt sich eine Einsparung von rund 80 % der Emissionen erzielen.

**Tabelle 4.61.:** Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 2 im Vergleich mit Status quo ( $\Delta$  SQ/S2) und Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - New York City

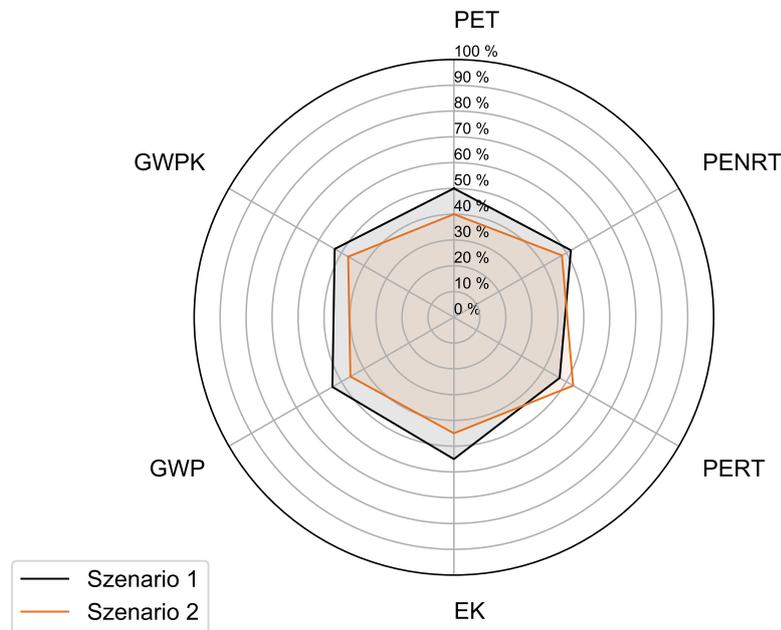
Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ SQ/S2	$\Delta$ S1/S2
Heizlast [kW]	17.122.142	36	0,08	-68 %	-11 %
Endenergiebedarf [kWh/a]	10.912.813.800	22.708	54	-80 %	-39 %
PET [kWh/a]	3.541.255.775	7.369	17	-96 %	+55 %
PENRT [kWh/a]	168.349.046	350	0,8	-99 %	+33 %
PERT [kWh/a]	3.372.906.728	7.018	17	-75 %	-55 %
Energiekosten [€/a]	4.546.728	9.461	22	+5 %	-24 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./a]	1.436.161.398	2.988	7	-91 %	-22 %
GWP-Kosten [€/a]	49.902.520	104	0,2	-82 %	-33 %

Werden die lebenszyklusbasierten Operativen und Grauen Energiebedarfe, Emissionen und Kosten aller Gebäude über 50 Jahre, inklusive des Entwicklungszeitraums, mit in die Berechnung einbezogen, dann ergeben sich daraus die in Tabelle 4.62 aufgeführten Werte.

**Tabelle 4.62.:** Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 ( $\Delta$  S1/S2) - New York City

Bewertungsparameter	Absolut	Ø Gebäude	Ø m <sup>2</sup>	$\Delta$ S1/S2
PET [kWh]	1.400.016.024.000	2.913.210	6.882	-1 %
PENRT [kWh]	936.416.831.000	1.948.534	4.603	-7 %
PERT [kWh]	463.599.193.000	964.676	2.279	+14 %
Gesamtkosten [€]	508.690.571.000	1.058.504	2.501	-17 %
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.]	291.605.446.000	606.784	1.433	-14 %
GWP-Kosten [€]	8.192.314.230	17.047	40	-13 %

Im Vergleich zu Szenario 1 liegen die Werte für Szenario 2 im Durchschnitt um 6 % niedriger. Ausgenommen von dem PERT liegen die Werte in jedem Betrachtungshorizont in Szenario 2 unter denen von Szenario 1. Die Abbildung 4.50 zeigt den Vergleich der absoluten Ergebnisse von Szenario 1 und 2 im normierten, relativen Vergleich zueinander auf. Basierend hierauf wäre Szenario 2 als Entwicklungsszenario zu priorisieren.



**Abbildung 4.50.:** Absolute Indikatorwerte (normiert) über 50 Jahre, Vergleich von Status quo mit Szenario 1 und 2 - New York City (eigene Abbildung)

Der Vergleich der Werte des Grauen Anteils für München und NYC zeigt, dass die Werte für München im Durchschnitt um 31 % niedriger liegen. Beim Operativen Anteil liegen die Werte um 51 % unter denen von NYC. Zudem fällt auf, dass die GWP-Kosten in NYC um die Hälfte niedriger sind als in München. Trotz höherem GWP in NYC ist das auf die niedrigeren Emissionskosten in NYC zurückzuführen. Diese niedrigeren Emissionskosten wirken sich auch auf die Kosten für den Operativen Anteil aus. Trotz 54 % geringerem Operativem GWP für München, fallen die Kosten für München um 54 % höher aus. Dabei wurden für beide Städte dieselben Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze angenommen.

#### 4.4.4. Fazit Übertragbarkeit Stadtebene

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse für NYC im Vergleich zu München im Durchschnitt deutlich höher ausfallen. Zum großen Teil trägt dazu der um 15 Jahre längere Entwicklungszeitraum, definiert für NYC, bei. Die Ergebnisse und die auftretenden Unterschiede zwischen NYC und München lassen sich logisch erklären und beschreiben. Die Ergebnisse der Betrachtung der 480.575 Wohngebäude der Stadt NYC zeigen, im Kontext der getroffenen Definition zur Durchführung der Berechnung des Status quo und der beiden Entwicklungsszenarien, plausible Werte auf. Hiermit lässt sich der Mehrwert der Methode belegen und die Übertragbarkeit darstellen.

**Kurzfassung der Anwendung und Validierung der Methode anhand von Fallbeispielen:**

- Die entwickelte Methode und urbi+ lassen sich sowohl auf Einzelgebäude als auch auf große Gebäudebestände (z. B. Stadtquartiere und Städte) anwenden.
- Die Anwendbarkeit beschränkt sich dabei nicht auf Gebäudebestände in Deutschland, sondern es können mit gewissen Unschärfen weltweit beliebige Gebäudebestände, zu denen ein 3D-Stadtmodell im CityGML-Standard in Level of Detail (LoD)2 vorliegt, analysiert werden.
- Die aus der Anwendung auf Ebene der Einzelgebäude resultierenden Ergebnisse zur Bewertung des Status quo sowie von Entwicklungs- bzw. Sanierungsszenarien sind mit Ergebnissen aus etablierten Softwarelösungen und bereits publizierten Forschungsarbeiten validiert. Die Validierung ist auch für die Ergebnisse auf Stadtquartiers- und Stadtebene gültig, da hierbei die Anwendung auf Einzelgebäudeebene iterativ über den betrachteten Gebäudebestand durchgeführt wird.
- Der Einfluss getroffener Annahmen zur Kompensation fehlender Informationen und Daten auf Basis großer Gebäudebestände wird auf Stadtquartiersebene anhand von Unsicherheitsanalysen untersucht.
- Die größten Unsicherheiten in Bezug auf die lebenszyklusbasierten Ergebnisse ergeben sich aus den Annahmen zur durchschnittlichen Lebensdauer der Gebäude und den Annahmen zum Umfang der darin verbauten TGA-Komponenten.
- Die Ergebnisse der LCA zeigen auf, dass durch die Durchführung von Entwicklungsszenarien hohe Einsparungen im lebenszyklusbasierten Energiebedarf und Emissionsaufkommen erzielt werden können.
- Auf Stadtebene lassen sich in Bezug auf die im Rahmen dieser Arbeit berechneten Entwicklungsszenarien bspw. Einsparungen beim Energiebedarf von rund 77 % und bei den Emissionen von rund 80 % erzielen.
- Aus den Ergebnissen der LCC resultiert ebenfalls eine deutliche Reduktion der lebenszyklusbasierten Kosten. Allerdings amortisieren sich die für die Sanierung der TGA-Komponenten aufgewendeten Kosten nicht. Das liegt daran, dass die durch die Sanierung erzielte Einsparung niedriger ist als die jährliche Preissteigerung der Energiekosten.
- Die LCA-Phase, die den Austausch und Ersatz (B4) von TGA-Komponenten berücksichtigt, fällt am stärksten ins Gewicht. Hierbei sollte deshalb auf die Auswahl langlebiger Systeme und Komponenten geachtet werden.
- Die folgenden TGA-Komponenten führen zu den höchsten Energiebedarfen und Emissionen bei der LCA: Wärmeerzeuger, Fußbodenheizung und Warmwasserspeicher. Bei der LCC sind es hauptsächlich die Wärmeerzeuger, Radiatoren, Heizungsrohre und Warmwasserspeicher.
- Trotz ambitionierter Entwicklungsszenarien ergeben sich nach wie vor in Bezug auf das Ziel der Klimaneutralität hohe Energiebedarfe und Emissionsaufkommen. LCAs müssen als Werkzeug in Planungsprozesse miteingebunden werden, um Energiebedarfe und Emissionen zu reduzieren und Potenzial für darauf aufbauende Kompensationsmaßnahmen aufzuzeigen.



## **Teil IV**

# **Zusammenfassung, Fazit und Ausblick**



## 5. Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methode und das daraus entstandene Softwareprogramm urbi+ erlauben lebenszyklusbasierte energetische, emissions- und kostenbezogene Betrachtungen anhand der zur Verfügung stehenden Datengrundlagen auf der Basis großer Gebäudebestände. Unter Berücksichtigung aller getroffenen Annahmen resultieren die Berechnungen und Analysen in korrekten und vor allem auch nutzbaren Ergebnissen. Die Methode und entsprechend urbi+ erweitern den Bewertungshorizont über die Nutzungsphase der Gebäude hinaus und bringen dabei die verschiedenen Bewertungshorizonte in einen Zusammenhang. Daraus eröffnen sich bislang nicht verfügbare Möglichkeiten zur Bewertung und Analyse großer Gebäudebestände und zur Entwicklung und Untersuchung darauf aufbauender Entwicklungsszenarien.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich deutlich die Wichtigkeit der Durchführung lebenszyklusbasierter Analysen auf der Basis großer Gebäudebestände und deren Integration in politische und stadtplanerische Entwicklungskonzepte erkennen.

- Ohne die Durchführung von Lebenszyklusanalysen (LCAs) werden ein Großteil der lebenszyklusbasierten Energien, Emissionen und Kosten bei der Gebäudebewertung vernachlässigt.
- Mit der entwickelten Methode und urbi+ sind lebenszyklusbasierte energetische, emissions- und kostenbezogene Analysen auf der Basis der bislang zur Verfügung stehenden Informationen aus 3D-Stadtmodellen möglich. Die Analysen resultieren in neuen Erkenntnissen zu lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bilanzen von großen Wohngebäudebeständen.
- Die Ergebnisse zeigen, dass sich trotz ambitionierter Sanierungsszenarien lebenszyklusbasiert beachtliche Energiebedarfe und daraus resultierende Emissionen ergeben.
- LCAs müssen als Grundlage zur Entwicklung von Konzepten zur Erreichung der Klimaneutralität, bswp. durch lokale Kompensationsmaßnahmen, durchgeführt werden.
- Semantische 3D-Stadtmodelle bieten nicht nur für diese und weiterführende Analysen eine fundierte und zukunftsorientierte Basis, sondern eignen sich zudem als Grundlage zum gebäudebezogenen Datenmonitoring für große Gebäudebestände.

Die aus der Anwendung der Methode bzw. urbi+ erwachsene hohe Anzahl an Ergebniswerten eröffnet ein breites Feld an Analysemöglichkeiten, die sich stark in ihren Anwendungsfällen und vor allem in Hinblick auf die Zieldefinition unterscheiden. Das spielt explizit dann eine wichtige Rolle, wenn nicht nur die Bewertung des Status quo des Gebäudebestandes, sondern insbesondere auch die unterschiedlichen möglichen Entwicklungsszenarien in die Betrachtung aufgenommen werden.

Die Ergebnisse erlauben Planenden verschiedenste gebäudebezogene Entwicklungsszenarien lebenszyklusbasiert zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Diese können als Grundlage für weiterführende Optimierungen und Untersuchungen dienen. Für die Durchführung der Entwicklungsszenarien sind dann zusätzliche Definitionen von Input-Parametern vonnöten, die einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz der Ergebnisse haben können.

Die im Rahmen dieser Dissertation präsentierten Berechnungen und Analysen zielen in einem ersten Schritt darauf ab, den entwickelten methodischen Kern der LCA der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) auf der Basis digitaler Gebäudemodelle zu validieren und dessen korrekte Umsetzung und Anwendung aufzuzeigen. Darauf aufbauend lassen die Berechnungen und Analysen erkennen, wie wichtig die Implementierung der Themenfelder LCA und Lebenszykluskostenanalyse (LCC) auf städtischer Ebene ist, um eine nachhaltige urbane Entwicklung anzustoßen.

Die durchgeführten Berechnungen und Analysen geben Aufschluss über die Heizlast, den Heizenergiebedarf (Nutz-, End- und Primärenergie) und die daraus resultierenden Emissionen und Kosten. Zudem wird die Dimensionierung aller betrachteten Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und die in Bezug auf diese Komponenten anfallende/n Graue Energie, Grauen Emissionen und Grauen Kosten auf Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtebene miteinbezogen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Berechnung und Analyse großer Gebäudebestände. Dies wird durch die Nutzung semantischer 3D-Stadtmodelle möglich, die die Anwendung der Methode auf beliebig große Gebäudebestände erlaubt, insofern die hierfür notwendigen Daten zur Verfügung stehen.

Mit konkretem Bezug zu den Ergebnissen der Stadtquartiers- und Stadtbetrachtung lassen sich die folgenden erarbeiteten Erkenntnisse zusammenfassen:

- Durch die Anwendung der Entwicklungsszenarien bzw. den dabei durchzuführenden Sanierungen lässt sich eine Reduktion der Heizlast und somit auch eine Verringerung der von den Wärmeerzeugern bereitzustellenden Leistung erzielen. Eine Reduktion der Leistung kann zu einer Verkleinerung der Dimensionierung der Wärmeerzeuger führen und somit wiederum in geringeren Materialaufwendungen münden. Das führt zu einem geringeren Aufwand an Grauen Energien, Emissionen und Kosten. Zudem kann z. B. eine vorhersehbar anfallende Wärmeleistung eine wertvolle Information für Stadtwerke, Energieversorger etc. bei der Planung und Auslegung von Fernwärmenetzen darstellen.
- Durch die Sanierung auf ambitionierte Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte), die in den angeführten Entwicklungsszenarien einen KfW-55- bzw. Passivhausstandard widerspiegeln, wird eine hohe Einsparung des Endenergie- und Primärenergiebedarfs in der Nutzungsphase der Gebäude angestrebt. Trotz allem bleibt in Summe über alle Gebäude und deren gesamten Lebenszyklus hinweg noch ein beachtlicher Energiebedarf und daraus resultierende Emissionen. Der Einsatz Erneuerbarer Energien führt zu einer Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs in der Nutzungsphase der Gebäude. Beim Grauen Energiebedarf wird allerdings ein beträchtlicher Anteil aus nicht-erneuerbaren Quellen gedeckt. Bei den komponentenbezogenen Herstellungs- und Entsorgungsprozessen besteht somit ein hohes Potenzial zur

Reduktion an Grauer Energie aus nicht-erneuerbaren Quellen und zur Emissions- und Kostenreduktion. Trotz allem fallen auch beim Einsatz Erneuerbarer Energien Emissionen an, die in der Prozesskette zur Bereitstellung ihrer Energiequellen (z. B. Holz oder Fernwärme) und durch deren Betrieb entstehen. Über die gesamte Lebensdauer der Gebäude können diese sich, auch bei geringen Energiebedarfen in der Nutzungsphase, zu hohen Werten aufsummieren.

- Selbst wenn bspw. der Primärenergiefaktor von Fernwärme oder Strom bei Null liegt, fallen trotzdem in deren Bereitstellungskette Emissionen an, die emissionsbezogen zu keiner neutralen Bilanz führen (z. B. 0,008 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh bei Strom und 0,029 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh bei Fernwärme aus erneuerbaren Quellen). In Bezug auf das Szenario 2 der Stadtgebietsanalyse München, in dem alle Wohngebäude bis Ende des Jahres 2035 gemäß dem Passivhausstandard saniert werden, führt das zu lebenszyklusbasierten Emissionen von 42 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. Der Wert bezieht sich dabei auf alle betrachteten Wohngebäude über 50 Jahre, inklusive des Entwicklungszeitraums von 15 Jahren. Diese Summe entspricht laut Statista rund 5 % der jährlichen, deutschlandweiten Emissionen [213]. Daraus ergibt sich ein Wert von 0,55 t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Einwohner/-in und Jahr, bezogen auf den Sektor „Private Haushalte“. Das Emissionsziel der Landeshauptstadt München (LHM) liegt für das Jahr 2035 bei 0,3 t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Münchner/-in und Jahr, über alle Sektoren hinweg.
- Die LCC-Analysen zeigen, dass hohe lebenszyklusbasierte Komponenten- und Energiekosten anfallen, die z. B. im ambitionierten Szenario 2 auf Stadtebene München zu 821 € pro Person und Jahr anschlagen, wohingegen die Global Warming Potential (GWP)-Kosten mit 32 € pro Kopf und Jahr gering ausfallen. Soll die Strategie der Erhöhung der Sanierungsquote weiterhin verfolgt werden, bedarf es innovativer Subventions- und Finanzierungsmöglichkeiten und besonderer Anreize, die die Kostenlast senken und zum weiteren verhindern, dass die Mietpreise durch die Umverteilung von Sanierungskosten weiter steigen. Zudem muss sich eine Amortisierung der investierten Grauen Kosten über den Lebenszyklus ergeben, andernfalls bleiben derartige Investitionen für Gebäudeeigentümer/-innen unattraktiv.
- Trotz vermeintlich geringem Anteil an Grauer Energie (ca. 5 % in Szenario 2 der Stadtgebietsanalyse München) nimmt diese einen bedeutenden Anteil an der Gesamtbilanz ein, wenn bedacht wird, dass sich die hier präsentierten Ergebnisse auf die betrachteten Technische Gebäudeausrüstung (TGA)-Komponenten beziehen. Die in Summe über 50 Jahre und auf alle Gebäude anfallenden Grauen Energien würden ausreichen, um den Primärenergiebedarf der Nutzungsphase des gesamten auf Passivhausstandard sanierten Gebäudebestand Münchens für rund acht Jahre zu decken. Wird davon ausgegangen, dass die Grauen Energien der TGA-Komponenten rund 20 % an den gesamten Grauen Energien ausmachen (siehe Weißenberger [19]), dann könnte der Graue Energiebedarf so hoch ausfallen, dass der betrachtete Münchner Wohngebäudebestand auf Passivhausniveau rund 41 Jahre betrieben werden könnte. Dabei werden die Grauen Energien für die Baukonstruktion mit eingerechnet.
- Bei der Grauen Energie, den Grauen Emissionen und den Grauen Kosten der betrachteten TGA-Komponenten entfällt das meiste auf die Lebenszyklusphase Nutzung, also auf den Austausch und Ersatz von Komponenten über den Lebenszyklus des Gebäudes. Das ist der

konservativ definierten Lebensdauer der TGA-Komponenten geschuldet. Bezogen auf die Verteilung der Grauen Energie und Emissionen über die TGA-Komponenten hinweg sind die Wärmeerzeuger, die Warmwasserspeicher und die Fußbodenheizungen für den größten Anteil an Grauer Energie und Emissionen verantwortlich. Das ist hauptsächlich auf den Grad an der Technisierung und auf die Materialmasse der Komponenten zurückzuführen. Bei den Kosten sind es ebenfalls die Wärmeerzeuger, der Warmwasserspeicher und auch die Rohrleitungen, die die höchsten Grauen Kosten verursachen. Bei den Wärmeerzeugern sind vor allem über alle Indikatoren hinweg die Solarthermieanlagen für die höchsten Werte verantwortlich.

- Aus dem Vergleich der Stadtgebietsanalyse New York City mit München geht hervor, dass die Länge des gesetzten Entwicklungszeitraums einen starken Einfluss auf die lebenszyklusbasierte Gesamtbilanz haben kann. Kurze und sanierungsintensive Entwicklungsszenarien sind dabei zu bevorzugen.

Die Ergebnisse können Stadtplaner/-innen, Energieversorgern und Politiker/-innen auf verschiedenen Ebenen als Entscheidungshilfe dienen. Einzelne Gebäude und ein beliebig großes Gebäudeportfolio können durch die Betrachtungs- und Analysedimensionen Primärenergiebedarf (PENRT, PERT), GWP, GWP-Kosten und der Energie- und Komponentenkosten untersucht werden. Der zugrundeliegende lebenszyklusbasierte Ansatz ermöglicht die Unterteilung der anfallenden Indikatorwerte auf verschiedene LCA-Phasen und im Falle der Grauen Energien, Emissionen und Kosten auf die einzelnen betrachteten TGA-Komponenten. Dabei beschränkt sich urbi+ nicht nur auf Bestandsgebäude, sondern kann zudem Neubau- und/oder Nachverdichtungskonzepte auf verschiedenen Skalenebenen, insofern 3D-Modelle im CityGML-Format hierfür vorhanden sind, untersuchen. Die numerische sowie tabellarische Auflistung und grafische Darstellung der Ergebniswerte fasst die wichtigsten Indikatorwerte zusammen und erlaubt eine schnelle und übersichtliche Einschätzung und Einordnung der Indikatoren zueinander. Die Radar-Grafiken ermöglichen einen Überblick über die Gesamtbilanz verschiedener Entwicklungsszenarien und bringen zudem die verschiedensten Betrachtungsdimensionen in einen Zusammenhang. In Kombination mit den Ergebnissen der Unsicherheitsanalyse lassen sich darauf aufbauend Optimierungsstrategien erarbeiten, berechnen und analysieren [214].

Zusätzlich zur numerischen und grafischen Darstellung ist zur Kommunikation der Ergebniswerte auf Gebäudeebene eine georeferenzierte Darstellung der Ergebnisse auf Stadtebene möglich. Die Visualisierung findet über den 3DCityDB Web-Map-Client [106] statt. Dadurch, dass die gebäude-spezifischen Ergebniswerte wieder zurück in die ursprüngliche CityGML-Datei geschrieben werden, können diese als Attribute dem jeweiligen Gebäudemodell angehängt und durch Auswählen des Gebäudes angezeigt werden. Zudem können gesamte Gebäude oder auch einzelne Gebäudeelemente eingefärbt oder mit Texturen versehen werden. Die im Rahmen dieser Dissertation implementierte Einfärbung der Gebäude anhand eines Ampelsystems in Bezug auf alle Indikatoren ermöglicht einen schnellen Überblick über das Gesamtergebnis des ausgewählten Indikators.

Dennoch sind der Methode bzw. urbi+ bislang Grenzen gesetzt. Diese ergeben sich zum einen aufgrund der limitierten Datengrundlage bezüglich der Inputdaten und zum anderen durch die statische

und normenbasierte Berechnungsweise. Auch der Fokus auf Wohngebäude und die Komponenten der TGA sowie die Reduzierung auf die Betrachtung von sechs Bewertungshorizonte schränkt die Handlungsmöglichkeiten ein. Die Begrenzung durch die limitierte Datengrundlage beruht auf verschiedenen Faktoren. Ein einschränkender Faktor ist die bisher begrenzte Datengrundlage an frei verfügbaren LCA-Datensätzen zu Komponenten der TGA. Generell sollten LCA-Daten bzw. Produkt-Ökobilanzen verpflichtend für alle Bauprodukte errechnet und aus Gründen der Transparenz öffentlich verfügbar gemacht werden müssen. Nur so besteht die Möglichkeit, Interessierten die Chance zu geben, zwischen verschiedenen Bauprodukten oder Energiesystemkomponenten aus Sicht energetischer und emissionsbezogener Parameter zu unterscheiden und auszuwählen. Hierfür muss verpflichtend sein, dass im Rahmen der Produkt-Ökobilanzen Werte für alle Lebenszyklusphasen bereitgestellt und zudem zukunftsweisende Recycling-, Wiederverwendungs- und/oder Wiederverwertungskonzepte erarbeitet werden.

Ein weiterer eingrenzender Faktor ist die limitierte Datengrundlage in Bezug auf die gebäudespezifische Verfügbarkeit von Daten zu Wärmeerzeugern, Energiesystemen, Sanierungsstand, Baumaterialien etc. auf Stadtquartiers- bzw. Stadtebene. Es gibt bisher keine konsolidierenden Datenbanken bzw. 3D-Modelle, die diese Informationen flächendeckend zentral sammeln, bündeln und zur Verfügung stellen. Das erschwert die Analyse und erfordert die Verwendung von statistischen Werten bzw. Erfahrungswerten. Städte wie Kopenhagen können bereits auf solche Datenstrukturen zurückgreifen und verfügen über weit mehr gebäudespezifische Informationen wie z. B. gemessene Energieverbräuche etc., die lebenszyklusbasierte Analysen deutlich vereinfachen und verbessern [28]. Hierbei könnte dann auf normenbasierte Berechnungen verzichtet und der „Performance Gap“ zwischen Energiebedarfsberechnungen und dem tatsächlichen Verbrauch geschlossen werden. Zudem können im Zuge eines Monitorings mögliche Daten zum Nutzerverhalten akquiriert werden, die Anknüpfungspunkte in Richtung des „Social Life Cycle Assessments“ etc. bieten. Die bisher verwendeten statischen Berechnungsmodelle bilden generische Berechnungen ab, die eine große Diskrepanz zum tatsächlichen Energieverbrauch aufweisen können.

Der im Rahmen dieser Dissertation gesetzte Fokus auf Wohngebäude und die Technische Gebäudeausrüstung schließt bisher Nichtwohngebäude und baukonstruktive Elemente sowohl für Wohngebäude als auch Nichtwohngebäude aus. Die Thematik der Betrachtung und Analyse der baukonstruktiven Elemente wird in einer parallel laufenden Dissertation am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München erarbeitet und im Rahmen des Forschungsprojekts *Grüne Stadt der Zukunft* in urbi+ integriert. Für die Erweiterung der Analysen auf Nichtwohngebäude bedarf es detaillierter Energiebedarfsberechnungsmodelle und ebenfalls spezifischer Energieverbrauchsdaten. Zudem ist es bei Nichtwohngebäuden oft der Fall, dass die Energiesystemkomponenten und baukonstruktiven Elemente eine deutlich stärkere Diversifizierung aufweisen und somit durch Gebäude- und Energiesystemtypologien bislang nicht abgebildet werden können. Jedoch kann dieser limitierende Faktor durch die Bereitstellung von georeferenzierten gebäudespezifischen Daten (Baumaterialien und Energiesystemkomponenten) in Form von datenkonsolidierenden 3D-Modellen oder Datenbanken ausgeschlossen werden.

Der letzte Punkt ist die Begrenzung auf die angeführten Betrachtungshorizonte bzw. Indikatoren. Diese können erweitert werden, denn in den Ökobaudat-Datensätzen sind 18 verschiedene Indikatoren zur Bewertung des Ressourceneinsatzes und sieben Indikatoren zur Bewertung der Umweltwirkungen eines Produktes hinterlegt. Das erweitert den möglichen Entscheidungsraum, wirkt aber kontraproduktiv auf den Grundsatz der Dimensionsreduktion. Zudem werden einzelne Indikatoren und deren Zusammenhänge in der laufenden Forschung kritisch diskutiert, hinterfragt und erforscht. Eine nachhaltige Stadtplanung und -entwicklung spannt einen multidimensionalen Entscheidungsraum auf, der nicht leicht anhand einzelner Kennwerte bewertet und beurteilt werden kann. Deshalb ist es von Bedeutung, den Bewertungs- und Analysehorizont von urbi+ auf viele weitere Horizonte zu erweitern. Wie diese Horizonte aussehen können, wird in Kapitel 7 näher beschrieben.

**Kurzfassung der Zusammenfassung:**

- Anhand der entwickelten Methode und urbi+ sind lebenszyklusbasierte energetische, emissions- und kostenbezogene Analysen auf Basis der bislang zur Verfügung stehenden Informationen aus 3D-Stadtmodellen möglich.
- Steht zu einem großen Gebäudebestand ein 3D-Stadtmodell im CityGML-Standard in Level of Detail (LoD)2 zur Verfügung, dann können beliebig viele Wohngebäude berechnet und analysiert werden.
- Hieraus resultieren bislang nicht verfügbare Ergebnisse zur lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bilanz zur Bewertung des Status quo und beliebig definierter Entwicklungsszenarien von großen Wohngebäudebeständen.
- Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass trotz ambitionierter Sanierungsszenarien (Sanierung aller Wohngebäude auf Passivhausstandard bis zum Jahr 2035 mit einer Sanierungsquote von 6,7 % im Fallbeispiel München) lebenszyklusbasiert beachtliche Energiebedarfe und daraus resultierende Emissionen anfallen.
- Aus den Ergebnissen des Fallbeispiels München ergibt sich z. B. ein Wert von 0,55 t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Einwohner/-in und Jahr, bezogen auf den Sektor „Private Haushalte“. Das Emissionsziel der LHM liegt für das Jahr 2035 bei 0,3 t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Münchner/-in und Jahr, über alle Sektoren hinweg.
- Je nach Bepreisungsmodell können die Emissionskosten in Zukunft einen immensen Kostenfaktor darstellen. Deshalb lohnt es sich nicht nur aus ökologischer sondern auch aus ökonomischer Sicht, emissionsreduzierende Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen.
- Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich unter anderem Strategien zur Erreichung der lebenszyklusbasierten Klimaneutralität im Sektor der privaten Haushalte erarbeiten, bspw. durch Kompensation der Emissionen.
- Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse können Stadtplaner/-innen, Energieversorgern und Politiker/-innen auf verschiedenen Ebenen als Entscheidungshilfen dienen.
- Das Forschungsfeld der nachhaltigen Stadtplanung und -entwicklung eröffnet einen multidimensionalen Bewertungs- und Analysebereich, der sich durch eine Vielzahl an Wechselwirkungen zwischen den Betrachtungs- und Bewertungshorizonten charakterisiert.

## 6. Fazit

Die Ergebnisse dieser Dissertation führen zu folgenden Faziten:

- Lebenszyklusbasierte Betrachtungen und Analysen sind als Teil von Planungsprozessen sowohl auf Gebäudeebene als auch auf der Ebene großer Gebäudebestände zwingend notwendig, wenn das Ziel einer nachhaltigen Gebäude- und Stadtentwicklung angestrebt wird. Politische und kommunale Gremien müssen deshalb die Durchführung von LCAs in gebäudebezogenen Planungsprozessen unbedingt gesetzlich implementieren.
- Zur Durchführung von LCAs bietet die erarbeitete Methode und urbi+ eine fundierte Grundlage zur energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bewertung und Analyse großer Gebäudebestände. Die durch die Anwendung von urbi+ erarbeiteten Ergebnisse stellen auf allen Ebenen sinnhafte Werte dar, die als Grundlage für zukunftsstrategische Planungsprozesse im Rahmen der Stadtplanung, Politik, Forschung und Lehre etc. eingesetzt werden können.
- Die Nutzung semantischer 3D-Stadtmodelle sowie die programmierseitige Umsetzung der Methode (urbi+) bietet eine grundlegende Ausgangslage zur Erweiterung der Methode auf verschiedenste Forschungs- und Anwendungsfelder. Dabei stellen die in der vorangegangenen kritischen Würdigung aufgeführten Punkte keine unüberbrückbaren Hürden dar, sondern bieten eine breite Grundlage für weitere innovative Forschungsvorhaben im Themenfeld des ressourceneffizienten Bauens.
- Neben der Weiterentwicklung der Methoden und Betrachtungshorizonte muss die Schaffung einer umfassenden Datengrundlage zukünftig eines der Hauptanliegen für Politik und Kommunen sein. Digitale Tools, Hardware, Software etc. ermöglichen es uns bereits heute ohne Weiteres eine solche Datenbasis zu schaffen. Jedoch muss der politische Druck und Wille in Bezug auf die Erstellung und Bereitstellung von Produkt-Ökobilanzen und gebäudespezifischen Daten, wie z. B. zu Baumaterialien und Energiesystemen und -verbräuchen, größer werden.
- Gleichzeitig muss das Bewusstsein in Hinblick auf die Wichtigkeit der Thematik des nachhaltigen Bauens in der Gesellschaft steigen. Um auch dem Datenschutz gerecht zu werden, können anonymisierte Hochrechnungen und Analysen von Entwicklungsszenarien ohne direkten Bezug zu einzelnen Gebäuden und Personen in urbi+ durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Forschungshypothesen aus Kapitel 1.2 lassen sich folgende Fazite ziehen:

- **Forschungshypothese 1:** 3D-Stadtmodelle (CityGML-Dateien) und die darin enthaltenen Informationen bieten eine ausreichende Grundlage zur Durchführung von Lebenszyklusanalysen der TGA mit Fokus auf große Gebäudebestände.

Fazit: Die 3D-Stadtmodelle bzw. die darin enthaltenen Informationen hätten in ihrer ursprünglichen Form nicht ausgereicht, um stadtweite Analysen und Berechnungen durchzuführen. In Tabelle 6.1 (siehe Seite 209) ist ein Vergleich der im City Geography Markup Language (CityGML)-Standard, inklusive der CityGML Energy AD (siehe Kapitel 3.3.1 ab Seite 32), definierten gebäudebezogenen Attribute mit den hierzu verfügbaren Daten in den 3D-Stadtmodellen für München und New York City aufgeführt. Für alle Attribute, die bislang keine Definition im CityGML-Standard (inklusive CityGML Energy ADE) besitzen, ist eine Dateneingabe über die Graphische Benutzeroberfläche (GUI) von urbi+ erforderlich. Darüber hinaus sind die Baujahre der Gebäude im 3D-Stadtmodell der LHM von dem zuständigen Planungsreferat zusätzlich zur Verfügung gestellt worden. Hieraus wird ersichtlich, dass erst die Anreicherung der Modelle mit weiteren Informationen, z. B. Baujahr der Gebäude und die Definitionen von energiesystemrelevanten Parametern durch die GUI von urbi+ eine ausreichende Datengrundlage für die beschriebenen Berechnungen und Analysen geschaffen haben. Die durchgeführte Unsicherheitsanalyse auf Stadtquartiersebene hat gezeigt, dass schwankende Parameter großen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Eine fundierte Datengrundlage ist eine zukünftig wichtige Basis für lebenszyklusbasierte Berechnungen und Analysen. Zudem sollte für weitere Forschungsarbeiten in der Zukunft angedacht werden, eine „CityGML LCA ADE“ zu entwickeln, die eine Datenstruktur und Attribute für LCAs auf Basis großer Gebäudebestände vorgibt. Die Forschungshypothese 1 kann somit nur teilweise verifiziert werden.

- **Forschungshypothese 2:** Eine statische Berechnung der Energiebedarfe, der LCA und LCC auf Gebäudeebene liefert hinreichend genaue Ergebnisse, um dieselben Berechnungen auf der Basis großer Gebäudebestände durchführen zu können.

Fazit: Der Abgleich der Berechnungen bzw. die Validierung der Ergebnisse aus urbi+ mit Ergebnissen aus vergleichbaren Arbeiten bzw. Berechnungsmodellen hat gezeigt, dass die Ergebnisse aus urbi+ richtige Tendenzen errechnen und unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Definitionen auch korrekte Ergebnisse auf Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtebene liefern.

Die Forschungshypothese 2 kann somit gänzlich verifiziert werden.

- **Forschungshypothese 3:** Anhand der Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Gebäudebestände lassen sich weitreichende Erkenntnisse bezüglich der nachhaltigen Stadtentwicklung erlangen.

Fazit: Die präsentierten Ergebnisse und Ergebnisanalysen auf Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtebene geben weitreichenden Aufschluss in Bezug auf die lebenszyklusbasierte energetische, emissions- und kostenbezogene Bilanz der betrachteten Wohngebäude. Dabei werden der Status quo und verschiedene Entwicklungsszenarien betrachtet. Die Ergebnisse können als strategische, stadtplanerische und politische Entscheidungsgrundlagen dienen

und erweitern das Feld der klassischen Bewertung und Analyse von Gebäuden hinsichtlich deren Nutzungsphase auf den gesamten Lebenszyklus, mit der Limitierung auf die Technische Gebäudeausrüstung.

Die Forschungshypothese 3 kann folglich verifiziert werden.

**Tabelle 6.1.:** Vergleich der im CityGML-Standard definierten gebäudebezogenen Attribute mit den hierzu verfügbaren Daten in den 3D-Stadtmodellen für München und New York City.

<b>Attribute</b>	<b>CityGML-Standard inkl. CityGML Energy ADE</b>	<b>München</b>	<b>New York City</b>
Adresse	x	x	x
Geometrien der Gebäudekomponenten	x	x	x
Nutzungsart	x	x	x
Dachform	x	x	x
Gebäudehöhe	x	x	x
Baujahr	x	x	x
Stockwerke über Grund	x	x	-
Wohnfläche	x	-	x
Volumen	x	-	x
Primärenergiefaktoren	x	-	-
Geteilte Außenwandflächen	x	-	-
Fensterflächen	x	-	-
U-Werte der Gebäudekomponenten	x	-	-
Wärmeerzeuger Heizen	x	-	-
Wärmeerzeuger TWW	x	-	-
Wärmeübergabesystem	x	-	-
Verwendete Energieträger	x	-	-
Wirkungsgrad Wärmeerzeuger	-	-	-
Hilfsenergien Wärmeerzeuger	-	-	-
Erneuerbarer Anteil Energieträger	-	-	-
Nicht-erneuerbarer Anteil Energieträger	-	-	-
Kosten Energieträger	-	-	-
Kosten Emissionen	-	-	-
Kosten Standortfaktor	-	-	-
Lebensdauer Gebäude	-	-	-
Lebensdauer aller TGA-Komponenten	-	-	-

Im Laufe der Bearbeitung der Dissertation haben sich zusätzlich die folgenden Forschungsfragen ergeben:

- **Forschungsfrage 1:** Lassen sich die zu untersuchenden TGA-Komponenten sinnhaft anhand der Daten und der Ergebnisse aus der Heizlast- und Heizenergiebedarfsberechnung dimensionieren?

Antwort: Die Dimensionierungen der betrachteten TGA-Komponenten liefern unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen korrekte Ergebnisse. Die Heizenergiebedarfs- und Heizlastberechnungen sind anhand eines Vergleichs der Ergebnisse mit jenen weiterer Berechnungsmodelle validiert. Die errechneten Heizenergiebedarfs- und Heizlastergebnisse sowie die Dimensionierungen der TGA-Komponenten können somit für weitere Berechnungen herangezogen werden.

- **Forschungsfrage 2:** Lassen sich verwendbare LCA-Durchschnittsdaten für die Hochrechnungen aus der Ökobaudat erarbeiten oder müssen zuerst einzelne Produkt-Ökobilanzen durchgeführt werden, um verwertbare LCA-Datensätze zu erzeugen?

Antwort: In der Ökobaudat konnten für alle zu betrachtenden Hauptkomponenten, die in der Dissertation von Weißenberger [19] identifiziert wurden, LCA-Datensätze gefunden werden. Waren mehrere Datensätze z. B. zu verschiedenen Material- und Konstruktionsausführungen vorhanden, so wurden Durchschnittsdatsätze errechnet. Alle weiteren Komponenten, zu denen es keine LCA-Datensätze oder keine ausreichende Datengrundlage zur sinnhaften Dimensionierung gibt, werden über einen Faktor abgebildet.

- **Forschungsfrage 3:** Lässt sich die gesamte Methode logisch programmierseitig abbilden und ist eine Hochrechnung auf große Gebäudebestände möglich?

Antwort: Die gesamte Methode lässt sich in der Programmiersprache Java implementieren und kann für Berechnungen und Analysen beliebig großer Gebäudebestände angewendet werden. Im Programmierprozess mussten jedoch an vereinzelt Stellen Optimierungen in Bezug auf die Speichernutzung und die Parallelisierung von Berechnungsschritten, also die Nutzung mehrerer Prozesskerne für die Berechnungen, vorgenommen werden, um einen reibungslosen Ablauf großer Berechnungsmodelle zu gewährleisten.

- **Forschungsfrage 4:** Lässt sich die Methode und urbi+ auf internationale Fallbeispiele wie z. B. New York City anwenden und werden durch die Anwendung korrekte Ergebnisse erzielt?

Antwort: Die Methode und urbi+ lassen sich grundsätzlich auf beliebige Städte anwenden, für die 3D-Stadtmodelle im CityGML-Format in LoD2 zur Verfügung stehen. Bei der Interpretation

der Ergebnisse müssen jedoch die bei der Methodenentwicklung getroffenen Annahmen berücksichtigt werden.

Als allgemeines Fazit lässt sich festhalten: Eine nachhaltige und klimaneutrale Stadt fängt dort an, wo tiefgreifende und zukunftsgerichtete Konzepte erarbeitet und vor allem auch mitgedacht werden. Hierfür müssen Daten zu deren Berechnung, Analyse und Optimierung bereitgestellt werden und lebenszyklusbasierte Betrachtungen und Analysen Eingang in sozial-politische, planerische und bürgerliche Gremien finden.

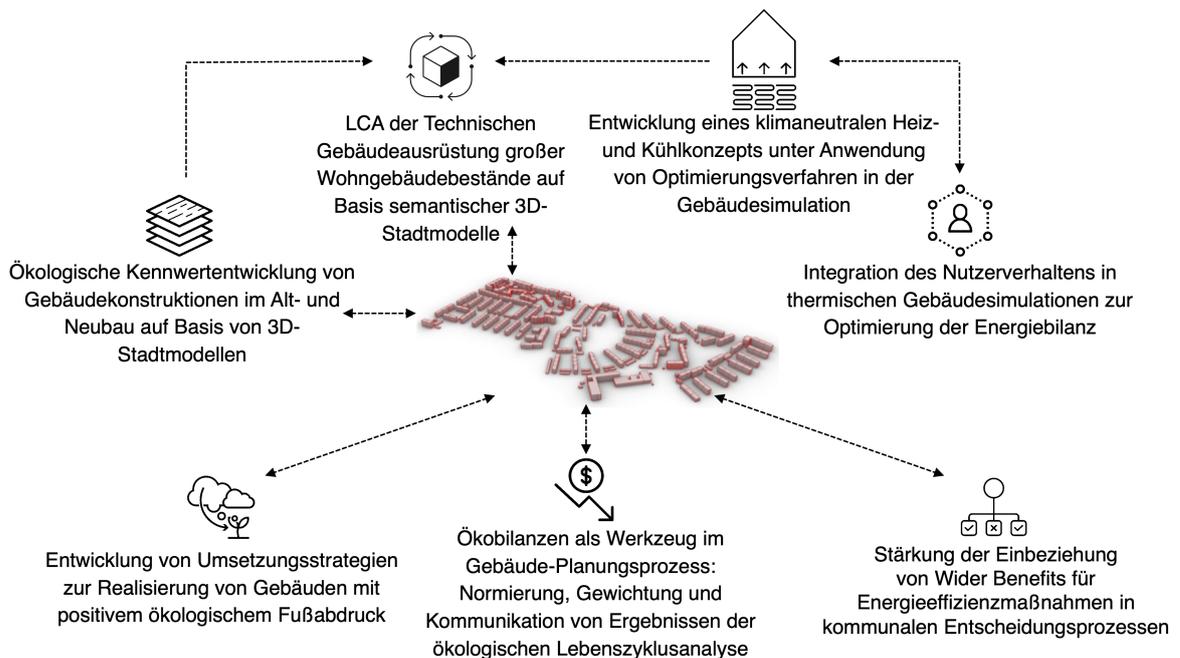
**Kurzfassung des Fazits:**

- Lebenszyklusbasierte Betrachtungen und Analysen sind als Teil von Planungsprozessen sowohl auf Gebäudeebene als auch auf der Ebene großer Gebäudebestände zwingend notwendig, wenn das Ziel einer nachhaltigen und klimaneutralen Gebäude- und Stadtentwicklung angestrebt wird.
- Ohne die Durchführung lebenszyklusbasierter Bewertungen wird ein beachtlicher Anteil an real anfallenden Energiebedarfen, Emissionen und Kosten nicht mitberücksichtigt.
- Die erarbeitete Methode und urbi+ stellen eine fundierte und validierte Grundlage zur lebenszyklusbasierten energetischen, emissions- und kostenbezogenen Bewertung und Analyse großer Gebäudebestände dar.
- Um detailliertere und genauere Bilanzen und Analysen z. B. auf Stadtebene zu ermöglichen müssen Politik und Kommunen dafür sorgen, eine umfassende und einheitliche Datenbasis hierfür zu schaffen.
- 3D-Stadtmodelle im CityGML-Standard sowie darauf aufbauende bzw. damit verbundene und weiterführende Datenstrukturen bieten eine zukunftsorientierte Möglichkeit zur Schaffung einer solchen Datenbasis.
- Lebenszyklusanalysen müssen als verpflichtendes Werkzeug bei der Gebäude- und Stadtplanung von politischer Seite in Verordnungen implementiert werden.
- Zudem sollten Hersteller jeglicher Bauprodukte und -materialien zur Erstellung von Lebenszyklusanalysen verpflichtet werden und die erlangten Ergebnisse online frei zur Verfügung stellen.
- Es müssen finanzielle Anreize für Gebäudeeigentümer/-innen geschaffen werden um energetische und ökologische Sanierungen attraktiver zu gestalten und damit die Sanierungsquote deutlich zu steigern.
- Die Ergebnisse der ambitionierten Entwicklungs- bzw. Sanierungsszenarien zeigen, dass die Politik und die Kommunen weitgreifende Konzepte zur Kompensation der lebenszyklusbasierten Emissionen erarbeiten müssen, um das Ziel einer Klimaneutralität zu erreichen.
- Eine klimaneutrale Stadt beginnt dort, wo tiefgreifende und zukunftsweisende Konzepte erarbeitet, berechnet, analysiert und optimiert werden sowie lebenszyklusbasierte Betrachtungen und Bewertungen Eingang in sozial-politische und planerische Gremien finden.



# 7. Ausblick

Um Gebäude und Städte nachhaltig und klimaneutral zu planen und zu realisieren, muss der momentane Betrachtungshorizont bei der Bewertung von Gebäuden über die Nutzungsphase hinaus erweitert werden. Neben der in dieser Dissertation erarbeiteten Methode zur Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände wird die Integration der lebenszyklusbasierten Analyse der baukonstruktiven Elemente auf Gebäude-, Stadtquartiers- und Stadtebene im Rahmen des Forschungsprojekts *Grüne Stadt der Zukunft* erarbeitet und mit der hier beschriebenen Arbeit verknüpft. Abbildung 7.1 zeigt die möglichen Verbindungen der Themenaspekte abgeschlossener und momentan in Bearbeitung befindender Dissertationen am ENPB der Technischen Universität München auf Stadtquartiers- bzw. Stadtebene auf.



**Abbildung 7.1.:** Verknüpfung der Betrachtungshorizonte auf Stadtquartiersebene (Quelle: Darstellung Lehrstuhl ENPB, Technische Universität München)

- **Kühlenergie- und Strombedarf:** Um die im gesamten Gebäude anfallenden Energiebedarfe in ihrer Gänze zu erfassen bzw. zu errechnen, müssen in Zukunft Methoden zur Berechnung des Kühlenergie- und Strombedarfs in urbi+ integriert werden. Vor allem wird der Kühlenergiebedarf bei fortschreitendem Klimawandel eine wichtigere Rolle einnehmen. Hier könnten für eine Abschätzung zukünftiger Kühlenergiebedarfe verschiedene Klimamodelle herangezogen werden, um der Thematik im besten Fall im Rahmen von Sanierungen mit „low-tech“ Lösungen bzw. Passivmaßnahmen entgegenzuwirken. Unter Berücksichtigung der Bedarfsberechnung wäre es besser, wenn gemessene Verbrauchsdaten für die Berechnungen hinzugezogen werden können. Allerdings ist die Integration einer Bedarfsberechnung allem Anschein nach schneller zu integrieren als Monitoring- oder Verbrauchsdaten stadtweit zu erfassen und zentral zu speichern. Bei der Berücksichtigung von Strombedarfen muss in Hinblick auf die Nutzung Erneuerbarer Energien die Dimensionierung und Auslegung von Photovoltaik (PV)-Anlagen inklusive Batteriespeichern in diesem Modell mitberücksichtigt werden.
- **Weitere TGA-Komponenten:** Klimageräte oder Lüftungsanlagen könnten in Zukunft z. B., aufgrund der Zunahme von Hitzeperioden, eine wichtige Rolle spielen und müssten mit in die Betrachtung integriert werden. Gerade in Bezug auf den Passivhausstandard sind Lüftungsanlagen zwingend mit zu berücksichtigen. Hierfür bedarf es jedoch einer Basis an LCA-Daten für die Bilanzierung und Methoden zur Dimensionierung dieser Komponenten anhand weniger Parameter.
- **Nichtwohngebäude:** Um Aussagen über den gesamten Gebäudebestand zu ermöglichen, muss die Methode auf die Betrachtung und Analyse der Nichtwohngebäude erweitert werden. Jedoch ist es schwer, Gebäudetypologien für Nichtwohngebäude zu erstellen, da sich deren Nutzungsarten deutlich voneinander unterscheiden können, z. B. als Krankenhäuser, Laborgebäude, Lagerhallen, Kindergärten etc. Hierfür müssen weitreichende Gebäudestudien und die Erarbeitung charakterisierender Gebäudetypologien erbracht werden.
- **Monitoring/Nutzerverhalten:** Das Gebäude- bzw. Nutzermonitoring bietet eine Möglichkeit, gebäudespezifische Verbrauchsdaten sowie Daten zum Nutzerverhalten zu generieren. Monitoringdaten erlauben die Energiebedarfsberechnungen deutlich zu verbessern und zu verfeinern und, insofern Energieverbrauchsdaten aufgezeichnet werden, diese komplett zu ersetzen. Anhand des Nutzerverhaltens lassen sich Verhaltensmuster erkennen, die für Simulationen oder gegebenenfalls auch für Nutzerschulungen in Hinblick auf einen nachhaltigen Gebäudebetrieb eingesetzt werden können.
- **Building Information Modelling (BIM) und 3D-Stadtmodelle:** Stehen sowohl detaillierte BIM-Gebäudemodelle, inklusive der exakten Angabe verbauter TGA-Komponenten und Materialien der Baukonstruktion, als auch Gebäudemodelle zu diesen Gebäuden in 3D-Stadtmodelle zu Verfügung, dann kann ein genauer Abgleich der Ergebnisse der in dieser Dissertation erarbeiteten Methode mit den real verbauten Komponenten vorgenommen werden. Das gilt sowohl für den Neubau als auch für den Bestand. Aufbauend darauf können detaillierte Datenmodelle entwickelt werden, um TGA-Komponenten und Materialien der Baukonstruktion großer Gebäudebestände zu erfassen. Die Daten sollen extern gespeichert und über einen

Link im 3D-Stadtmodell verfügbar und abrufbar sein. Eine Möglichkeit zur Datenerfassung z. B. von Konstruktionsmaterialien und dem Sanierungsstand eines Gebäudes im Rahmen eines Monitorings bzw. einer Datenakquise kann die Verwendung von Methoden der Künstliche Intelligenz (KI) sein. Hierbei können die Methoden mit Bildern von Fassaden mit verschiedenen Sanierungsstandards oder Materialien trainiert werden und mit Bildern aus bspw. Stadtbefahrungen abgeglichen werden.

- **Materialströme und Kreislaufwirtschaft:** Um gebäudeseitige Materialströme zu erfassen, müssen Baustoffe und Energiesysteme material- bzw. ressourcenspezifisch entschlüsselt werden. In Kombination mit Entwicklungsszenarien, Sanierungsreihenfolgen etc. können zur Verfügung stehende bzw. frei werdende Sekundärrohstoffe ermittelt und deren weiterer Einsatz bzw. deren Deponierung mengenmäßig geplant werden. Hieraus ergeben sich stadtweite Materialströme, die im Sinne einer Kreislaufwirtschaft für strategische Planungen verwendet werden können.
- **Ressourceneffizienzbewertung:** Die Ressourceneffizienzbewertung erweitert das Themengebiet der Bewertung des energetischen und stofflichen Rohstoffeinsatzes auf Dimensionen wie z. B. der physischen und sozio-ökonomischen Verfügbarkeit oder der gesellschaftlichen Akzeptanz [215]. Hierzu gehören Kategorien, die bspw. die politische Stabilität im Abbauand, die Preissteigerung, das Nachfragewachstum oder die Einhaltung sozialer Standards beim Abbau der jeweils betrachteten Ressource bewerten.
- **Sozio-ökonomische Betrachtungen:** In Bezug auf das Thema der Ressourceneffizienzbewertung spielt das Thema der *Wider Benefits* eine wichtige Rolle. Weiterführende positive Effekte und Auswirkungen von Sanierungen im Rahmen von Entwicklungsszenarien können hierdurch dargestellt werden. Dazu zählen z. B. die Steigerung der Produktivität von Schüler/-innen in Schulen durch die Steigerung des Innenraumkomforts.
- **Kompensation:** Die im Rahmen der Dissertation aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass sich trotz ambitionierter Entwicklungsszenarien hohe Emissionen ergeben können. Um diese Emissionen zu kompensieren, bedarf es an Modellen und Ideen, die z. B. Kompensationsflächen für CO<sub>2</sub>-Emissionen errechnen. Zudem müssen hierbei weitere Indikatoren wie z. B. das Versauerungs- oder Eutrophierungspotenzial mitbetrachtet werden. Das wiederum führt zu weiteren Vermeidungs- und Kompensationsmaßnahmen, die sich in Bezug auf die Indikatorwerte ergeben.
- **Ökokosten:** Neben den GWP-Kosten sollten somit auch Umweltwirkungskosten für alle weiteren Indikatoren errechnet und methodisch in urbi+ integriert werden. Das ermöglicht eine umfassende ökologisch-ökonomische Bewertung von Gebäuden und Entwicklungsszenarien. Diese Kosten können mit den Umweltfolgekosten gegengerechnet werden und als Basis für Entscheidungsfindungen dienen.
- **Optimierung von Simulationen, Berechnungen:** Werden alle aufgeführten Betrachtungshorizonte in urbi+ integriert, ergibt sich ein weitgreifender und aufgefüchter Entscheidungsraum mit einer Vielzahl an verschiedenen Indikatoren. Umfangreiche Parameterstudien, Gewichtungen von Indikatorwerten und Entscheidungsparametern sind hierbei unumgänglich. Zudem müssen

zur Entscheidungsfindung klare Zieldefinitionen vorgenommen werden, anhand derer Optimierungen simuliert, berechnet und analysiert werden können. Eine Dimensionsreduktion auf die für die jeweilige Entscheidung bedeutenden Horizonte und Parameter ist ein wichtiger Gedanke, der als Entscheidungshilfe dienen kann. KI kann dabei unterstützen, von bereits durchgeführten Projekten zu lernen, und in Bezug auf die Optimierung bzw. im Erarbeitungsprozess optimaler Entwicklungsszenarien und -strategien einzusetzen.

- Solarpotenzialanalysen: Durch die Nutzung und Integration von bereits entwickelten Methoden bzw. Werkzeugen zur Durchführung von Solarpotenzialanalysen [216][217][218] lassen sich z. B. genauere Aussagen bezüglich des solaren Wärmeeintrags in Gebäude und der Nutzung von Solarenergie für Photovoltaik- und Solarthermieanlagen treffen. Stehen in Zukunft 3D-Stadtmodelle ab LoD3 mit modellierten Fensterflächen zur Verfügung (siehe Abbildung 3.3 auf Seite 33), dann können bspw. die Wärmeeinträge mit einer höheren Genauigkeit berechnet werden. Der Fortschritt bei der Datengenauigkeit kann somit für detaillierte Berechnungen und Analysen genutzt werden und führt zu genaueren Ergebnissen mit weniger Unsicherheit.
- Blockchain für Produkt-Ökobilanzen, EPDs: Hersteller können über Blockchain-Mechanismen verifizierte Datengrundlagen für Produkt-Ökobilanzen/EPDs schaffen. Die Integration bzw. die Interaktion mit 3D-Stadtmodellen bietet eine Möglichkeit, eine fundierte und konsolidierte Datenbasis für zukünftige Simulationen, Berechnungen und Analysen zu schaffen.
- Grüne Infrastruktur: Über die Gebäudeplanung hinaus müssen weitere Einflussfaktoren bezüglich einer Begrünung untersucht werden. Welchen Einfluss hat z. B. eine Fassadenbegrünung auf die Nutzer/-innen, auf den Energiebedarf und auf den Innenraumkomfort. Hierzu stehen bereits umfassende Vegetationsmodelle im CityGML-Standard auf Stadtebene zur Verfügung, die für diese Untersuchungen herangezogen werden können.
- Ergebniskommunikation: Ein weiterer elementarer Punkt besteht in der verständlichen Aufbereitung und Kommunikation der Ergebnisse. Es bedarf hierfür einer gemeinsamen Sprache in Forschung und Praxis. Der weitgreifende Entscheidungsraum und die große Anzahl an Entscheidungsparametern sowie die komplexen Berechnungsschritte eröffnen ein Vielzahl an Möglichkeiten zu Fehlinterpretationen. Um diese Herausforderung anzugehen, müssen leicht verständliche Konzepte erarbeitet werden.

Einzelne Gebäude, aber auch beliebig große Gebäudebestände sind im Prozess ihrer Entstehung, ihrer Nutzung und nach dem Ende ihrer Nutzungszeit Verursacher von Interessenskonflikten, die sich aus den verschiedenen Betrachtungsperspektiven ergeben. Um den Lebenszyklus der Gebäude so nachhaltig wie möglich zu gestalten, muss als übergeordnetes Ziel jeglicher Bauprojekte (nach Prof. Dr.-Ing. Werner Lang) das „Bauen mit einem positiven ökologischen Fußabdruck“ realisiert werden. Die sich für alle gebäudebezogenen Interessenvertreter/-innen hieraus ergebenden Zielkonflikte, Wechselwirkungen und Synergieeffekte müssen mit höchster Dringlichkeit verstanden, untersucht und optimiert werden. Hierfür benötigt es Modelle und Methoden, die die aufgeführten Betrachtungshorizonte zusammenführen um die angesprochenen Wechselwirkungen und Synergieeffekte zu bündeln und um die dabei auftretenden Zielkonflikte zu lösen. Dabei bietet urbi+ in Kombination mit

3D-Stadtmodellen eine zukunftsweisende Möglichkeit und öffnet das Feld für viele weitere innovative Forschungsarbeiten.

**Kurzfassung des Ausblicks:**

- Um Gebäude und Städte nachhaltig und klimaneutral zu planen und zu realisieren, muss der momentane Betrachtungshorizont bei der Bewertung von Gebäuden bzw. großer Gebäudebestände auf eine Vielzahl an weiteren Aspekten erweitert werden.
- Hierzu zählt nicht nur die Lebenszyklusanalyse der TGA, sondern z. B. auch die LCA baukonstruktiver Elemente, die Analyse von Nichtwohngebäuden, die Integration von Nutzerverhalten in Simulations- und Berechnungsmethoden, die Bewertung sozio-ökonomischer Faktoren und Ökokosten, die Optimierung und Verfeinerung der Berechnungsmethoden.
- Hierfür benötigt es Modelle und Methoden, die die aufgeführten Betrachtungshorizonte zusammenführen um die angesprochenen Wechselwirkungen und Synergieeffekte zu bündeln und die dabei auftretenden Zielkonflikte zu lösen.
- Die 3D-Stadtmodelle im CityGML-Standard müssen dafür mit weiterführenden Informationen und Daten, die zur Bewertung der Betrachtungshorizonte benötigt werden, von bspw. Kommunen und Energieversorgern angereichert wurden.
- Dabei bietet urbi+ in Kombination mit 3D-Stadtmodellen eine zukunftsweisende Möglichkeit und öffnet das Feld für viele weitere innovative Forschungsarbeiten.



# Literaturverzeichnis

- [1] International Energy Agency (IAE), *Buildings – Topics*, 2020. Adresse: <https://www.iea.org/topics/buildings> (besucht am 27. 11. 2020).
- [2] International Energy Agency (IAE) und United Nations Environment Programme, *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. 2019, Bd. 224, S. 41, ISBN: 9789280737684.
- [3] International Energy Agency (IAE), *Tracking Buildings 2020 – Analysis*. Adresse: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020> (besucht am 27. 11. 2020).
- [4] Our World in Data, *World Population Growth*. Adresse: <https://ourworldindata.org/world-population-growth> (besucht am 27. 11. 2020).
- [5] United Nations Department of Economic and Social Affairs, *Growing at a slower pace - World population*. Adresse: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html> (besucht am 27. 11. 2020).
- [6] Construction & Demolition Recycling, *Construction debris volume to surge in coming years*. Adresse: <https://www.cdrecycler.com/article/global-volume-construction-demolition-waste/> (besucht am 27. 11. 2020).
- [7] Der Tagesspiegel, *Klimawandel: Warum tun wir so wenig?* Adresse: <https://www.tagesspiegel.de/politik/klimawandel-warum-tun-wir-so-wenig/23886440.html> (besucht am 27. 11. 2020).
- [8] F. Ekarth, *Sustainability*, Ser. Environmental Humanities: Transformation, Governance, Ethics, Law. Cham: Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-19277-8.
- [9] A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi, V. Shree und Varun, *Life cycle assessment of buildings: A review*, Jan. 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.008.
- [10] DIN EN 15978:2012-10, „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode“, 2012.
- [11] DIN EN 15804:2014-7, „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“, 2014.
- [12] Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat (BMI), *Energieeinsparverordnung (EnEV)*. Adresse: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/EnEV.html> (besucht am 29. 10. 2020).
- [13] Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat (BMI), *Gebäudeenergiegesetz*. Adresse: <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/bauen-wohnen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/energieausweise/gebäudeenergiegesetz-node.html> (besucht am 29. 10. 2020).

- [14] J. Monahan und J. C. Powell, „An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing“, Jg. 43, Nr. 1, S. 179–188, 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.09.005.
- [15] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez und A. Castell, „Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector“, Jg. 29, S. 394–416, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
- [16] G. Verbeeck und H. Hens, „Life cycle inventory of buildings“, Jg. 45, Nr. 4, S. 1037–1041, 2010, ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.10.012.
- [17] S. Theißen, J. Höper, J. Drzymalla, R. Wimmer, S. Markova, A. Meins-Becker und M. Lambertz, „Using open BIM and IFC to enable a comprehensive consideration of building services within a whole-building LCA“, *Sustainability (Switzerland)*, Jg. 12, Nr. 14, 2020. DOI: 10.3390/su12145644.
- [18] A. Stoffregen, J. Kreißig und H. König, „Ökologische Bewertung der Haustechnik“, 2010.
- [19] M. Weißenberger, „Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik“, Diss., 2016. DOI: 10.14459/2016md1325463.
- [20] Our World in Data, *Urbanization*. Adresse: <https://ourworldindata.org/urbanization> (besucht am 27. 11. 2020).
- [21] T. H. Kolbe, „Representing and exchanging 3D city models with CityGML“, in *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, S. 15–31. DOI: 10.1007/978-3-540-87395-2\_2.
- [22] Architecture 2030, *ZERO Code: The Future Has Arrived*. Adresse: <https://architecture2030.org/zero-code/> (besucht am 05. 05. 2021).
- [23] International Energy Agency (IAE), „LCA Methods for Buildings – Energy Conservation in Buildings and Community Systems“, Techn. Ber., 2001.
- [24] C. Bayer, M. Gamble, R. Gentry und S. Joshi, „Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice“, *American Institute of Architects*, S. 1–193, 2010.
- [25] U.S. General Services Administration, *Life Cycle Assessment and Buildings - GSA Sustainable Facilities Tool*. Adresse: <https://sftool.gov/plan/403/life-cycle-assessment-buildings> (besucht am 28. 11. 2020).
- [26] H. Gervasio und S. Dimova, *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*. 2018, S. 109. DOI: 10.2760/10016. Adresse: <https://ec.europa.eu/jrc>.
- [27] European Commission, *European Platform on Life Cycle Assessment*. Adresse: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EUFRP/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [28] EERadata Project, *EERadata – Horizon 2020 EU-Project*. Adresse: <https://eeradata-project.eu/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [29] European Union, *An introduction to Life Cycle Assessment (LCA)*. Adresse: <https://www.buildup.eu/en/news/overview-introduction-life-cycle-assessment-lca> (besucht am 28. 11. 2020).

- [30] B. F. Günthardt, J. Hollender und e. a. Hungerbühler, „Maßnahmenprogramm Nachhaltigkeit“, *Monitoringbericht 2017 - Deutsche Bundesregierung*, Jg. 15, Nr. 29, S. 7577–7588, 2018, ISSN: 15205118.
- [31] Umweltbundesamt (UBA), *Ökobilanz*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz> (besucht am 28. 11. 2020).
- [32] Umweltbundesamt (UBA), *Internationale Initiativen von Anwendung von Ökobilanzen*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz/internationale-initiativen-zur-anwendung-von-okobilanzen> (besucht am 28. 11. 2020).
- [33] Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR), *Ressortforschung - Ökobilanzierung und BIM im Nachhaltigen Bauen*. Adresse: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2019/oekobilanz-bim/01-start.html> (besucht am 28. 11. 2020).
- [34] Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen – Technische Universität München, *Grüne Stadt der Zukunft - klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt*. Adresse: <https://www.bgu.tum.de/enpb/forschung/laufende-forschungsprojekte/gruene-stadt-der-zukunft/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [35] Bayerisches Landesportal, *Beratungsstelle für energieeffizientes und nachhaltiges Bauen*. Adresse: <https://www.bayern.de/freistaat-bayern-foerdert-mit-70-000-euro-beratungsstelle-fuer-energieeffizientes-und-nachhaltiges-bauen/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [36] H. König, „Projekt: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten Endbericht Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt und Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie“, S. 595, 2017.
- [37] Landeshauptstadt München, *Ökologischer Kriterienkatalog*. Adresse: [https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Wohnungsbau/oekokatalog\\_vorwort.html](https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung/Wohnungsbau/oekokatalog_vorwort.html) (besucht am 28. 11. 2020).
- [38] J. Gantner, P. von Both, K. Rexroth, S. Ebertshäuser, R. Horn, O. Jorgji, C. Schmid und M. Fischer, „Ökobilanz – Integration in den Entwurfsprozess: BIM-basierte entwurfsbegleitende Ökobilanz in frühen Phasen einer Integralen Gebäudeplanung“, *Bauphysik*, Jg. 40, Nr. 5, S. 286–297, 2018. DOI: 10.1002/bapi.201800016.
- [39] D. Serig, „ARUP - Research review“, *Teaching Artist Journal*, Jg. 9, Nr. 3, S. 193–198, 2011. DOI: 10.1080/15411796.2011.585906.
- [40] Ramboll, *Are your Life Cycle Assessment Serving your Needs?* Adresse: [https://uk.ramboll.com/-/media/files/reh/reh\\_lifecycle\\_assessment\\_product\\_sheets\\_flyers\\_us\\_english.pdf?la=en](https://uk.ramboll.com/-/media/files/reh/reh_lifecycle_assessment_product_sheets_flyers_us_english.pdf?la=en) (besucht am 20. 12. 2020).
- [41] v3sta UG, *v3sta - think holistic*. Adresse: <https://www.v3sta.de/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [42] Green Business Certification Inc., *Whole building life cycle assessment through LEED v4*. Adresse: <https://gbci.org/whole-building-life-cycle-assessment-through-leed-v4> (besucht am 28. 11. 2020).

- [43] U.S. Green Building Council, *LEED v4.1*. Adresse: <https://www.usgbc.org/leed/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [44] BREEAM, *Why whole building life cycle assessment (LCA)?* Adresse: <https://www.breeam.com/news/breeam-why-building-lca/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [45] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB), *Criteria "Building life cycle assessment DGNB System"*. Adresse: <https://www.dgnb-system.de/en/buildings/new-construction/criteria/building-life-cycle-assessment/index.php> (besucht am 28. 11. 2020).
- [46] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB), „Ökobilanz des Gebäudes“, *Kriterienkatalog Gebäude Neubau*, 2018.
- [47] Bionova Ltd, *World's fastest Building Life Cycle Assessment software - One Click LCA*, 2019. Adresse: <https://www.oneclicklca.com/> (besucht am 09. 04. 2019).
- [48] Legep Software GmbH, *LEGEP Software*, 2019. Adresse: <https://legep.de/> (besucht am 06. 09. 2019).
- [49] CAALA GmbH, *CAALA Software*. Adresse: <https://caala.de/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [50] KTInnovations, *Tally*, 2019. Adresse: <https://choosetally.com/> (besucht am 09. 04. 2019).
- [51] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, *eLCA – Bauteileditor*. Adresse: <https://www.bauteileditor.de/> (besucht am 27. 04. 2021).
- [52] Sphera, *GaBi Software*. Adresse: <http://www.gabi-software.com/deutsch/software/gabi-software/> (besucht am 30. 08. 2020).
- [53] Institut für Umweltinformatik (ifu), *Umberto - Software für Stoffstrommanagement und Stoffstromanalysen*. Adresse: <https://www.ifu.com/umberto/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [54] PRé Sustainability B.V., *SimaPro Software*. Adresse: <https://simapro.com/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [55] GreenDelta, *OpenLCA Software*. Adresse: <https://www.openlca.org/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [56] EPD International AB, *The International Environmental Product Declarations (EPD) System - Database*. Adresse: <https://www.environdec.com/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [57] Ecoinvent, *ecoinvent LCA Database*. Adresse: <https://www.ecoinvent.org/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [58] Sphera, *GaBi Software Databases*. Adresse: <http://www.gabi-software.com/deutsch/databases/> (besucht am 28. 11. 2020).
- [59] Bundesministerium für Umwelt - Naturschutz - Bau und Reaktorsicherheit. (2019). ÖKOBAU-DAT | Datenbank, Adresse: <http://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>.
- [60] A. Passer, „Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden“, Diss., 2010.
- [61] M. Paleari, M. Lavagna und A. Campioli, „Life cycle assessment and zero energy residential buildings“, *Energies*, Jg. 6, Nr. 2, S. 1125–1141, 2013, ISSN: 19961073.
- [62] S. Theißen, M. Lambertz, R. Wimmer und J. Höper, „Bedeutung der Technischen Gebäudeausrüstung in der ökologischen Gebäudebewertung“, Jg. 05, Nov. 2018.

- [63] Massachusetts Institute of Technology (MIT) – Sustainable Design Lab, *Urban Modeling Interface (umi)*. Adresse: <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html> (besucht am 29. 11. 2020).
- [64] Robert McNeel & Associates, *Rhinoceros 6*. Adresse: <https://www.rhino3d.com/de/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [65] Massachusetts Institute of Technology (MIT) – Sustainable Design Lab, *Life Cycle Impact - umidocs*. Adresse: <https://umidocs.readthedocs.io/en/latest/docs/life-cycle-introduction.html> (besucht am 29. 11. 2020).
- [66] C. C. Davila und C. Reinhart, „Urban energy lifecycle: An analytical framework to evaluate the embodied energy use of urban developments“, *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, S. 1280–1287, 2013.
- [67] Massachusetts Institute of Technology (MIT) – Sustainable Design Lab, *UMI GIS Importer - umidocs*. Adresse: <https://umidocs.readthedocs.io/en/develop/docs/plugins/gis-importer.html> (besucht am 29. 11. 2020).
- [68] Berkeley Lab, *CityBES*. Adresse: <https://citybes.lbl.gov/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [69] Y. Chen, T. Hong und M. A. Piette, „Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis“, *Applied Energy*, Jg. 205, Nr. April, S. 323–335, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.128.
- [70] T. Hong, Y. Chen, M. A. Piette und X. Luo, „Modeling City Building Stock for Large-Scale Energy Efficiency Improvements using CityBES“, *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Nr. Nyserda, 2018.
- [71] T. Hong, Y. Chen, S. H. Lee, M. P. Piette, Y. Chen und M. P. Piette, „CityBES: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency“, *5th International Urban Computing Workshop, At San Francisco*, Nr. August, S. 10, 2016.
- [72] Y. Chen, T. Hong, X. Luo und B. Hooper, „Development of city buildings dataset for urban building energy modeling“, *Energy and Buildings*, Jg. 183, S. 252–265, 2019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.008.
- [73] A. Nutkiewicz, Z. Yang und R. K. Jain, „Data-driven Urban Energy Simulation (DUE-S): A framework for integrating engineering simulation and machine learning methods in a multi-scale urban energy modeling workflow“, *Applied Energy*, Jg. 225, Nr. June, S. 1176–1189, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.023.
- [74] École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), *CitySim Software – LESO-PB*. Adresse: <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [75] W. Emmanuel und K. Jérôme, „A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values“, *Building Simulation Applications*, Jg. 2015-February, S. 215–222, 2015, ISSN: 25316702.
- [76] D. Perez, J. Kämpf, U. Wilke, M. Papadopoulo und D. Robinson, „CitySim Simulation: The Case Study of Alt-Wiedikon, a Neighbourhood of Zürich City“, *Conference: CISBAT*, 2011.

- [77] The A/S group und ETH Zürich, *City Energy Analyst (CEA)*. Adresse: <https://cityenergyanalyst.com/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [78] The A/S group und ETH Zürich, *Life Cycle Analysis & 2000-Watt Benchmark — City Energy Analyst (CEA)*. Adresse: <https://cityenergyanalyst.com/life-cycle-analysis-2000watt-benchmarking> (besucht am 29. 11. 2020).
- [79] E. Thoma, J. Fonseca und A. Schlüter, „Estimation of base-values for Grey Energy, Primary Energy, Global Warming Potential (GWP 100A) and Umweltbelastungspunkte (UBP 2006) for Swiss constructions from before 1920 until today“, S. 1–21, 2006.
- [80] B. L. Ong, „Life Cycle Assessment of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system in urban high-rise buildings in Singapore“, 2019.
- [81] RWTH Aachen – Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik des E.ON Energy Research, *TEASER*. Adresse: <https://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Forschung/OPEN-SOURCE/~modj/Teaser25/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [82] P. Remmen, M. Lauster, M. Mans, M. Fuchs, T. Osterhage und D. Müller, „TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks“, *Journal of Building Performance Simulation*, Jg. 11, Nr. 1, S. 84–98, 2018. DOI: 10.1080/19401493.2017.1283539.
- [83] Modelica Association, *Modelica*. Adresse: <https://www.modelica.org/> (besucht am 13. 12. 2020).
- [84] Fraunhofer-Gesellschaft, *DistrictECA*. Adresse: <https://www.district-eca.de/index.php?lang=de> (besucht am 29. 11. 2020).
- [85] DIN V 18599-5:2018-09, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*.
- [86] Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg (ifeu) gGmbH, *Gebäudemodell (GEMOD)*. Adresse: <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/gebaeudemodell/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [87] P. Jochum, P. Mellwig, J. Lempik, M. Pehnt, S. Böttcher, A. von Oehsen, D. Stelter, S. Blömer, J. Fehr, T. Krenz und H. Hertle, „Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich - Anlagenpotenzial“, S. 0–234, 2017.
- [88] Hochschule für Technik Stuttgart (HFT), *SimStadt2*. Adresse: <https://simstadt.hft-stuttgart.de/de/index.jsp> (besucht am 29. 11. 2020).
- [89] R. Nouvel, K.-H. Brassel, M. Bruse, E. Duminil, V. Coors, U. Eicker und D. Robinson, „SIM-STADT, a New Workflow-driven Urban Energy Simulation Platform for CityGML City Models“, *CISBAT International conference*, Nr. February 2017, S. 889–894, 2015.
- [90] U. Eicker, R. Nouvel, C. Schulte, J. Schuhmacher und V. Coors, „3D-Stadtmodelle für die Wärmebedarfberechnung“, Nr. March 2015, S. 1–7, 2012.
- [91] V. Weiler, H. Harter und U. Eicker, „Life cycle assessment of buildings and city quarters comparing demolition and reconstruction with refurbishment“, *Energy and Buildings*, Jg. 134, 2017, ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.004.

- [92] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU), 2015, ISBN: 978-3-941140-47-9.
- [93] H. Harter, V. Weiler und U. Eicker, „Developing a roadmap for the modernisation of city quarters – Comparing the primary energy demand and greenhouse gas emissions“, *Building and Environment*, Jg. 112, 2017, ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.11.031.
- [94] R. Kaden, „Berechnung der Energiebedarfe von Wohngebäuden und Modellierung energiebezogener Kennwerte auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle“, 2014. Adresse: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20141210-1210304-1-5>.
- [95] Bayerischer Bauindustrieverband e.V. München, „ID - Magazin des Bayerischen Bauindustrieverbandes e.V.“, Jg. M, Nr. April, S. 36–40, 2015.
- [96] Technische Universität München Lehrstuhl für Architekturinformatik und Lehrstuhl für Städtische Architektur, *USP Urban Strategy Playground*. Adresse: <https://wp.usp.ai.ar.tum.de/> (besucht am 30. 11. 2020).
- [97] N. Seifert, M. Mühlhaus und F. Petzold, „A Parametric 3d City Model : Basis for Decision Support in Inner-City Development“, *16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*, Nr. Kolbe 2009, S. 1285–1292, 2016.
- [98] Technische Universität München Lehrstuhl für Architekturinformatik und Lehrstuhl für Städtische Architektur, *Urban Energy Design Tool - Energierrelevante Betrachtung von Gebäuden für die Entscheidungsunterstützung der Stadtentwicklung - USP Urban Strategy Playground*. Adresse: <https://wp.usp.ai.ar.tum.de/urban-energy-design-tool-energierrelevante-betrachtung-von-gebäude-für-die-entscheidungsunterstützung-der-stadt-entwicklung/> (besucht am 30. 11. 2020).
- [99] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, *3D-Gebäudemodelle LoD2 Deutschland*. Adresse: <http://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/3d-gebäudemodelle-lod2-deutschland-lod2-de.html> (besucht am 19. 01. 2021).
- [100] Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, *Bayerische Vermessungsverwaltung - 3D-Gebäudemodell*. Adresse: <https://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html> (besucht am 02. 12. 2020).
- [101] Oracle, *Java*, 2019. Adresse: <https://www.java.com/de/> (besucht am 23. 04. 2019).
- [102] H. König, N. Kohler, J. Kreißig und T. Lützkendorf, *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung*. DETAIL, Jan. 2009. DOI: 10.11129/detail.9783955530129.
- [103] Claus Nagel, *citygml4j: The Open Source Java API for CityGML*, 2019. Adresse: <https://github.com/citygml4j/citygml4j> (besucht am 26. 04. 2019).
- [104] Technische Universität München – Lehrstuhl für Geoinformatik, *citygml4j – 3DCityDB Database*. Adresse: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/citygml4j/> (besucht am 30. 11. 2020).

- [105] M. Sindram, T. Machl, H. Steuer, M. Pültz und T. H. Kolbe, „Voluminator 2.0 - Speeding up the Approximation of the Volume of Defective 3D Building Models“, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Jg. 3, Nr. July, S. 29–36, 2016. DOI: 10.5194/isprs-annals-III-2-29-2016.
- [106] Technische Universität München – Lehrstuhl für Geoinformatik, *3DCityDB Database*. Adresse: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/> (besucht am 30. 11. 2020).
- [107] Z. Yao, C. Nagel, F. Kunde, G. Hudra, P. Willkomm, A. Donaubaue, T. Adolphi und T. H. Kolbe, „3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML Open Geospatial Data, Software and Standards“, DOI: 10.1186/s40965-018-0046-7.
- [108] Technische Universität München – Lehrstuhl für Geoinformatik, *3D City Database Importer/-Exporter*. Adresse: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/3dimpexp/> (besucht am 30. 11. 2020).
- [109] Technische Universität München – Lehrstuhl für Geoinformatik, *3dwebclient – 3DCityDB Database*. Adresse: <https://www.3dcitydb.org/3dcitydb/3dwebclient/> (besucht am 30. 11. 2020).
- [110] DIN EN 12831-1:2017-09, *Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast*.
- [111] DIN EN 12831-3:2017-09, *Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 3: Trinkwassererwärmungsanlagen, Heizlast und Bedarfsbestimmung*.
- [112] DIN V 4108-6:2003-06, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*.
- [113] Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat (BMI), *Energieeinsparverordnung (EnEV)*. Adresse: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/EnEV.html> (besucht am 29. 10. 2020).
- [114] DIN V 4701-10:2003-08, *Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*.
- [115] DIN EN ISO 14040:2009-11, „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)“, 2009.
- [116] DIN EN ISO 14044:2006-10, „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)“, 2006.
- [117] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Der dena-Gebäudereport, Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“, S. 1–200, 2016.
- [118] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), „Anlage zum Merkblatt Energieeffizient Bauen“, Jg. 2018, Nr. 1, S. 7, 2010.
- [119] U. Bogenstätter, „Flächen- und Raumkennzahlen“, S. 1–10, 2007. Adresse: <http://www.ifbor.eu/3.html>.

- [120] N. Diefenbach, H. Cischinsky, M. Rodenfels und K.-D. Clausnitzer, *Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*, 0049. 2010, S. 9, ISBN: 978-3-941140-16-5. Adresse: [http://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht\\_Datenbasis.pdf](http://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht_Datenbasis.pdf).
- [121] T. Loga, N. Diefenbach, J. Knissel und R. Born, *Entwicklung eines vereinfachten statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden – Kurzverfahren Energieprofil*. 2005, S. 158, ISBN: 3-932-074-769.
- [122] M. A. Heinrich, „Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham“, Diss., 2018.
- [123] G. Gröger, T. H. Kolbe, A. Czerwinski und C. Nagel, „OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard“, *Open Geospatial Consortium August 2008*, Nr. 08-007r1, S. 234, 2008. Adresse: <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>.
- [124] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), „Produkt- und Qualitätsstandard für 3D-Gebäudemodelle“, Techn. Ber., 2019. Adresse: <http://repository.gdi-de.org/schemas/adv/citygml/Codelisten/BuildingFunctionTypeAdv.xml>.
- [125] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), *Die amtlichen 3D-Gebäudemodelle in den Ausprägungen LoD1 und LoD2*. Adresse: <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Weitere-Produkte/3D-Gebaeudemodelle-LoD/> (besucht am 02. 12. 2020).
- [126] Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, *ALKIS – Katasterauszüge*. Adresse: <https://www.ldbv.bayern.de/produkte/kataster/alkis.html> (besucht am 02. 12. 2020).
- [127] Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, *Bayerische Vermessungsverwaltung - Produkte - 3D-Produkte - 3D-Gebäudemodell*. Adresse: <https://www.ldbv.bayern.de/produkte/3dprodukte/3d.html> (besucht am 02. 12. 2020).
- [128] Landeshauptstadt München, *Referat für Stadtplanung und Bauordnung*. Adresse: <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Stadtplanung-und-Bauordnung.html> (besucht am 02. 12. 2020).
- [129] F. Biljecki, K. Kumar und C. Nagel, „CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments“, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, Jg. 3, Nr. 1, S. 13, Dez. 2018, ISSN: 2363-7501. DOI: 10.1186/s40965-018-0055-6. Adresse: <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-018-0055-6>.
- [130] R. Nouvel, J.-M. Bahu, R. Kaden, J. Kaempf, P. Cipriano, M. Lauster, K.-H. Haefele, E. Munoz, O. Tournaire und E. Casper, „Development of the CityGML Application Domain Extension Energy For Urban Energy Simulation“, Techn. Ber.
- [131] S. Moeller, I. Weber, F. Schröder, A. Bauer und H. Harter, „Apartment related energy performance gap – How to address internal heat transfers in multi-apartment buildings“, *Energy and Buildings*, Jg. 215, 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109887.

- [132] T. Hamacher und P. Böhme, „Analyzing the errors of heat consumption estimations at high spatial resolution“, *FfE-Schriftenreihe, Band 31, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.*, 2013.
- [133] D. Walberg, T. Gniechwitz, T. Schulze und A. Cramer, *Optimierter Wohnungsbau: Untersuchung und Umsetzungsbetrachtung zum bautechnisch und kostenoptimierten Mietwohnungsbau in Deutschland - Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen*.
- [134] TOTAL, *Heizwert und Brennwert von Heizöl*. Adresse: <https://www.heizoel.total.de/rund-um-heizoel/aktuelles-tipps/heizoelkauf-beratung/heizwert-und-brennwert-von-heizol/> (besucht am 29. 11. 2020).
- [135] SBZ Monteur, *Wirkungsgrad von Solaranlagen*. Adresse: <https://www.sbz-monteur.de/gut-zu-wissen/wirkungsgrad-von-solaranlagen> (besucht am 11. 04. 2020).
- [136] DIN 1988-200:2012-05, *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen – Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System)*.
- [137] Solarthermie.net, *Globalstrahlung – Sonneneinstrahlung in Deutschland*. Adresse: <https://www.solarthermie.net/wissen/globalstrahlung-deutschland> (besucht am 04. 12. 2020).
- [138] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), „Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen VDI 4640 Blatt 2“, Techn. Ber., 2019. Adresse: [www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien).
- [139] Bundesministerium für Umwelt – Naturschutz – Bau und Reaktorsicherheit, *Rohre Wärmepumpen*. Adresse: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/d5e3c652-6093-4161-9930-cf712b6a9fa3/oekobaudat\\_rohre\\_waermepumpen.jpg?version=39.00.000](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/d5e3c652-6093-4161-9930-cf712b6a9fa3/oekobaudat_rohre_waermepumpen.jpg?version=39.00.000) (besucht am 04. 12. 2020).
- [140] K. Jagnow, B. Oschatz und D. Wolff, „Vereinfachung des Berechnungsverfahrens von Rohrleitungslängen für eine Fortschreibung der DIN V 18599 Teil 5 und 8“, 2010.
- [141] DIN EN 806-3 - 2006-07, *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen – Teil 3: Berechnung der Rohrrinnendurchmesser – Vereinfachtes Verfahren*. Adresse: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-806-3/84761809> (besucht am 21. 01. 2021).
- [142] Bosy-online, *Grundformeln und Formelzeichen*. Adresse: [http://www.bosy-online.de/Hausaufgaben/Grundformeln\\_und\\_Formelzeichen\\_KORR.pdf](http://www.bosy-online.de/Hausaufgaben/Grundformeln_und_Formelzeichen_KORR.pdf) (besucht am 04. 12. 2020).
- [143] Vaillant, *Vorlauftemperatur: Die Heizung optimal einstellen*. Adresse: <https://www.vaillant.de/heizung/heizung-verstehen/tipps-rund-um-ihre-heizung/vorlauf-rucklauftemperatur/> (besucht am 04. 12. 2020).
- [144] DIN 1988-300:2012-05, *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen – Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser*.
- [145] Chemgapedia, *Chemische Eigenschaften Polydiene*. Adresse: [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/polymere\\_werkstoff/elastomere/polydiene/polydien.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/polymere\\_werkstoff/elastomere/polydiene/polybutadien/eigenschaft.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/polymere_werkstoff/elastomere/polydiene/polydien.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/polymere_werkstoff/elastomere/polydiene/polybutadien/eigenschaft.vscml.html) (besucht am 04. 12. 2020).
- [146] Chemie.de, *Chemische Eigenschaften Polypropylen*. Adresse: <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html> (besucht am 04. 12. 2020).

- [147] Chemie.de, *Chemische Eigenschaften Stahl*. Adresse: <https://www.chemie.de/lexikon/Stahl.html> (besucht am 04. 12. 2020).
- [148] U. Mayer, „Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven – Fachbereich Architektur – SS 2005 - Kapitel IV: Heizflächen“, 2005.
- [149] J. Wirtz, „Methode zur Behebung von Datendefiziten bei der Lebenszyklusanalyse von Gebäuden anhand eines Beispielgebäudes“, 2018.
- [150] Greenpeace, *CO2 & Co*. Adresse: <https://www.greenpeace.de/themen/klimawandel/welche-treibhausgase-verursachen-die-erderw%7B%5C%22%7Ba%7D%7Drmung> (besucht am 05. 12. 2020).
- [151] Bundesregierung Deutschland, *CO2-Bepreisung*. Adresse: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008> (besucht am 05. 12. 2020).
- [152] WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, *Sirados Baupreishandbuch 2020 - Gebäudetechnik*, 1. Auflage. Kissing: WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, 2020, ISBN: 978-3-8111-0267-5.
- [153] Baukosteninformationszentrum (BKI), *BKI Baukosten Gebäude Neubau 2019*, Ausgabe 1. 2019, Bd. Teil 1. Adresse: <https://www.beck-shop.de/bki-baukosten-gebaeude-neubau-2019/product/27706475>.
- [154] Baukosteninformationszentrum (BKI), *BKI Baukosten Gebäude Altbau 2019*, Ausgabe 1. 2019, Bd. Teil 1. Adresse: <https://www.schulthess.com/bauwesen/detail/ISBN-9783481039707/BKI-Baukosten-Gebaeude-Altbau-2019>.
- [155] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, *Bauauftragsvergabe*. Adresse: <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/bauen-wohnen/bauen/bauwesen/bauauftragsvergabe/bauauftragsvergabe-artikel.html> (besucht am 05. 12. 2020).
- [156] Umweltbundesamt, *Elektro- und Elektronikgerätegesetz*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete/elektro-elektronikgeraetegesetz> (besucht am 21. 01. 2021).
- [157] CO2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, *Nachtspeicherheizung entsorgen*. Adresse: <https://www.co2online.de/energie-sparen/strom-sparen/nachtspeicherheizung/nachtspeicherheizung-entsorgen/> (besucht am 05. 12. 2020).
- [158] Solaranlage Ratgeber, *Anschaffungskosten für Solarthermie-Anlagen*. Adresse: <https://www.solaranlage-ratgeber.de/solarthermie/solarthermie-wirtschaftlichkeit/solarthermie-anschaffungskosten> (besucht am 05. 12. 2020).
- [159] Solaranlage Ratgeber, *Recycling von Photovoltaik- und Solarthermiemodulen*. Adresse: <https://www.solaranlage-ratgeber.de/solarenergie/recycling-von-photovoltaik-und-solarthermiemodulen> (besucht am 05. 12. 2020).
- [160] Eccuro, *Glaswolle entsorgen: Anforderungen und Kosten*. Adresse: <https://www.eccuro.com/artikel/828-glaswolle-entsorgen-anforderungen-und-kosten> (besucht am 05. 12. 2020).

- [161] Technische Universität Darmstadt, „Wohnraumpotenziale in urbanen Lagen: Aufstockung und Umnutzung von Nichtwohngebäuden“, S. 1–12, 2019. Adresse: [https://www.tu-darmstadt.de/media/daa\\_responsives\\_design/01\\_die\\_universitaet\\_medien/aktuelles\\_6/pressemeldungen/2019\\_3/Tichelmann\\_Deutschlandstudie\\_2019.pdf](https://www.tu-darmstadt.de/media/daa_responsives_design/01_die_universitaet_medien/aktuelles_6/pressemeldungen/2019_3/Tichelmann_Deutschlandstudie_2019.pdf).
- [162] FOSSGIS e.V., *OpenStreetMap Deutschland: Die freie Wiki-Weltkarte*. Adresse: <https://www.openstreetmap.de/> (besucht am 16. 12. 2020).
- [163] Technische Universität München – Lehrstuhl für Geoinformatik, *3D City Database documentation*, 2019. Adresse: <https://3dcitydb-docs.readthedocs.io/en/latest/index.html> (besucht am 07. 04. 2020).
- [164] Bibliographisches Institut GmbH, *Duden | validieren | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft*. Adresse: <https://www.duden.de/rechtschreibung/validieren> (besucht am 07. 12. 2020).
- [165] Statistisches Bundesamt, *Statistisches Jahrbuch – Deutschland und Internationales*. 2014, ISBN: 9783824610495.
- [166] Bosch Thermotechnik GmbH, *2020: Aktuelle Heizölpreise & Prognose*. Adresse: <https://www.effizienzhaus-online.de/heizoelpreise-entwicklung/> (besucht am 09. 12. 2020).
- [167] CO2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, *Fernwärme: Alle Infos zu Funktion, Nutzung, Kosten & Alternativen | co2online*. Adresse: <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/fernwaerme/> (besucht am 09. 12. 2020).
- [168] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen 1.“, S. 1–8, 2015.
- [169] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), „KIT - IAI - FZKViewer“, 2016. Adresse: <https://www.iai.kit.edu/1648.php>.
- [170] J. D. Spitler, „Load Calculation Applications Manual“, ASHRAE, Techn. Ber., 2017. Adresse: <http://www.carrier.com/commercial/en/us/software/hvac-system-design/>.
- [171] EQUA Solutions AG, *IDA ICE – Simulation Software | EQUA*. Adresse: <https://www.equa.se/de/ida-ice> (besucht am 02. 04. 2020).
- [172] H. Harter, F. Banihashemi, D. Kierdorf, M. Vollmer und W. Lang, „Comparison of Different Energy Demand Calculation Models on Urban Scale“, *BauSim Konferenz - TU Graz*, 2020.
- [173] Umweltministerium Baden-Württemberg, „Merkblatt zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) des Bundes für Neubauvorhaben“, Techn. Ber. Adresse: [www.um.baden-wuerttemberg.de](http://www.um.baden-wuerttemberg.de).
- [174] Baunetz\_Wissen, *Expandiertes Polystyrol (EPS) – Dämmstoffe*. Adresse: <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/expandiertes-polystyrol-eps-152198> (besucht am 07. 12. 2020).
- [175] Statistisches Bundesamt, „Bauen und Wohnen 2019 – Destatis“, Jg. 49, S. 151–212, 2019. DOI: 10.1007/978-3-663-02353-1\_8.

- [176] S. Klotz, „Statistik - Korrelation“, *Universität Tübingen*, Adresse: <https://homepages.uni-tuebingen.de/stefan.klotz/seiten/Statistik/StatistikKorrelation.pdf>.
- [177] M. M. Singh und P. Geyer, „Information requirements for multi-level-of-development BIM using sensitivity analysis for energy performance“, *Advanced Engineering Informatics*, Jg. 43, Nr. September 2019, 2020. DOI: 10.1016/j.aei.2019.101026. Adresse: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101026>.
- [178] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto und S. Tarantola, „Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index“, *Computer Physics Communications*, Jg. 181, Nr. 2, S. 259–270, Feb. 2010. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.
- [179] P. Schneider-Marin, H. Harter, K. Tkachuk und W. Lang, „Uncertainty analysis of embedded energy and greenhouse gas emissions using BIM in early design stages“, *Sustainability (Switzerland)*, Jg. 12, Nr. 7, 2020. DOI: 10.3390/su12072633.
- [180] K. Menberg, Y. Heo und R. Choudhary, „Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information“, *Energy and Buildings*, Jg. 133, S. 433–445, Dez. 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.10.005.
- [181] R. Regel, „Die Referenzraummethode als eine vereinfachte Bewertung komplexer Liegenschaften im Quartier am Beispiel von Hochschulen“, 2016.
- [182] C. Dotzler, S. Botzler, D. Kierdorf und W. Lang, „Methods for optimising energy efficiency and renovation processes of complex public properties“, *Energy and Buildings*, Jg. 164, S. 254–265, Apr. 2018. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.12.060.
- [183] A. Saltelli und S. Tarantola, „On the Relative Importance of Input Factors in Mathematical Models“, *Journal of the American Statistical Association*, Jg. 97, Nr. 459, S. 702–709, Sep. 2002. DOI: 10.1198/016214502388618447.
- [184] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana und S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, Dez. 2008, S. 237–275. DOI: 10.1002/9780470725184.
- [185] S. Buckert, J. Bös und H. Hanselka, „Sensitivitätsanalyse an einem aktiv geregelten Rahmen-Platte-Prüfstand“, Nr. 3, S. 709–710, 2011.
- [186] F. Campolongo, J. Cariboni und A. Saltelli, „An effective screening design for sensitivity analysis of large models“, *Environmental Modelling and Software*, Jg. 22, Nr. 10, S. 1509–1518, 2007. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.10.004.
- [187] J. Herman und W. Usher, *SALib – Sensitivity Analysis Library in Python*. Adresse: <https://salib.readthedocs.io/en/latest/> (besucht am 09. 12. 2020).
- [188] Umweltbundesamt (UBA), *Energieziel 2050: 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/energieziel-2050-100-prozent-strom-aus-erneuerbaren> (besucht am 09. 12. 2020).

- [189] H. Harter, B. Willenborg, P. Schneider-Marin, F. Banihashemi, D. Kierdorf, T. H. Kolbe und W. Lang, „Uncertainty Analysis of Life Cycle Assessment Input Parameters on City Quarter Level“, *Building Simulation 2021 Konferenz (zur Veröffentlichung eingereicht)*, 2021.
- [190] X. Y. Zhang, M. N. Trame, L. J. Lesko und S. Schmidt, „Sobol sensitivity analysis: A tool to guide the development and evaluation of systems pharmacology models“, *CPT: Pharmacometrics and Systems Pharmacology*, Jg. 4, Nr. 2, S. 69–79, 2015. DOI: 10.1002/psp4.6.
- [191] H. Harter, B. Willenborg, W. Lang und T. Kolbe, „Life Cycle Assessment of Technical Building Services of Large Residential Building Stocks Using Semantic 3D City Models“, in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Bd. 6, 2020. DOI: 10.5194/isprs-annals-VI-4-W1-2020-85-2020.
- [192] Statista, *Wohngebäude in München – Bestand bis 2019*. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/260455/umfrage/bestand-an-wohngebaeuden-in-muenchen/> (besucht am 10. 12. 2020).
- [193] Stadtwerke München GmbH, *Energiewende: Ausbau der erneuerbaren Energien*. Adresse: <https://www.swm.de/energiewende> (besucht am 10. 12. 2020).
- [194] Deutsche Energie-Agentur (dena), *Der dena-Gebäudereport: Wärmewende kommt seit 2010 nicht voran*. Adresse: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/dena-gebaeudereport-waermewende-kommt-seit-2010-nicht-voran/> (besucht am 03. 05. 2021).
- [195] Umweltbundesamt (uba), „Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze“, 2020.
- [196] Stadtwerke München GmbH, *Kraft-Wärme-Kopplung als Brückentechnologie*. Adresse: <https://www.swm.de/energiewende/kraft-waerme-kopplung> (besucht am 02. 02. 2021).
- [197] Landeshauptstadt München, „Wohnungsbauatlas“, 2018.
- [198] Landeshauptstadt München, *CO2-Emissionen in München rückläufig*. Adresse: <https://ru.muenchen.de/2020/45/Neue-Zahlen-CO2-Emissionen-in-Muenchen-ruecklaeufig-90373> (besucht am 10. 12. 2020).
- [199] Bayerische Staatsforsten AöR, *Wald & Kohlendioxid*. Adresse: <https://www.baysf.de/de/wald-verstehen/wald-kohlendioxid.html> (besucht am 10. 12. 2020).
- [200] Mayor’s Office of Sustainability, „One City, Transforming New York City Buildings for a Low-Carbon Future“, *The City of New York*, S. 151, 2016.
- [201] M. K. Dixit, C. H. Culp und J. L. Fernandez-Solis, „Calculating primary energy and carbon emission factors for the United States energy sectors“, *RSC Advances*, Jg. 4, Nr. 97, S. 54 200–54 216, 2014. DOI: 10.1039/c4ra08989h. Adresse: <http://dx.doi.org/10.1039/C4RA08989H>.
- [202] Envia, *How the U.S. power grid is evolving to handle solar and wind*. Adresse: <https://ensia.com/features/us-power-grid-renewables-wind-solar/> (besucht am 15. 01. 2021).
- [203] Mayor’s Office of Sustainability, *Energy Supply New York City*. Adresse: <https://www1.nyc.gov/site/sustainability/codes/energy-supply.page> (besucht am 15. 01. 2021).

- [204] U.S. Bureau of Labor Statistics, *Average Energy Prices, New York City*. Adresse: [https://www.bls.gov/regions/new-york-new-jersey/news-release/averageenergyprices%7B%5C\\_%7Dnewyorkarea.htm](https://www.bls.gov/regions/new-york-new-jersey/news-release/averageenergyprices%7B%5C_%7Dnewyorkarea.htm) (besucht am 15. 01. 2021).
- [205] New York State, *Monthly Average Home Heating Oil Prices*. Adresse: <https://www.nysersda.ny.gov/researchers-and-policymakers/energy-prices/home-heating-oil/monthly-average-home-heating-oil-prices> (besucht am 15. 01. 2021).
- [206] The New York Times, *These Countries Have Prices on Carbon. Are They Working?* Adresse: <https://www.nytimes.com/interactive/2019/04/02/climate/pricing-carbon-emissions.html> (besucht am 15. 01. 2021).
- [207] Hochschule für Technik Stuttgart, *Building Physics Library – SimStadt*. Adresse: <https://simstadt.ericduminil.com/related-softwares/building-physics-library.html> (besucht am 15. 01. 2021).
- [208] U. Eicker, J. Schumacher, V. Weiler und R. Braun, „On The Design Of An Urban Modeling Platform And Its Application For A New York District Analysis“, *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*, Jg. 16, Nr. April 2020, S. 3508–3515, 2020. DOI: 10.26868/25222708.2019.210686.
- [209] City of New York, *International Energy Conservation Code*, 2016. Adresse: [https://www1.nyc.gov/assets/buildings/apps/pdf%7B%5C\\_%7Dviewer/viewer.html?file=2016ECC%7B%5C\\_%7DCHR4.pdf%7B%5C%7Dsection=energy%7B%5C\\_%7Dcode%7B%5C\\_%7D2016](https://www1.nyc.gov/assets/buildings/apps/pdf%7B%5C_%7Dviewer/viewer.html?file=2016ECC%7B%5C_%7DCHR4.pdf%7B%5C%7Dsection=energy%7B%5C_%7Dcode%7B%5C_%7D2016) (besucht am 15. 01. 2021).
- [210] New York State, *Monthly Cooling and Heating Degree Day Data*. Adresse: <https://www.nysersda.ny.gov/about/publications/ea-reports-and-studies/weather-data/monthly-cooling-and-heating-degree-day-data%7B%5C#%7DNewYorkCity> (besucht am 15. 01. 2021).
- [211] Current Results Publishing Ltd., *New York City NY Lowest Temperature Each Year*. Adresse: <https://www.currentresults.com/Yearly-Weather/USA/NY/New-York-City/extreme-annual-new-york-city-low-temperature.php> (besucht am 15. 01. 2021).
- [212] Current Results Publishing Ltd., *New York City NY Average Temperatures by Month*. Adresse: <https://www.currentresults.com/Weather/New-York/Places/new-york-city-temperatures-by-month-average.php> (besucht am 15. 01. 2021).
- [213] Statista, *Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2019*. Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/76558/umfrage/entwicklung-der-treibhausgas-emissionen-in-deutschland/> (besucht am 17. 01. 2021).
- [214] D. A. Kierdorf, „Entwicklung eines klimaneutralen Heiz- und Kühlkonzepts unter Anwendung von Optimierungsverfahren in der Gebäudesimulation“, 2019.
- [215] V. Bach, M. Berger, M. Henßler, M. Kirchner, S. Leiser, L. Mohr, E. Rother, K. Ruhland, L. Schneider, L. Tikana und L. Wolfgang Schneider, *Messung von Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode: Integrierte Methode zur ganzheitlichen Bewertung*. 2015, S. 161, ISBN: 978-3-662-49263-5.

- [216] M. Behnisch, M. Münzinger, H. Pglitsch, B. Willenborg und T. H. Kolbe, „Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solarflächenpotenzial“, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26084/12dfns-p025>.
- [217] B. Willenborg, M. Pültz und T. H. Kolbe, „Integration of Semantic 3D City Models and 3D Mesh Models for Accuracy Improvements of Solar Potential Analyses“, in *Proceedings of the 13th International 3D GeoInfo Conference*, 2018, S. 223–230. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-223-2018. Adresse: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W10/223/2018/>.
- [218] D. Fuchs, „Berechnung des Energiebedarfs von Wohngebäuden auf Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen am Beispiel der Gemeinde Poing“, *Technische Universität München*, 2018.
- [219] Vogel Communications Group, *Was ist XML?* Adresse: <https://www.dev-insider.de/was-ist-xml-a-692619/> (besucht am 03. 02. 2021).
- [220] Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht (BaFin), *Blockchain-Technologie*. Adresse: [https://www.bafin.de/DE/Aufsicht/FinTech/Blockchain/blockchain\\_artikel.html](https://www.bafin.de/DE/Aufsicht/FinTech/Blockchain/blockchain_artikel.html) (besucht am 03. 02. 2021).
- [221] Umweltbundesamt, *Erneuerbare Energien*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien> (besucht am 08. 02. 2021).
- [222] Baunetz\_Wissen, *Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)*. Adresse: <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/bauphysik/gesamtenergiedurchlassgrad-g-wert-159244> (besucht am 03. 05. 2021).
- [223] Duden Learnattack GmbH, *Kartesisches Koordinatensystem*. Adresse: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/mathematik-abitur/artikel/kartesisches-koordinatensystem%7B%5C#%7D> (besucht am 03. 02. 2021).
- [224] A. Stadler und T. H. Kolbe, „Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city models“, *Proceedings of the 5th International ISPRS Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ 2007 in Enschede, The Netherlands, 13-15 June 2007*, 2007. Adresse: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/2-C43/Session1/paper%7B%5C\\_%7DStadler.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/2-C43/Session1/paper%7B%5C_%7DStadler.pdf).
- [225] G. Gröger, J. Benner, D. Dörschlag, R. Drees, U. Gruber, K. Leinemann und M. O. Löwner, „Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D“, *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jg. 130, Nr. 6, S. 343–353, 2005, ISSN: 16188950.
- [226] RP Photonics Consulting GmbH, *Wärmedurchgangskoeffizient – U-Wert*. Adresse: <https://www.energie-lexikon.info/waermedurchgangskoeffizient.html> (besucht am 25. 01. 2021).
- [227] DocCheck Flexikon, *Voxel*. Adresse: <https://flexikon.doccheck.com/de/Voxel> (besucht am 18. 01. 2021).
- [228] D. Thiel und D. Riedel, *Typisierte Bauteilaufbauten – Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand*. 2011, ISBN: 978-3-8167-8605-4. Adresse: <https://www.nei-dt.de/Downloads/Historische%20Fenster-Eicke-Hennig-2017.pdf>.

- [229] W. Ornth, „Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand“, S. 23, 2009. Adresse: [https://www.envisys.de/energieberatung/fileadmin/envisys/media/Download/2014%7B%5C\\_%7DNWGDatenaufnahme2013.pdf](https://www.envisys.de/energieberatung/fileadmin/envisys/media/Download/2014%7B%5C_%7DNWGDatenaufnahme2013.pdf).
- [230] Architektur- und TGA-Planungsbüro Carsten Grobe, *Passivhaus-Informationen*. Adresse: <https://www.passivhaus.de/passivhaus/> (besucht am 30.01.2021).
- [231] DIN EN 12831-1:2017-09 Beiblatt 1, „Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast“, S. 1–72, 2008.
- [232] Bauverlag BV GmbH, *Energieausweise verlieren Gültigkeit - Deutsche BauZeitschrift*. Adresse: [https://www.dbz.de/artikel/dbz%7B%5C\\_%7DEnergieausweise%7B%5C\\_%7Dverlieren%7B%5C\\_%7DGuiltigkeit%7B%5C\\_%7D3156717.html](https://www.dbz.de/artikel/dbz%7B%5C_%7DEnergieausweise%7B%5C_%7Dverlieren%7B%5C_%7DGuiltigkeit%7B%5C_%7D3156717.html) (besucht am 06.04.2020).



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Ablaufdiagramm des Forschungsansatzes (eigene Abbildung) . . . . .	8
3.1	Definition der methodischen Schritte in urbi+ (eigene Abbildung) . . . . .	22
3.2	Definition der Lebenszyklusphasen nach der DIN EN 15978 - 2012-10 (Quelle: [10]) .	28
3.3	Definition der LoDs von Gebäuden in 3D-Stadtmodellen (Quelle: [123]) . . . . .	33
3.4	Beispielhaftes Polygon zur Verdeutlichung der Flächenberechnungen (eigene Abbildung)	38
3.5	Leitungssysteme für die Raumheizung (Quelle: [85]) . . . . .	60
3.6	Beispielhafter normierter Entscheidungsraum zur Erstellung der Sanierungsreihenfolge (eigene Abbildung) . . . . .	89
3.7	Beispielhafte Visualisierung des Gebäudebestandes im Status quo, inkl. der Einfärbung nach spezifischem Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> *a] und Farbband des Energieaus- weises (Quelle: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109]) . . . . .	93
3.8	Beispielhafte Visualisierung des Gebäudebestandes nach Sanierung, inkl. der Einfärbung nach spezifischem Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> *a] und Farbband des Energie- ausweises (Quelle: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109]) . . . . .	93
4.1	Digitale Darstellung des Fallbeispiel 1 (Quelle: Energieausweis 2009) . . . . .	101
4.2	Vergleich der Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung aus urbi+, IDA-ICE, umi und den Energieausweisen (eigene Abbildung) . . . . .	108
4.3	Graues GWP verteilt über 50 Jahre, aufgeteilt auf die LCA-Phasen (eigene Abbildung)	118
4.4	Graues GWP über 50 Jahre je TGA-Komponente (eigene Abbildung) . . . . .	119
4.5	Lebenszyklusbasiertes Graues GWP je TGA-Komponente (eigene Abbildung) . . . . .	120
4.6	Lebenszyklusbasierte Graue Kosten je TGA-Komponente (eigene Abbildung) . . . . .	121
4.7	Ausschnitt des Stadtquartiers Moosach (Quellen: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109]) . . . . .	123
4.8	Verteilung der Baualtersklassen - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	124
4.9	Vergleich der Gebäudevolumen mit den Wohnflächen - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	125
4.10	S <sub>1</sub> für das GWP (eigene Abbildung) . . . . .	134
4.11	S <sup>T</sup> für das GWP (eigene Abbildung) . . . . .	134
4.12	S <sub>1</sub> für den PENRT (eigene Abbildung) . . . . .	136
4.13	S <sup>T</sup> für den PENRT (eigene Abbildung) . . . . .	136
4.14	S <sub>1</sub> für den PERT (eigene Abbildung) . . . . .	137
4.15	S <sup>T</sup> für den PERT (eigene Abbildung) . . . . .	137
4.16	S <sub>1</sub> für die Kosten (eigene Abbildung) . . . . .	139

4.17 $S^T$ für die Kosten (eigene Abbildung) . . . . .	139
4.18 Heatmap zwischen absoluter und spezifischer Summe Primärenergiebedarf (PET) im Status quo (eigene Abbildung) . . . . .	143
4.19 Sanierungsreihenfolge eines ausgewählten Bereiches in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (Quellen: OpenStreetMap [162], 3DCityDB Web-Map-Viewer [109]) . . . . .	145
4.20 Reduktion der Heizlast über den Entwicklungszeitraum in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	146
4.21 Reduktion der PET für das Heizen und das TWW in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	147
4.22 Heatmap PET Vergleich Status quo mit Szenario 1 (eigene Abbildung) . . . . .	148
4.23 Heatmap PET des Szenario 1 (eigene Abbildung) . . . . .	148
4.24 Einsatz an Grauer PET in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	149
4.25 Kostenwerte in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	150
4.26 Verlauf der GWP-Kosten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	151
4.27 Zusammenführung aller Kostenwerte in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	152
4.28 Verteilung der PET über die LCA-Phasen in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	153
4.29 Verteilung der Kosten über die LCC-Phasen in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	155
4.30 Verteilung der Grauen PET über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	156
4.31 Verteilung der Grauen GWP-Kosten über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	158
4.32 Verteilung der Grauen Kosten über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	159
4.33 Reduktion der Indikatoren (normiert) im Vergleich von Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	161
4.34 Aufwendungen pro Indikator (normiert), Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	163
4.35 Absolute Indikatorwerte (normiert) über 50 Jahre, Vergleich von Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (eigene Abbildung) . . . . .	164
4.36 Verteilung der Baualtersklassen der 115.305 Wohngebäude - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	168
4.37 Gegenüberstellung der Gebäudevolumen und der Wohnflächen, verteilt über Baualtersklassen - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	169
4.38 Reduktion der PET für das Heizen und das TWW in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	174
4.39 Aufwendungen an Grauer PET in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	174
4.40 Verlauf der Gesamtkosten in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	175
4.41 PET aller Wohngebäude über 50 Jahre - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	178

4.42	Summe der Kosten aller Wohngebäude über 50 Jahre - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	178
4.43	Verteilung der Grauen PET über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	179
4.44	Verteilung der Grauen Kosten über die TGA-Komponenten in Szenario 1 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	179
4.45	Reduktion der Indikatoren (normiert), Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	181
4.46	Aufwendungen pro Indikator (normiert), Vergleich zwischen Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	183
4.47	Absolute Indikatorwerte (normiert) über 50 Jahre, Vergleich von Status quo und Szenario 1 und 2 - Stadt München (eigene Abbildung) . . . . .	185
4.48	Verteilung der Baualtersklassen der Wohngebäude - New York City (eigene Abbildung)	187
4.49	Verteilung der Anzahl der Wohnhäuser auf die Gebäudekategorien - New York City (eigene Abbildung) . . . . .	188
4.50	Absolute Indikatorwerte (normiert) über 50 Jahre, Vergleich von Status quo mit Szenario 1 und 2 - New York City (eigene Abbildung) . . . . .	196
7.1	Verknüpfung der Betrachtungshorizonte auf Stadtquartiersebene (Quelle: Darstellung Lehrstuhl ENPB, Technische Universität München) . . . . .	213
B.1	Erstes Eingabefester GUI von urbi+ (eigene Abbildung) . . . . .	287
B.2	Zweites Eingabefester GUI von urbi+ (eigene Abbildung) . . . . .	288
B.3	Farbband des Energieausweises (Quelle: [232]) . . . . .	290
B.4	Einfamilienhaus nach Weißenberger (Fallbeispiel 2) (Quelle: [19]) . . . . .	290
B.5	Mehrfamilienhaus nach Weißenberger (Fallbeispiel 3) (Quelle: [19]) . . . . .	291



# Tabellenverzeichnis

3.1 Primärenergiefaktoren nach Energieeinsparverordnung (EnEV) [113] (aus *erneuerbaren, **nicht-erneuerbaren Quellen) . . . . .	75
4.1 Definition der U-Werte anhand der Energiebedarfsausweise zur Energiebedarfs- und Heizlastberechnung im unsanierten und sanierten Zustand für das Fallbeispiel 1 . . . .	102
4.2 Definition der Berechnungsparameter zur Energiebedarfsberechnung im unsanierten und sanierten Zustand für das Fallbeispiel 1 . . . . .	103
4.3 Definition der U-Werte für das Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) (Fallbeispiel 2 und 3) nach Weißenberger [19] . . . . .	103
4.4 Definition der Bauteilflächen des EFH und MFH (Fallbeispiel 2 und 3) nach Weißenberger [19] . . . . .	104
4.5 Lebensdauer der berücksichtigten TGA-Komponenten bei der Berechnung der LCA und LCC . . . . .	105
4.6 Kostenwerte der Endenergie und des GWP zur Berechnung der LCC (Quellen: [151][166][167]) . . . . .	106
4.7 Ergebnisse der Flächen- und der Volumenberechnung, Vergleich von FZK-Viewer und urbi+ . . . . .	107
4.8 Ergebnisse der Heizlastberechnungen, Vergleich von IDA-ICE und urbi+ . . . . .	107
4.9 Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung, Vergleich von IDA-ICE, umi, Energieausweis und urbi+ . . . . .	109
4.10 Dimensionierung der TGA-Komponenten, Vergleich von Weißenberger und urbi+ (Szenario Gas-Brennwert) . . . . .	111
4.11 Dimensionierung der Wärmeerzeuger für das Szenario Luft-Wasser-Wärmepumpe, Vergleich von Weißenberger und urbi+ . . . . .	115
4.12 Dimensionierung der TGA-Komponenten für das Szenario Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektoren, Vergleich von Weißenberger und urbi+ . . . . .	116
4.13 Dimensionierung der TGA-Komponenten für das Szenario Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden, Vergleich von Weißenberger und urbi+ . . . . .	116
4.14 Dimensionierung der TGA-Komponenten für das Szenario Biomasse-Pelletkessel, Vergleich von Weißenberger und urbi+ . . . . .	117
4.15 Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das EFH für das Szenario Gas-Brennwertkessel durch urbi+ . . . . .	118
4.16 Abkürzungen und Variationsbereiche der Parametergruppen (siehe Tabelle A.40, Anhang A, Seite 274) . . . . .	127

4.17	Prozentuale Definition der TGA-Komponenten für den Status quo wie auch für die Szenarien 1 und 2 - Stadtquartier Moosach . . . . .	131
4.18	Definition der Lebensdauer der TGA-Komponenten für den Status quo wie auch für die Szenarien 1 und 2 - Stadtquartier Moosach . . . . .	131
4.19	Primärenergiefaktoren für den Status quo wie auch für die Szenarien 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (Quelle: [113]) . . . . .	132
4.20	Nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Anteil an der Primärenergiequelle Status quo, Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (Quelle: [188]) . . . . .	132
4.21	Kostenwerte der Endenergie und des GWP für den Status quo - Stadtquartier Moosach (Quellen: [151][166][167]) . . . . .	132
4.22	Preissteigerungen (PS) und Kalkulationszinssätze (KS) für die Endenergie, das GWP und die Komponentenkosten für Szenario 1 und 2 - Stadtquartier Moosach (Quelle: [168]) . . . . .	133
4.23	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für den Status quo (SQ) - Stadtquartier Moosach . . . . .	142
4.24	Dimensionierung der betrachteten TGA Komponenten für den Status quo (SQ) - Stadtquartier Moosach . . . . .	143
4.25	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 1, inkl. einem Vergleich zum Status quo (SQ) - Stadtquartier Moosach . . . . .	145
4.26	Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten zur Sanierung für das Szenario 1 - Stadtquartier Moosach . . . . .	146
4.27	Summe des Primärenergiebedarfs und des GWPs, nach LCA-Phasen über 50 Jahre Nutzungszeitraum aller Gebäude - Stadtquartier Moosach . . . . .	154
4.28	Summe der GWP-Kosten sowie Komponenten- und Energiekosten, nach LCC-Phasen über 50 Jahre Nutzungszeitraum aller Gebäude - Stadtquartier Moosach . . . . .	154
4.29	Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das Szenario 1 (S1) - Stadtquartier Moosach . . . . .	156
4.30	Prozentuale Verteilung PET, PENRT, PERT und GWP über die betrachteten TGA-Komponenten - Stadtquartier Moosach . . . . .	157
4.31	Prozentuale Verteilung der GWP-Kosten und der Komponentenkosten über die betrachteten TGA-Komponenten - Stadtquartier Moosach . . . . .	159
4.32	Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 1 - Stadtquartier Moosach . . . . .	160
4.33	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 2 (S2) im Vergleich mit dem Status quo ( $\Delta$ SQ/S2) und Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - Stadtquartier Moosach . . . . .	161
4.34	Graue Energie, Graues GWP, Graue GWP-Kosten und Graue Kosten zur Sanierung für das Szenario 2 im Vergleich mit Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - Stadtquartier Moosach . . . . .	163
4.35	Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 2 im Vergleich mit Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - Stadtquartier Moosach . . . . .	165
4.36	Prozentuale Definition der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München . . . . .	170

4.37	Definition der Lebensdauer der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München . . . . .	171
4.38	Primärenergiefaktoren für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München (Quelle: [113]) . . . . .	171
4.39	Nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Anteil an den Primärenergiequellen für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - Stadt München . . . . .	172
4.40	Kostenwerte der Endenergie und des GWPs für den Status quo (SQ) - Stadt München (Quellen: [151][166][167]) . . . . .	172
4.41	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für den Status quo (SQ) - Stadt München	173
4.42	Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für den Status quo (SQ) - Stadt München . . . . .	173
4.43	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 1 im Vergleich zum Status quo ( $\Delta$ SQ/S1) - Stadt München . . . . .	175
4.44	Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das Szenario 1 - Stadt München . . . . .	176
4.45	Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten für das Szenario 1 - Stadt München . . . . .	177
4.46	Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude (50 Jahre) für das Szenario 1 - Stadt München . . . . .	177
4.47	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 2 im Vergleich zum Status quo ( $\Delta$ SQ/S2) und zu Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - Stadt München . . . . .	180
4.48	Dimensionierung der betrachteten TGA-Komponenten für das Szenario 2 - Stadt München . . . . .	182
4.49	Aufwendungen an Grauer Energie, Grauem GWP, Grauen GWP-Kosten und Grauen Kosten zur Sanierung für das Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - Stadt München . . . . .	182
4.50	Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 2 im Vergleich mit Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - Stadt München .	184
4.51	Indikatorwerte pro Kopf und Jahr für das Szenario 2 - Stadt München . . . . .	185
4.52	Prozentuale Definition der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City [200] . . . . .	189
4.53	Definition der Lebensdauer der TGA-Komponenten für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City . . . . .	190
4.54	Primärenergiefaktoren für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City (Quelle: [201]) . . . . .	190
4.55	Nicht-erneuerbarer und erneuerbarer Anteil an Primärenergiequellen für den Status quo sowie für das Szenario 1 und 2 - New York City . . . . .	191
4.56	Kostenwerte der Endenergie und des GWPs für den Status quo - New York City . . .	191
4.57	U-Werte der Gebäudekomponenten für den Status quo sowie für Szenario 1 und 2 - New York City (Quellen: [203][207]) . . . . .	192
4.58	Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für den Status quo - New York City . . .	193

4.59 Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 1 im Vergleich zum Status quo ( $\Delta$ SQ/S1) - New York City . . . . .	193
4.60 Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 1 - New York City . . . . .	194
4.61 Heizlast, Heizenergiebedarf und Heizkosten für das Szenario 2 im Vergleich mit Status quo ( $\Delta$ SQ/S2) und Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - New York City . . . . .	195
4.62 Primärenergie, GWP, GWP-Kosten und Kosten über den gesamten Lebenszyklus aller Gebäude für das Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 ( $\Delta$ S1/S2) - New York City . .	195
6.1 Vergleich der im CityGML-Standard definierten gebäudebezogenen Attribute mit den hierzu verfügbaren Daten in den 3D-Stadtmodellen für München und New York City. .	209
A.1 Definition der Baualtersklasse in Anlehnung an die deutsche Wohngebäudetypologie (Quelle: [92]) . . . . .	249
A.2 Baualtersklassenbezogene U-Werte für die Baualterklassen 1 - 6 (Quellen: [113] [228] [229]) . . . . .	249
A.3 Baualtersklassenbezogene U-Werte für die Baualtersklassen 7 - 11 (Quellen: [113]-[228][229]) . . . . .	250
A.4 U-Werte für die Sanierung nach KfW 55 und nach dem Passivhausstandard (Quelle: [118] und eigene Berechnungen der U-Werte für Passivhausstandard in Anlehnung an die Quelle [230]) . . . . .	250
A.5 Fensterflächen pro m <sup>2</sup> Wohnfläche (Quellen: [120][121]) . . . . .	250
A.6 Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems inkl. der Einheitendefiniton zu Berechnung der LCA und der LCC . . . . .	251
A.7 Definition der relevanten Nutzungsarten von Gebäuden in CityGML-Dateien (Quelle: [123]) . . . . .	251
A.8 Definition der Dachformen von Gebäuden in CityGML-Dateien (Quelle: [123]) . . . .	252
A.9 Auflistung der aus urbi+ exportierten Werte in Excel und CSV . . . . .	252
A.10 Auflistung der Farbcodierung zur Darstellung des spezifischen Primärenergiebedarfs	254
A.11 Fallspezifische Parameter (a - c <sub>3</sub> ) für die Berechnung von U <sub>k</sub> (Quelle: [110]) . . . . .	254
A.12 Fallspezifische Parameter (n <sub>1</sub> - d) für die Berechnung von U <sub>k</sub> (Quelle: [110]) . . . . .	255
A.13 Mindestdicke der Dämmschicht von Rohrleitungen in Bezug auf den Rohrinnendurchmesser d <sub>i</sub> (Quelle: [12]) . . . . .	255
A.14 Massenwerte Fußbodenheizung je Verlegeabstand und Quadratmeter Wohnfläche (Quelle: [59]) . . . . .	255
A.15 Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstiger Umweltinformationen, Input- und Output-Indikatoren (Quelle: [59]) . . . . .	256
A.16 Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen (Quelle: [59]) . . . . .	256
A.17 Betrachtete Wärmeerzeuger - Energiequellen; *Hilfsenergie, **Hauptenergiequelle . .	257
A.18 GWP-Werte ( $GWP_{B6, spez}$ ), in Anlehnung an die Ökobaudat [59] . . . . .	257
A.19 Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems - Einheitendefiniton LCA . . .	258
A.20 Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems - Einheitendefiniton LCC . . .	259
A.21 Temperatur-Korrekturfaktoren $F_{xi}$ (Quelle: [112]) . . . . .	259

A.22 Flächenbezogene/r Wärmeverluste und Hilfsenergiebedarf der Verteilung $q_{TW,d}$ und $q_{TW,d,HE}$ für Trinkwarmwasser- und Zirkulationsleitungen (Quelle: [114]) . . . . .	260
A.23 Flächenbezogene/r Wärmeverlust $q_{TW,s}$ und Hilfsenergien $q_{TW,s;HE}$ der Speicherung des Trinkwarmwassers (Quelle: [114]) . . . . .	260
A.24 Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen $e_{TW,g}$ und Hilfsenergien $q_{TW,g,HE}$ für Öl- und Gas-Kessel - TWW (Quelle: [114]) . . . . .	261
A.25 Durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen $e_{TW,g}$ und Hilfsenergien $q_{TW,g,HE}$ für weitere Energiesysteme - TWW (Quelle: [114]) . . . . .	261
A.26 Flächenbezogene Wärmeverluste bei der Verteilung der Heizwärme $q_d$ (Quelle: [114])	262
A.27 Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeverluste bei der Speicherung der Heizwärme $q_s$ (Quelle: [114]) . . . . .	262
A.28 Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeverluste und Hilfsenergien bei der Speicherung der Heizwärme $q_s$ , $q_{s,HE}$ (Quelle: [114]) . . . . .	263
A.29 Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen $e_{TW,g}$ und Hilfsenergien $q_{TW,g,HE}$ für Öl- und Gas-Kessel - Heizung (Quelle: [114]) . . . . .	263
A.30 Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen $e_{TW,g}$ und Hilfsenergien $q_{TW,g,HE}$ für Biomasse-Kessel - Heizung (Quelle: [114]) . . . . .	263
A.31 Durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen $e_{TW,g}$ und Hilfsenergien $q_{TW,g,HE}$ TWW für weitere Energiesysteme - Heizung (Quelle: [114]) . . . . .	264
A.32 Flächenbezogener durchschnittlicher Hilfsenergiebedarf für die Wärmeverteilung $q_{d,HE}$ (Quelle: [114]) . . . . .	264
A.33 Rohr-Materialdicke in Bezug zum Rohrinne Durchmesser $R_i$ (Quelle: [59]) . . . . .	264
A.34 Spezifische Entzugsleistungen unterschiedlicher Bodenarten nach VDI-Richtlinie 4640 $\theta_{m,e}$ (Quelle: [138]) . . . . .	265
A.35 Fixe Berechnungsparameter zur Leitungslängenberechnung des Warmwasserheizungsrohrnetzes (Quelle: [85][140]) . . . . .	266
A.36 Fixe Berechnungsparameter zur Leitungslängenberechnung der Trinkwarmwassersysteme (Quelle: [85][140]) . . . . .	266
A.37 Verwendete LCA-Datensätze zur Errechnung der komponentenspezifischen Durchschnittsdatsätze aus der Ökobaudat (Quelle: [59]) . . . . .	266
A.38 LCA-Durchschnittswerte für die Indikatoren GWP, PERT, PENRT für die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3 und C4 (Quelle: [59]) . . . . .	269
A.39 LCC-Durchschnittswerte für die LCC-Phasen Herstellung, Austausch und Ersatz sowie Entsorgung (Quelle: [152] [153] [154]) . . . . .	272
A.40 Input-Parameter für urbi+, inkl. Minimum- und Maximumwert für die Unsicherheitsanalyse	274
A.41 Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems - Lebensdauer nach Ökobaudat zur Berechnung der LCA und LCC (Quelle: [59]) . . . . .	285
A.42 Anzahl Wohngebäude pro Baualterklasse - Stadt München . . . . .	285



# Glossar

**Application Programming Interface** APIs werden dazu genutzt Informationen zwischen einer Anwendung und einzelnen Programmteilen standardisiert auszutauschen und dienen als eine Programmierschnittstelle [219].

**Blockchain** Die Blockchain Technologie ist eine fälschungssichere, nicht veränderbare und verteilte Datenstruktur. Transaktionen können nachvollziehbar, unveränderlich und ohne zentrale Instanz abgebildet werden [220].

**Erneuerbare Energien** Erneuerbare Energien sind Wind- und Sonnenenergie, Biomasse, Geothermie und Wasserkraft [221]. Der Begriff „Erneuerbare Energien“ steht in dieser Arbeit übergreifend für die Technologien der Erneuerbaren Energien, die im Gebäudesektor Anwendung finden. Hierzu zählen bspw. Wärmepumpen, Biomasse-Kessel, Photovoltaik-Anlagen etc.

**g-Wert** Der g-Wert oder Gesamtenergiedurchlassgrad [-] definiert die Energiedurchlässigkeit eines transparenten Bauteils [222] und wird mit einem Wert zwischen null und eins angegeben. Der Wert setzt sich zusammen aus der direkt durchgelassenen Sonnenstrahlung und der Wärmeübergabe bspw. des Glases durch Abstrahlung und Konvektion in den Innenraum. Je näher der Wert an der Zahl eins liegt, umso mehr Energie (Wärmegewinne) lässt ein Bauteil in den Innenraum.

**Graue Energie** Die Grauen Energien sowie die daraus resultierenden Grauen Emissionen und Grauen Kosten ergeben sich aus der Herstellungs-, Nutzungs- (Austausch und Ersatz) und Entsorgungsphase der betrachteten TGA-Komponenten. Das Wort „Grau“ umfasst die genannten LCA- und LCC-Phasen.

**Kartesisches Koordinatensystem** Unter einem kartesischen Koordinatensystem versteht man ein orthogonales Koordinatensystem. Dieses stellt im dreidimensionalen euklidischen Raum ein System von drei skalierten Geraden dar, die durch einen gemeinsamen Punkt, den Ursprung, verlaufen. Zudem liegen die Geraden nicht in einer Ebene. Die Besonderheit bei kartesischen Koordinatensysteme ist, dass die Achsen jeweils einen rechten Winkel bilden [223].

**Semantische 3D-Stadtmodelle** Semantische 3D-Stadtmodelle enthalten die Semantik und die Geometrie von digitalen Objekten im urbanen Kontext. Das geometrische Modell repräsentiert ein Konzept zur Modellierung räumlicher Eigenschaften von Objekten. Das semantische Modell

definiert die jeweilige Bedeutung dieser Objekte und ihre Beziehung zueinander und komplementiert dadurch das 3D-Stadtmodell. Sowohl das geometrische als auch das semantische Modell kann als Einzelnes bestehen. In der Praxis werden beide in der Regel jedoch kombiniert [224][225].

**Spreadsheet** Ein Spreadsheet ist ein digitales Tabellenblatt, das Daten in Zellen, angeordnet in Zeilen und Spalten, enthalten kann. Solche Spreadsheets können z. B. in Microsoft Excel erstellt und online bereitgestellt werden.

**Technische Gebäudeausrüstung** Der Begriff Technische Gebäudeausrüstung steht im Rahmen dieser Arbeit als Oberbegriff für das gebäudespezifische Energiesystem und die unmittelbar damit verbundenen Komponenten. Hierzu zählen: Wärmeerzeuger, Wärmespeicher, Wärmeverteilungen und Wärmeübergabesysteme.

**U-Wert** Der U-Wert oder Wärmedurchgangskoeffizient definiert sich als ein Maß für die Wärmedurchlässigkeit eines Bauteils mit der Einheit  $[W/m^2 \cdot K]$  [226]. Er gibt an, welche Wärmeleistung pro Quadratmeter eines Bauteils strömt, wenn dessen Außen- und Innenfläche einem konstanten Temperaturunterschied von einem Grad Kelvin ausgesetzt sind. Je niedriger der U-Wert, umso höher die Dämmwirkung eines Bauteils.

**Voxel** Ein Voxel ist ein dreidimensionales „Volumenelement“ und entspricht einem Datenpunkt in einem dreidimensionalen Raum [227].

**XML** Die Abkürzung „XML“ steht für „Extensible Markup Language“ und definiert eine digitale Datenstruktur. Die in dieser Datenstruktur enthaltenen Daten sind sowohl von Maschinen (Computern) als auch Menschen lesbar [219].

# A. Anhang - Tabellen

**Tabelle A.1.:** Definition der Baualtersklasse in Anlehnung an die deutsche Wohngebäudetypologie (Quelle: [92])

Baualtersklasse	Anzahl Wohngebäude
BAK1	c
BAK2	$\geq 1919$ und $\leq 1948$
BAK3	$\geq 1949$ und $\leq 1957$
BAK4	$\geq 1958$ und $\leq 1968$
BAK5	$\geq 1969$ und $\leq 1978$
BAK6	$\geq 1979$ und $\leq 1983$
BAK7	$\geq 1984$ und $\leq 1994$
BAK8	$\geq 1995$ und $\leq 2001$
BAK9	$\geq 2002$ und $\leq 2009$
BAK10	$\geq 2010$ und $\leq 2015$
BAK11	$\geq 2016$

**Tabelle A.2.:** Baualtersklassenbezogene U-Werte für die Baualterklassen 1 - 6 (Quellen: [113] [228] [229])

Bauteil	BAK1	BAK2	BAK3	BAK4	BAK5	BAK6
Außenwand	1,7	1,7	1,5	1,4	0,9	0,7
Oberste Geschossdecke	1,6	1,6	1,5	1,4	0,6	0,5
Kellerdecke	1,2	1,2	1,5	0,9	0,8	0,7
Kellerwand	2,2	2,2	2,2	1,4	1,0	0,8
Bodenplatte	1,6	1,6	2,3	1,2	1,2	0,8
Flachdach	2,1	2,1	2,1	1,3	1,3	0,6
Steildach	2,6	1,4	1,4	1,4	0,8	0,7
Fenster	3,8	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

**Tabelle A.3.:** Baualtersklassenbezogene U-Werte für die Baualtersklassen 7 - 11 (Quellen: [113][228]-[229])

Bauteil	BAK7	BAK8	BAK9	BAK10	BAK11
Außenwand	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2
Oberste Geschossdecke	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Kellerdecke	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
Kellerwand	0,6	0,5	0,5	0,4	0,35
Bodenplatte	0,6	0,6	0,5	0,4	0,35
Flachdach	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Steildach	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2
Fenster	3,0	1,8	1,5	1,4	1,3

**Tabelle A.4.:** U-Werte für die Sanierung nach KfW 55 und nach dem Passivhausstandard (Quelle: [118] und eigene Berechnungen der U-Werte für Passivhausstandard in Anlehnung an die Quelle [230])

Bauteil	KfW 55	Passivhaus
Außenwand	0,20	0,15
Oberste Geschossdecke	1,40	0,15
Kellerdecke	0,25	0,15
Kellerwand	0,25	0,15
Bodenplatte	0,25	0,15
Flachdach	0,14	0,15
Steildach	0,14	0,15
Fenster	0,90	0,80

**Tabelle A.5.:** Fensterflächen pro m<sup>2</sup> Wohnfläche (Quellen: [120][121])

	Baualtersklassen						Ø
	bis 1918	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978	ab 1978	
Ø EFH	0,174	0,192	0,209	0,216	0,200	0,197	0,200
Ø MFH	0,169	0,172	0,184	0,200	0,172	0,172	0,181
Ø alle	0,173	0,188	0,201	0,212	0,195	0,193	0,195

**Tabelle A.6.:** Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems inkl. der Einheitendefinition zu Berechnung der LCA und der LCC

<b>TGA Komponente</b>	<b>Einheit</b>	<b>Heizung</b>	<b>TWW</b>
Gas-Kessel	Leistung [kW]	X	X
Öl-Kessel	Leistung [kW]	X	X
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe	Leistung [kW]	X	X
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Leistung [kW]	X	X
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdkollektor(en)	Leistung [kW]	X	X
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdsonde(n)	Leistung [kW]	X	X
Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]	X	X
Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]	X	X
Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]	X	X
Elektroheizung	Leistung [kW]	X	-
Biomasse-Kessel	Leistung [kW]	X	X
Fernwärmeabnahmestationen	Leistung [kW]	X	X
Durchlauferhitzer	Leistung [kW]	-	X
Gas-Speicher-Wassererhitzer	Leistung [kW]	-	X
Solarthermie	Leistung [kW]	-	X
Rohre Fußbodenheizung	Länge Rohrleitungen [m]	X	-
Radiatoren	Materialmasse [kg]	X	-
Öl-Tank	Volumen [Liter]	X	X
Rohre Heizungswasser	Materialmasse [kg]	X	-
Rohre Trinkwarmwasser	Materialmasse [kg]	-	X
Rohrleitungsdämmung	Materialmasse [kg]	X	X
Warmwasserspeicher	Volumen [l]	X	X

**Tabelle A.7.:** Definition der relevanten Nutzungsarten von Gebäuden in CityGML-Dateien (Quelle: [123])

<b>Gebäudetyp</b>	<b>Spezifischer Kennwert</b>
Wohngebäude	1000
Wohn- und Administrationsgebäude	1030
Wohn- und Bürogebäude	1040
Wohn- und Geschäftsgebäude	1050
Wohn- und Produktionsgebäude	1060

**Tabelle A.8.:** Definition der Dachformen von Gebäuden in CityGML-Dateien (Quelle: [123])

<b>Dachform</b>	<b>Spezifischer Kennwert</b>
Flachdach	1000
Satteldach	1010
Doppeltes Pultdach	1020
Giebeldach	1030
Walmdach	1040
Halbwalmdach	1050
Mansardendach	1060
Pavilliondach	1070
Kegeldach	1080
Kopula-Dach	1090
Sägedach	1100
Bogendach	1110
Pyramidenförmiges Dach	1120
Kombination verschiedener Dachformen	1130

**Tabelle A.9.:** Auflistung der aus urbi+ exportierten Werte in Excel und CSV

<b>Spezifische Gebäudeinformationen:</b>
GML-ID
Stadt
Adresse
Baujahr
Baualtersklasse
Grundfläche
Wohnfläche
Summe Außenwandfläche
Summe Dachfläche
Summe Fensterfläche
Gebäudevolumen
Stockwerke über Grund
Stockwerke unter Grund
Klimazone
Durchschnittliche Jahres-Außentemperatur
absoluter Gesamtprimärenergiebedarf <sup>1</sup>
absoluter Gesamtendenergiebedarf <sup>1</sup>
absoluter Gesamtnutzenergiebedarf <sup>1</sup>
spezifischer Gesamtprimärenergiebedarf <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Status quo sowie Szenario 1 und 2

spezifischer Gesamtendenergiebedarf <sup>1</sup>
spezifischer Gesamtnutzenergiebedarf <sup>1</sup>
absoluter Primärenergiebedarf - Heizen <sup>1</sup>
absoluter Endenergiebedarf - Heizen <sup>1</sup>
absoluter Nutzenergiebedarf - Heizen <sup>1</sup>
spezifischer Primärenergiebedarf - Heizen <sup>1</sup>
spezifischer Endenergiebedarf - Heizen <sup>1</sup>
spezifischer Nutzenergiebedarf - Heizen <sup>1</sup>
absoluter Primärenergiebedarf - TWW <sup>1</sup>
absoluter Endenergiebedarf - TWW <sup>1</sup>
absoluter Nutzenergiebedarf - TWW <sup>1</sup>
spezifischer Primärenergiebedarf - TWW <sup>1</sup>
spezifischer Endenergiebedarf - TWW <sup>1</sup>
spezifischer Nutzenergiebedarf - TWW <sup>1</sup>
Heizlast <sup>1</sup>
<b>Dimensionierung TGA-Komponenten:</b>
Dimensionierung Wärmeerzeuger
Rohrlänge Heizungsrohre
Rohrlänge - TWW
Materialmasse Heizungsrohre
Materialmasse - TWW
Länge Radiatoren
Materialmasse Radiatoren
Rohrlänge Fußbodenheizung
Gesamtvolumen Warmwasserspeicher
Volumen Warmwasserspeicher - Heizung
Volumen Warmwasserspeicher - TWW
Gesamt-Materialmasse Warmwasserpeicher
Materialmasse Warmwasserpeicher - Heizung
Materialmasse Warmwasserpeicher - TWW
Materialmasse Rohrleitungsdämmung
Materialvolumen Rohrleitungsdämmung
Volumen Öl-Tank
Länge Erdsonden Wärmepumpe
Länge Erdkollektoren Wärmepumpe
Fläche Solarthermieanlage

<b>Ergebnisse LCA/LCC Status quo:</b>
GWP aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
PERT aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
PENRT aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
Kosten aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
<b>Ergebnisse LCA/LCC Szenario 1:</b>
GWP aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
PERT aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
PENRT aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
Kosten aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
<b>Ergebnisse LCA/LCC Szenario 2:</b>
GWP aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
PERT aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
PENRT aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>
Kosten aller TGA-Komponenten und Energiebedarfe <sup>2</sup>

**Tabelle A.10.:** Auflistung der Farbcodierung zur Darstellung des spezifischen Primärenergiebedarfs

Spezifischer Primärenergiebedarf [kWh/m <sup>2</sup> * a]	Farbcodierung
≤25,0	rgb (0,0, 1,0, 0,0)
> 25,0 und ≤50,0	rgb (0,5, 1,0, 0,0)
> 50,0 und ≤75,0	rgb (0,75, 1,0, 0,0)
> 75,0 und ≤100,0	rgb (0,85, 1,0, 0,0)
> 100,0 und ≤125,0	rgb (1,0, 1,0, 0,0)
> 125,0 und ≤150,0	rgb (1,0, 0,9, 0,0)
> 150,0 und ≤175,0	rgb (1,0, 0,8, 0,0)
> 175,0 und ≤200,0	rgb (1,0, 0,65, 0,0)
> 200,0 und ≤250,0	rgb (1,0, 0,5, 0,0)
> 250,0	rgb (1,0, 0,0, 0,0)

**Tabelle A.11.:** Fallspezifische Parameter (a - c<sub>3</sub>) für die Berechnung von U<sub>k</sub> (Quelle: [110])

Fallspezifische Parameter					
	a	b	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>
Boden	0,9671	-7,455	10,76	9,773	0,0265
Kellerwand	0,93328	-2,1552	0,0 <sup>a</sup>	1,466	0,1006

<sup>2</sup> LCA - Phasen: A1-A3 + B4 + B6 + C3 + C4 und LCC-Phasen: Herstellung + Austausch + Nutzung + Entsorgung

**Tabelle A.12.:** Fallspezifische Parameter ( $n_1 - d$ ) für die Berechnung von  $U_k$  (Quelle: [110])

<b>Fallspezifische Parameter</b>				
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	d
Boden	0,5532	0,6027	-0,9296	-0,0203
Kellerwand	0,0 <sup>a</sup>	0,45325	-1,0068	-0,0692

**Tabelle A.13.:** Mindestdicke der Dämmschicht von Rohrleitungen in Bezug auf den Rohrinne Durchmesser  $d_i$  (Quelle: [12])

<b>Rohrinne Durchmesser <math>d_i</math> [mm]</b>	<b>Mindestdicke Dämmschicht [mm]</b>
bis 22	20
über 22 bis 35	30
über 35 bis 100	gleich Innendurchmesser
über 100	100

**Tabelle A.14.:** Massenwerte Fußbodenheizung je Verlegeabstand und Quadratmeter Wohnfläche (Quelle: [59])

<b>Verlegeabstand [mm]</b>	<b>Masse pro m<sup>2</sup> [kg]</b>
100	2,49
150	1,93
200	1,37
250	0,80
300	0,24

**Tabelle A.15.:** Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstiger Umweltinformationen, Input- und Output-Indikatoren (Quelle: [59])

<b>Indikator</b>	<b>Input</b>	<b>Output</b>
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	X	-
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	X	-
Total-erneuerbare Primärenergie (PERT)	X	-
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	X	-
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	X	-
Total-nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	X	-
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	X	-
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	X	-
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	X	-
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	X	-
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	-	X
Entsorgter, nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	-	X
Entsorgter, radioaktiver Abfall (RWD)	-	X
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	-	X
Stoffe zum Recycling (MFR)	-	X
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	-	X
Exportierte elektrische Energie (EEE)	-	X
Exportierte thermische Energie (EET)	-	X

**Tabelle A.16.:** Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen (Quelle: [59])

<b>Indikatoren</b>
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)
Versauerungspotential (AP)
Eutrophierungspotential (EP)
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)

**Tabelle A.17.:** Betrachtete Wärmeerzeuger - Energiequellen: \*Hilfsenergie, \*\*Hauptenergiequelle

<b>TGA Komponente</b>	<b>Energiequelle</b>
Gas-Kessel	Gas + Strom*
Öl-Kessel	Öl + Strom*
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe	Wärme Außenluft + Strom*
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Wärme Grundwasser + Strom*
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdkollektor(en)	Erdwärme + Strom*
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdsonde(n)	Erdwärme + Strom*
Elektroheizung	Strom**
Biomasse-Kessel	Holz + Strom*
Fernwärmeabnahmestationen	Fernwärme + Strom*
Durchlauferhitzer	Strom**
Gas-Speicher-Wassererhitzer	Gas + Strom*
Solarthermie	Sonneneinstrahlung + Strom*

**Tabelle A.18.:** GWP-Werte ( $GWP_{B6, spez}$ ), in Anlehnung an die ÖkobaDat [59]

<b>Energiequelle</b>	<b>GWP [kg CO<sub>2</sub>-Äq./kWh]</b>
Erdgas	0,237
Biogas	0,024
Heizöl	0,370
Bio-Heizöl	0,037
Netz Strom-Mix	0,526
Ökostrom	0,008
Holz nicht-erneuerbarer Anteil	0,378
Holz erneuerbarer Anteil	0,029
Fernwärme nicht-erneuerbare Energiequelle	0,231
Fernwärme erneuerbare Energiequelle	0,029
Solarenergie	0,0
Umweltenergie	0,0

**Tabelle A.19.:** Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems - Einheitsdefinition LCA

<b>TGA Komponente</b>	<b>Einheit</b>
Gas-Kessel	Leistung [kW]
Öl-Kessel	Leistung [kW]
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe	Leistung [kW]
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Leistung [kW]
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdkollektor(en)	Leistung [kW]
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdsonde(n)	Leistung [kW]
Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]
Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]
Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]
Elektroheizung	Leistung [kW]
Biomasse-Kessel	Leistung [kW]
Fernwärmeabnahmestationen	Leistung [kW]
Durchlauferhitzer	Leistung [kW]
Gas-Speicher-Wassererhitzer	Leistung [kW]
Solarthermie	Leistung [kW]
Rohre Fußbodenheizung	Länge Rohrleitungen [m]
Radiatoren	Materialmasse [kg]
Öl-Tank	Volumen [Liter]
Rohre Heizungswasser	Materialmasse [kg]
Rohre Trinkwarmwasser	Materialmasse [kg]
Rohrleitungsdämmung	Materialvolumen [m <sup>3</sup> ]
Warmwasserspeicher	Materialmasse [kg]

**Tabelle A.20.:** Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems - Einheitendefinition LCC

TGA Komponente	Einheit
Gas-Kessel	Leistung [kW]
Öl-Kessel	Leistung [kW]
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe	Leistung [kW]
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Leistung [kW]
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdkollektor(en)	Leistung [kW]
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdsonde(n)	Leistung [kW]
Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe	WP-Leistung [kW]
Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe	Länge [m]
Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe	Länge [m]
Elektroheizung	Leistung [kW]
Biomasse-Kessel	Leistung [kW]
Fernwärmeabnahmestationen	Leistung [kW]
Durchlauferhitzer	Leistung [kW]
Gas-Speicher-Wassererhitzer	Leistung [kW]
Solarthermie	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]
Rohre Fußbodenheizung	Länge [m]
Radiatoren	Materialmasse [kg]
Öl-Tank	Volumen [l]
Rohre Heizungswasser	Länge [m]
Rohre Trinkwarmwasser	Länge [m]
Rohrleitungsdämmung	Materialvolumen [m <sup>3</sup> ]
Warmwasserspeicher	Volumen [l]

**Tabelle A.21.:** Temperatur-Korrekturfaktoren  $F_{xi}$  (Quelle: [112])

Bauteil <i>i</i>	$F_{xi}$	Temperatur-Korrekturfaktor [-]
Außenwand, Fenster	$F_{AW}, F_W$	1,0
Dach (als Systemgrenze)	$F_D$	1,0
Oberste Geschossdecke (Dachraum nicht ausgebaut)	$F_D$	0,8
Abseitenwand (Drempelwand)	$F_u$	0,8
Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	$F_u$	0,5
Unterer Gebäudeabschluss: - Kellerdecke zu unbeheiztem Keller - Fußboden auf Erdreich - Flächen des beheizten Kellers auf Erdreich	$F_G$	0,6

**Tabelle A.22.:** Flächenbezogene/r Wärmeverluste und Hilfsenergiebedarf der Verteilung  $q_{TW,d}$  und  $q_{TW,d,HE}$  für Trinkwarmwasser- und Zirkulationsleitungen (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$q_{TW,d}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]	$q_{TW,d,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	9,63	0,57
150	7,75	0,41
200	6,83	0,33
300	5,93	0,25
500	5,23	0,20
750	6,85	0,14
1.000	6,70	0,11
1.500	6,60	0,09
2.500	6,45	0,07
5.000	6,45	0,06
10.000	6,45	0,05

**Tabelle A.23.:** Flächenbezogene/r Wärmeverlust  $q_{TW,s}$  und Hilfsenergien  $q_{TW,s,HE}$  der Speicherung des Trinkwarmwassers (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	Wärmeverlust [kWh/m <sup>2</sup> * a]	Hilfsenergien [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	6,48	0,022
150	5,26	0,016
200	4,56	0,014
300	3,79	0,010
500	3,19	0,008
750	2,73	0,008
1.000	2,56	0,006
1.500	2,23	0,006
2.500	1,92	0,006
5.000	1,59	0,008
10.000	1,33	0,008

**Tabelle A.24.:** Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen  $e_{TW,g}$  und Hilfsenergien  $q_{TW,g,HE}$  für Öl- und Gas-Kessel - TWW (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$e_{TW,g}$ [-]	$q_{TW,g,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	1,33	0,25
150	1,28	0,22
200	1,25	0,20
300	1,22	0,17
500	1,19	0,15
750	0,97	0,11
1.000	0,96	0,10
1.500	0,94	0,08
2.500	0,92	0,07
5.000	0,90	0,05
10.000	0,89	0,04

**Tabelle A.25.:** Durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen  $e_{TW,g}$  und Hilfsenergien  $q_{TW,g,HE}$  für weitere Energiesysteme - TWW (Quelle: [114])

Energiesysteme	$e_{TW,g}$ [-]	$q_{TW,g,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
Gas-Speicher-Wassererhitzer	1,22	0,0
Elektrische Durchlauferhitzer	1,00	0,0
Heizungswärmepumpe	0,26	0,0
Trinkwarmwasserwärmepumpe	0,29	0,0
Solarsystem	0,00	0,0
Fernwärme	1,14	0,4

**Tabelle A.26.:** Flächenbezogene Wärmeverluste bei der Verteilung der Heizwärme  $q_d$  (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$q_d$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	5,98
150	4,63
200	3,94
300	3,26
500	2,72
750	2,44
1.000	2,31
1.500	2,16
2.500	2,06
5.000	1,98
10.000	1,93

**Tabelle A.27.:** Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeverluste bei der Speicherung der Heizwärme  $q_s$  (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$\varnothing q_s$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]	$q_s$ [kWh/m <sup>2</sup> * a] $\geq 40$ °C
100	1,10	2,6
150	0,80	1,9
200	0,65	1,5
300	0,45	1,1
500	0,30	0,7
750	0,23	0,5
1.000	0,15	0,4
1.500	0,13	0,3
2.500	0,08	0,2
5.000	0,08	0,2
10.000	0,08	0,2

**Tabelle A.28.:** Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeverluste und Hilfsenergien bei der Speicherung der Heizwärme  $q_S$ ,  $q_{S,HE}$  (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$q_S$ [kWh/m <sup>2</sup> * a] < 40 °C	$q_{S,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	1,4	1,01
150	1,0	0,73
200	0,8	0,59
300	0,6	0,41
500	0,4	0,27
750	0,3	0,20
1.000	0,2	0,14
1.500	0,2	0,12
2.500	0,1	0,07
5.000	0,1	0,07
10.000	0,1	0,07

**Tabelle A.29.:** Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen  $e_{TW,g}$  und Hilfsenergien  $q_{TW,g,HE}$  für Öl- und Gas-Kessel - Heizung (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$e_g$ [-]	$q_{g,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	1,06	0,79
150	1,04	0,66
200	1,03	0,58
300	1,02	0,48
500	1,01	0,38
750	1,05	0,31
1.000	1,05	0,27
1.500	1,04	0,23
2.500	1,04	0,18
5.000	1,03	0,13
10.000	1,03	0,09

**Tabelle A.30.:** Flächenbezogene durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen  $e_{TW,g}$  und Hilfsenergien  $q_{TW,g,HE}$  für Biomasse-Kessel - Heizung (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$e_g$ [-]	$q_{g,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	1,53	1,40
150	1,52	1,30
200	1,54	1,25
375	1,53	1,19
400	1,52	1,14

**Tabelle A.31.:** Durchschnittliche Wärmeerzeugeraufwandszahlen  $e_{TW,g}$  und Hilfsenergien  $q_{TW,g,HE}$  TWW für weitere Energiesysteme - Heizung (Quelle: [114])

Energiesysteme	$e_g$ [-]	$q_{g,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
Heizungswärmepumpe	0,322	0,0
Elektrische Heizung	1,0	0,0
Fernwärme	1,01	2,55

**Tabelle A.32.:** Flächenbezogener durchschnittlicher Hilfsenergiebedarf für die Wärmeverteilung  $q_{d,HE}$  (Quelle: [114])

$A_N$ [m <sup>2</sup> ]	$q_{d,HE}$ [kWh/m <sup>2</sup> * a]
100	2,49
150	1,73
200	1,37
300	1,01
500	0,73
750	0,60
1.000	0,53
1.500	0,46
2.500	0,41
5.000	0,37
10.000	0,34

**Tabelle A.33.:** Rohr-Materialdicke in Bezug zum Rohrinne Durchmesser  $R_i$  (Quelle: [59])

$R_i$ [m]	Materialdicke Rohrleitung [m]
0,01	0,002
0,012	0,00218
0,018	0,00275
0,022	0,00308
0,031	0,00383
0,036	0,00438
0,045	0,00508
0,049	0,00613
0,068	0,00698
0,082	0,00818
0,095	0,0151

**Tabelle A.34.:** Spezifische Entzugsleistungen unterschiedlicher Bodenarten nach VDI-Richtlinie 4640  
 $\theta_{m,e}$  (Quelle: [138])

<b>Bodenart</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit [W/m * K]</b>	<b>Gesättigter Boden (1.800 h/a) [W/m]</b>	<b>Trockener Boden (1.800 h/a) [W/m]</b>
Torf	0,2 - 0,7	40	-
Ton	0,4 - 1,0	40	-
Schluff	0,4 - 1,0	50	-
Sand	0,3 - 0,8	70	25
Kies	0,4 - 0,5	80	25
Steine	0,4 - 0,5	75	25
Sandstein	1,3 - 5,1	80	40
Tonstein	1,1 - 3,5	70	-
Kalkstein	2,5 - 4,0	65	-
(Hart-) Braunkohle	0,2 - 0,7	45	-
Mudde	0,4 - 0,9	40	-
Mergel	1,5 - 3,5	45	-
Tonmergel	1,5 - 3,5	45	-
Lehm	0,4 - 1,0	45	-
Geschiebelehm	0,4 - 1,0	45	-
Geschiebemergel	0,4 - 1,0	45	-
Feinstsand	0,3 - 0,8	65	25
Feinsand	0,3 - 0,8	70	25
Mittelsand	0,3 - 0,8	75	25
Grobsand	0,3 - 0,8	75	25
Feinkies	0,4 - 0,5	80	25
Mittelkies	0,4 - 0,5	80	25
Grobkies	0,4 - 0,5	80	25
Steine, fein	0,4 - 0,5	80	25
Geröll	0,4 - 0,5	70	25
Kalkmergelstein	0,4 - 1,0	60	-
Schreibkreide	0,4 - 1,0	45	-

**Tabelle A.35.:** Fixe Berechnungsparameter zur Leitungslängenberechnung des Warmwasserheizungsrohrnetzes (Quelle: [85][140])

<b>Fixe Berechnungsparameter</b>								
Heizungsverteilsystem	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
I	30	2,30	0,79	2,56	0,10	0,0006	0,06	1,13
IIa	30	0,17	1,05	-	0,008	1,12	0,30	1,11
IIb	30	0,17	1,05	-	0,008	1,12	0,0	1,00
III	30	2,60	0,72	-	0,008	1,39	0,25	1,00
IV	-	0,35	0,90	-	0,0007	-	0,10	1,13

**Tabelle A.36.:** Fixe Berechnungsparameter zur Leitungslängenberechnung der Trinkwarmwassersysteme (Quelle: [85][140])

<b>Fixe Berechnungsparameter</b>								
Trinkwarmwassersystem	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
I	0,0	0,11	1,24	0,0	0,005	1,38	0,09	1,00
II	0,0	0,035	1,50	0	0,36	0,58	0,09	1,00
III	-	-	-	-	-	-	0,09	1,00

**Tabelle A.37.:** Verwendete LCA-Datensätze zur Errechnung der komponentenspezifischen Durchschnittsdatensätze aus der Ökobaudat (Quelle: [59])

<b>Verwendete LCA-Datensätze als Basis der Durchschnittsdatensätze</b>
<b>Gas-Kessel</b> Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät) Gas-Niedertemperaturgerät 120-400 kW (Standgerät) Gas-Niedertemperaturgerät < 20 kW (Standgerät) Gas-Niedertemperaturgerät 20-120 kW (Standgerät) Gas-Brennwertgerät 120-400 kW (Standgerät) Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Standgerät) Gas-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät)
<b>Öl-Kessel</b> Öl-Brennwertgerät 120-400 kW (Standgerät) Öl-Niedertemperaturgerät 20-120 kW (Standgerät) Öl-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät) Öl-Niedertemperaturgerät 120-400 kW (Standgerät) Öl-Niedertemperaturgerät < 20 kW (Standgerät) Öl-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät) Öl-Brennwertgerät < 20 kW (Standgerät)
<b>Rohre Fußbodenheizung</b> Fußbodenheizung PEX (100 mm Abstand) Fußbodenheizung Kupfer (100 mm Abstand)

<p>Fußbodenheizung PP (100 mm Abstand)</p> <p>Fußbodenheizung Kupfer (200 mm Abstand)</p> <p>Fußbodenheizung PEX (200 mm Abstand)</p> <p>Fußbodenheizung PP (200 mm Abstand)</p>
<p><b>Außenluft-Wasser-Wärmepumpe</b></p> <p>Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 14kW</p>
<p><b>Wasser-Wasser-Wärmepumpe</b></p> <p>Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 70 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 10 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 20 kW</p>
<p><b>Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdkollektor(en)</b></p> <p>Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 10 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 20 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 70 kW</p>
<p><b>Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdsonde(n)</b></p> <p>Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 70 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 20 kW</p> <p>Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10 kW</p>
<p><b>Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe</b></p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 70 kW</p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 20 kW</p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 10 kW</p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 70 kW</p>
<p><b>Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe</b></p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 70 kW</p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 20 kW</p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 10 kW</p>
<p><b>Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe</b></p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10 kW</p> <p>Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 20 kW</p>
<p><b>Elektroheizung</b></p> <p>Elektrischer Durchlauferhitzer (21 kW)</p> <p>Heizkörper</p>
<p><b>Biomasse-Kessel</b></p> <p>Hackschnitzelkessel &lt; 20 kW</p> <p>Hackschnitzelkessel 20 - 120 kW</p> <p>Hackschnitzelkessel 120 - 400 kW</p> <p>Pelletkessel &lt; 20 kW</p> <p>Pelletkessel 20-120 kW</p>

<b>Fernwärmeabnahmestationen</b> Fernwärmeabnahmestationen
<b>Durchlauferhitzer</b> Elektrischer Durchlauferhitzer (21 kW)
<b>Gas-Speicher-Wassererhitzer</b> Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät) Gas-Niedertemperaturgerät 120-400 kW (Standgerät) Gas-Niedertemperaturgerät < 20 kW (Standgerät) Gas-Niedertemperaturgerät 20-120 kW (Standgerät) Gas-Brennwertgerät 120-400 kW (Standgerät) Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Standgerät) Gas-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät) Pufferspeicher (Edelstahl) Pufferspeicher (Stahl)
<b>Solarthermie</b> Solaranlage Flachkollektor Solaranlage Vakuumröhrenkollektor
<b>Rohre Fußbodenheizung</b> Fußbodenheizung PP (200 mm Abstand) Fußbodenheizung PP (100 mm Abstand) Fußbodenheizung PEX (200 mm Abstand) Fußbodenheizung PEX (100 mm Abstand) Fußbodenheizung Kupfer (200 mm Abstand) Fußbodenheizung Kupfer (100 mm Abstand)
<b>Radiatoren</b> Heizkörper
<b>Öl-Tank</b> Öl-Tank PE-HD (1500) Öl-Tank Polyamid (750l) Öl-Tank Polyamid (1000l) Öl-Tank Polyamid (1500l) Öl-Tank PE-HD (1000l) Öl-Tank Stahl/PE-HD (Doppelwandtank, 1000l) Öl-Tank PE-HD (750l) Öl-Tank Stahl/PE-HD (Doppelwandtank, 750l)
<b>Rohre Heizungswasser + Trinkwarmwasser</b> Polybutadien-Rohr (PB) Abwasserrohr PP Edelstahl Trinkwasserrohr
<b>Rohrleitungsdämmung</b> Steinwolle Heizungsrohrschale EPDM Schaum (Rohrisolierung)

**Warmwasserspeicher**

Pufferspeicher (Edelstahl)

Pufferspeicher (Stahl)

**Tabelle A.38.:** LCA-Durchschnittswerte für die Indikatoren GWP, PERT, PENRT für die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4, C3 und C4 (Quelle: [59])

LCA-Phase	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./Einheit]	PENRT [kWh/Einheit]	PERT [kWh/Einheit]
<b>Gas-Kessel [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	19,31	244,88	47,43
C3	0,04	0,55	0,20
C4	0,59	0,55	0,12
B4	19,94	245,97	47,75
<b>Öl-Kessel [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	27,27	342,20	66,56
C3	0,06	0,80	0,29
C4	0,79	0,75	0,16
B4	28,12	343,74	67,02
<b>Außenluft-Wasser-Wärmepumpe [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	45,29	571,49	109,70
C3	0,12	1,62	0,59
C4	3,44	1,60	0,19
B4	48,85	574,71	110,48
<b>Wasser-Wasser-Wärmepumpe [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	17,03	185,34	23,78
C3	0,06	0,78	0,29
C4	0,33	0,23	0,047
B4	17,42	186,35	24,12
<b>Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdkollektoren [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	22,52	370,04	35,00
C3	0,074	0,98	0,28
C4	0,27	0,20	0,04
B4	22,87	371,21	36,31
<b>Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdsonde [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	92,88	2.739,48	192,62
C3	0,32	4,36	0,49
C4	0,27	0,20	0,04
B4	93,47	2.744,04	193,15

<b>Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe [Indikatorwert/1 kW WP-Leistung]</b>			
A1-A3	9,20	5.607,34	531,85
C3	0,01	2,31	0,87
C4	0,00	0,23	0,03
B4	9,21	5.609,89	532,75
<b>Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe [Indikatorwert/1 kW WP-Leistung]</b>			
A1-A3	33,66	1.247,73	80,28
C3	0,09	1,21	0,37
C4	0,08	1,22	0,15
B4	33,84	1.250,15	80,80
<b>Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe [Indikatorwert/1 kW WP-Leistung]</b>			
A1-A3	79,11	883,35	176,42
C3	0,15	2,04	0,62
C4	0,15	2,23	0,29
B4	79,42	887,63	177,33
<b>Elektroheizung [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	9,66	149,27	15,42
C3	0,02	0,27	0,09
C4	2,46	0,59	0,12
B4	12,15	150,13	15,63
<b>Biomasse-Kessel [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	48,50	502,88	39,18
C3	0,15	1,95	0,64
C4	0,15	1,42	0,16
B4	48,79	506,24	39,98
<b>Fernwärmeabnahmestationen [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	4,85	61,37	7,69
C3	0,01	0,12	0,04
C4	0,22	0,24	0,06
B4	5,06	61,72	7,79
<b>Durchlauferhitzer [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	14,87	244,43	29,11
C3	0,03	0,41	0,13
C4	4,93	1,16	0,24
B4	19,82	246,00	29,48
<b>Gas-Speicher-Wassererhitzer [Indikatorwert/1 kW Leistung]</b>			
A1-A3	11,46	147,82	27,17
C3	0,03	0,33	0,12
C4	0,63	0,75	0,18
B4	12,11	148,90	27,47

<b>Solarthermie [Indikatorwert/1 m<sup>2</sup>]</b>			
A1-A3	107,53	1.371,14	455,44
C3	109,46	1.377,76	456,59
C4	0,15	2,03	0,48
B4	-45,97	-578,93	-163,15
<b>Rohre Fußbodenheizung [Indikatorwert/1 kg Materialmasse]</b>			
A1-A3	3,78	90,01	8,10
C3	0,01	0,077	0,01
C4	2,60	0,41	0,07
B4	6,38	90,49	8,19
<b>Radiatoren [Indikatorwert/1 kg Materialmasse]</b>			
A1-A3	4,46	54,12	1,73
C3	0,01	0,13	0,05
C4	0,00	0,01	0,01
B4	4,47	54,26	1,78
<b>Öl-Tank [Indikatorwert/1 l Speichervolumen]</b>			
A1-A3	0,29	6,08	0,49
C3	0,00	0,01	0,01
C4	0,14	0,04	0,01
B4	0,44	6,12	0,50
<b>Rohre Heizungswasser + Trinkwarmwasser [Indikatorwert/1 kg Materialmasse]</b>			
A1-A3	3,45	79,38	8,40
C3	0,01	0,07	0,02
C4	2,15	0,34	0,06
B4	5,60	79,79	8,48
<b>Dämmung Rohrleitungen [Indikatorwert/1 m<sup>3</sup> Materialvolumen]</b>			
A1-A3	280,18	4.707,92	619,42
C3	0,11	1,53	0,09
C4	68,87	33,02	8,13
B4	349,16	4.742,47	627,64
<b>Wärmespeicherung [Indikatorwert/1 kg Materialmasse]</b>			
A1-A3	3,60	50,77	6,91
C3	0,01	0,11	0,04
C4	0,66	0,95	0,25
B4	4,27	51,83	7,20

**Tabelle A.39.:** LCC-Durchschnittswerte für die LCC-Phasen Herstellung, Austausch und Ersatz sowie Entsorgung (Quelle: [152] [153] [154])

<b>LCA-Phase</b>	<b>Euro [€/Einheit]</b>
<b>Gas-Kessel [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	98,78
Austausch	106,86
Entsorgung	8,08
<b>Öl-Kessel [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	115,49
Austausch	123,57
Entsorgung	8,08
<b>Außenluft-Wasser-Wärmepumpe [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	1.009,35
Austausch	1017,43
Entsorgung	8,08
<b>Wasser-Wasser-Wärmepumpe [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	836,93
Austausch	845,01
Entsorgung	8,08
<b>Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdkollektoren [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	674,67
Austausch	682,75
Entsorgung	8,08
<b>Sole-Wasser-Wärmepumpe Erdsonde [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	674,67
Austausch	682,75
Entsorgung	8,08
<b>Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe [€/1 kW WP-Leistung]</b>	
Herstellung	195,74
Austausch	260,98
Entsorgung	65,2
<b>Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe [€/1 kW WP-Leistung]</b>	
Herstellung	15,08
Austausch	20,08
Entsorgung	5,00
<b>Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe [€/1 kW WP-Leistung]</b>	
Herstellung	32,95
Austausch	43,93
Entsorgung	11,00
<b>Elektroheizung [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	639,00

Austausch	639,00
Entsorgung	230,00
<b>Biomasse-Kessel [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	325,47
Austausch	333,55
Entsorgung	8,08
<b>Fernwärmeabnahmestationen [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	229,71
Austausch	237,79
Entsorgung	8,08
<b>Durchlauferhitzer [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	25,53
Austausch	17,45
Entsorgung	8,08
<b>Gas-Speicher-Wassererhitzer [€/1 kW Leistung]</b>	
Herstellung	162,52
Austausch	154,44
Entsorgung	8,08
<b>Solar [€/m<sup>2</sup>]</b>	
Herstellung	596
Austausch	596
Entsorgung	0,00
<b>Rohre Fußbodenheizung [€/kg Rohrleitung]</b>	
Herstellung	14,92
Austausch	19,89
Entsorgung	4,97
<b>Radiatoren [€/kg Materialmasse]</b>	
Herstellung	10,82
Austausch	11,24
Entsorgung	0,42
<b>Öl-Tank [€/m<sup>3</sup> Speichervolumen]</b>	
Herstellung	1,13
Austausch	2,15
Entsorgung	1,02
<b>Rohre Heizungswasser [€/kg Materialmasse]</b>	
Herstellung	25,34
Austausch	34,01
Entsorgung	9,67
<b>Rohre Trinkwarmwasser [€/kg Materialmasse]</b>	
Herstellung	195,74
Austausch	260,98

Entsorgung	65,20
<b>Dämmung Rohrleitungen [€/m<sup>3</sup> Materialvolumen]</b>	
Herstellung	511,05
Austausch	522,72
Entsorgung	11,67
<b>Wärmespeicherung [€/l Speichervolumen]</b>	
Herstellung	8,29
Austausch	9,95
Entsorgung	1,66

**Tabelle A.40.:** Input-Parameter für urbi+, inkl. Minimum- und Maximumwert für die Unsicherheitsanalyse

Parametergruppe/Parameter	Minimum	Maximum
<b>Prozentuale Energiesystemverteilung (ESD):</b>		
Gas-Kessel für TWW	0	100
Öl-Kessel für TWW	0	100
Gas-Speicher-Wassererhitzer für TWW	0	100
elektrische Durchlauferhitzer für TWW	0	100
Wärmepumpen für TWW	0	100
Solarthermieranlagen für TWW	0	100
Fernwärmeabnahmestationen für TWW	0	100
Biomasse-Kessel für TWW	0	100
Gas-Kessel für Raumheizung	0	100
Öl-Kessel für Raumheizung	0	100
Luft-Wasser-Wärmepumpen für Raumheizung	0	100
Sole-Wasser-Wärmepumpen (Erdkollektor) für Raumheizung		100
Sole-Wasser-Wärmepumpen (Erdsonde) für Raumheizung	0	100
Wasser-Wasser-Wärmepumpen für Raumheizung	0	100
Elektroheizungen für Raumheizung	0	100
Fernwärmeabnahmestationen für Raumheizung	0	100
Biomasse-Kessel für Raumheizung	0	100
<b>Primärenergiefaktor (PEF):</b>		
Öl	1	1,1
Gas	1	1,1
Holz	0,3	0,7
Fernwärme	0,1	1
Strom	0,5	1,8
<b>Komponenten Lebensdauer (KL)</b>		
Gas-Kessel für TWW	20	50
Öl-Kessel für TWW	15	50

Gas-Speicher-Wassererhitzer für TWW	15	50
Elektrische Durchlauferhitzer für TWW	15	50
Wärmepumpen für TWW	15	50
Solarthermieanlagen für TWW	15	50
Fernwärmeabnahmestationen für TWW	15	50
Biomasse-Kessel für TWW	15	50
Gas-Kessel für Raumheizung	15	50
Öl-Kessel für Raumheizung	15	50
Luft-Wasser-Wärmepumpen für Raumheizung	15	50
Sole-Wasser-Wärmepumpen (Erdkollektor) für Raumheizung	15	50
Sole-Wasser-Wärmepumpen (Erdsonde) für Raumheizung	15	50
Wasser-Wasser-Wärmepumpen für Raumheizung	15	50
Elektroheizungen für Raumheizung	15	50
Fernwärmeabnahmestationen für Raumheizung	15	50
Biomasse-Kessel für Raumheizung	15	50
Erdkollektoren	15	50
Erdsonden	15	50
Brunnensystem/Erdsonden	15	50
Heizungsrohrleitungen	15	50
Trinkwarmwasserleitungen	15	50
Rohrleitungsdämmung	15	50
Warmwasserspeicher	15	50
Öl-Tank	15	50
Fußbodenheizung	15	50
Radiator	15	50
<b>Wärmeübergabesystemverteilung (WÜS):</b>		
Fußbodenheizungen	0	100
Radiatoren	0	100
<b>Erneuerbare Energien Primärenergiequelle (AEE):</b>		
Erneuerbarer Anteil Heizöl	0	20
Nicht-erneuerbarer Anteil Heizöl	80	100
Erneuerbarer Anteil Gas	0	20
Nicht-erneuerbarer Anteil Gas	80	100
Erneuerbarer Anteil Holz	70	100
Nicht-erneuerbarer Anteil Holz	0	30
Erneuerbarer Anteil Fernwärme	0	100
Nicht-erneuerbarer Anteil Fernwärme	0	100
Erneuerbarer Anteil Strom	0	100
Nicht-erneuerbarer Anteil Strom	0	100
<b>Durchschnittliche Lebensdauer Gebäude (LD):</b>		
Durchschnittliche Lebensdauer Gebäude	20	100
Prozentualer Anteil beheizter Dachgeschosse	0	100

Entwicklungszeitraum	10,0	30,0
<b>Kostenwerte Endenergie und Emissionen (KW):</b>		
Öl	0,2	0,4
Gas	0,2	0,4
Holz	0,2	0,4
Fernwärme	0,2	0,4
Strom	0,2	0,4
Solar	0,2	0,4
GWP	20	25
<b>Zusätzliche Berechnungsfaktoren (FAK):</b>		
Standortfaktor LCC	0,847	1,326
Kostenfaktor LCC	1,2	1,8
Komponentenfaktor LCA	0	80
<b>U-/g-Werte (UGW):</b>		
Außenwand Stahlbeton	0,2	1,5
Außenwand Mauerwerk	0,15	1,3
Außenwand Holz	0,15	2
Außenwand weitere Ausführungsvarianten	0,15	2
Bodenplatte gegen Erdreich	0,3	1,6
Bodenplatte gegen Erdreich weitere Ausführungsvarianten	0,3	1,6
Bodenplatte massiv gegen Keller	0,3	1,2
Bodenplatte Holz gegen Keller	0,3	1
Bodenplatte weitere Ausführungsvarianten	0,3	1,2
Flachdach	0,15	2,1
Flachdach weitere Ausführungsvarianten	0,3	1
Spitzdach	0,15	2,6
Spitzdach weitere Ausführungsvarianten	0,15	2,6
Oberste Geschossdecke massiv	0,15	2,1
Oberste Geschossdecke Holz	0,15	1
Oberste Geschossdecke weitere Ausführungsvarianten	0,15	2,1
Außenwand gegen Erdreich	0,3	2,2
Außenwand gegen Erdreich weitere Ausführungsvarianten	0,3	2,2
Holzrahmen Fenster einfach verglast	3	5
Holzrahmen Fenster zweifach verglast	1,2	2,7
Plastikrahmen Fenster	1,2	3
Alu-Stahlrahmen Fenster	1,2	4,3
Fenster weitere Ausführungsvarianten	1,2	5
Holzrahmen Fenster einfach verglast	0,5	0,78
Holzrahmen Fenster zweifach verglast	0,5	0,87
Plastikrahmen Fenster	0,5	0,78
Alu-Stahlrahmen Fenster	0,5	0,78

g-Wert Fenster weitere Ausführungsvarianten	1,2	5
<b>Temperaturwerte (TEM):</b>		
Durchschnittliche, jährliche Außentemperatur	-16	-13
Durchschnittliche, jährliche Mindesttemperatur	7,9	10,9
<b>LCA-Werte aller betrachteter Komponenten (LCA):</b> (alle Werte für Phase D exkludiert)		
GWP AW-Wärmepumpe A1-A3	22,6	67,9
GWP AW-Wärmepumpe B4	24,4	73,3
GWP AW-Wärmepumpe C3	0,1	0,2
GWP AW-Wärmepumpe C4	1,7	5,2
PENRT AW-Wärmepumpe A1-A3	285,7	857,2
PENRT AW-Wärmepumpe C3	287,4	862,1
PENRT AW-Wärmepumpe B4	0,8	2,4
PENRT AW-Wärmepumpe C4	0,8	2,4
PERT AW-Wärmepumpe A1-A3	284,8	854,3
PERT AW-Wärmepumpe B4	286,4	859,1
PERT AW-Wärmepumpe C3	0,8	2,4
PERT AW-Wärmepumpe C4	0,8	2,4
GWP Öl-Kessel A1-A3	13,6	40,9
GWP Öl-Kessel B4	14,1	42,2
GWP Öl-Kessel C3	0,0	0,1
GWP Öl-Kessel C4	0,4	1,2
PENRT Öl-Kessel A1-A3	171,1	513,3
PENRT Öl-Kessel C3	171,9	515,6
PENRT Öl-Kessel B4	0,4	1,2
PENRT Öl-Kessel C4	0,4	1,1
PERT Öl-Kessel A1-A3	33,3	99,8
PERT Öl-Kessel B4	33,5	100,5
PERT Öl-Kessel C3	0,1	0,4
PERT Öl-Kessel C4	0,1	0,2
GWP Gas-Kessel A1-A3	9,7	29
GWP Gas-Kessel B4	10	29,9
GWP Gas-Kessel C3	0,0	0,1
GWP Gas-Kessel C4	0,3	0,9
PENRT Gas-Kessel A1-A3	122,4	367,3
PENRT Gas-Kessel C3	123	369
PENRT Gas-Kessel B4	0,3	0,8
PENRT Gas-Kessel C4	0,3	0,8
PERT Gas-Kessel A1-A3	23,7	71,1
PERT Gas-Kessel B4	23,9	71,6
PERT Gas-Kessel C3	0,1	0,3
PERT Gas-Kessel C4	0,1	0,2

GWP Biomasse-Kessel A1-A3	24,2	72,7
GWP Biomasse-Kessel B4	24,4	73,2
GWP Biomasse-Kessel C3	0,1	0,2
GWP Biomasse-Kessel C4	0,1	0,2
PENRT Biomasse-Kessel A1-A3	251,4	754,3
PENRT Biomasse-Kessel C3	253,1	759,4
PENRT Biomasse-Kessel B4	1	2,9
PENRT Biomasse-Kessel C4	0,7	2,1
PERT Biomasse-Kessel A1-A3	19,6	58,8
PERT Biomasse-Kessel B4	20	60
PERT Biomasse-Kessel C3	0,3	1
PERT Biomasse-Kessel C4	0,1	0,2
GWP elektrischer Durchlauferhitzer A1-A3	7,4	22,3
GWP elektrischer Durchlauferhitzer B4	9,9	29,7
GWP elektrischer Durchlauferhitzer C3	0,0	0,00001
GWP elektrischer Durchlauferhitzer C4	2,5	7,4
PENRT elektrischer Durchlauferhitzer A1-A3	122,2	366,6
PENRT elektrischer Durchlauferhitzer C3	123	369
PENRT elektrischer Durchlauferhitzer B4	0,2	0,6
PENRT elektrischer Durchlauferhitzer C4	0,6	1,7
PERT elektrischer Durchlauferhitzer A1-A3	14,6	43,7
PERT elektrischer Durchlauferhitzer B4	14,7	44,2
PERT elektrischer Durchlauferhitzer C3	0,1	0,2
PERT elektrischer Durchlauferhitzer C4	0,1	0,4
GWP Fernwärmeabnahmestation A1-A3	2,4	7,3
GWP Fernwärmeabnahmestation B4	2,5	7,6
GWP Fernwärmeabnahmestation C3	0,0	0,00001
GWP Fernwärmeabnahmestation C4	0,1	0,3
PENRT Fernwärmeabnahmestation A1-A3	30,7	92,1
PENRT Fernwärmeabnahmestation C3	30,9	92,6
PENRT Fernwärmeabnahmestation B4	0,1	0,2
PENRT Fernwärmeabnahmestation C4	0,1	0,4
PERT Fernwärmeabnahmestation A1-A3	3,8	11,5
PERT Fernwärmeabnahmestation B4	3,9	11,7
PERT Fernwärmeabnahmestation C3	0,0	0,1
PERT Fernwärmeabnahmestation C4	0,0	0,1
GWP Solarthermieanlage A1-A3	53,8	161,3
GWP Solarthermieanlage B4	54,7	164,2
GWP Solarthermieanlage C3	0,1	0,2
GWP Solarthermieanlage C4	0,9	2,7
PENRT Solarthermieanlage A1-A3	685,6	2.056,7
PENRT Solarthermieanlage C3	688,9	2.066,6

PENRT Solarthermieanlage B4	1	3
PENRT Solarthermieanlage C4	2,3	6,9
PERT Solarthermieanlage A1-A3	227,7	683,2
PERT Solarthermieanlage B4	228,3	684,9
PERT Solarthermieanlage C3	0,2	0,7
PERT Solarthermieanlage C4	0,3	1
GWP WW-Wärmepumpe A1-A3	8,5	25,5
GWP WW-Wärmepumpe B4	8,7	26,1
GWP WW-Wärmepumpe C3	0,0	0,1
GWP WW-Wärmepumpe C4	0,2	0,5
PENRT WW-Wärmepumpe A1-A3	92,7	278
PENRT WW-Wärmepumpe C3	93,2	279,5
PENRT WW-Wärmepumpe B4	0,4	1,2
PENRT WW-Wärmepumpe C4	0,1	0,3
PERT WW-Wärmepumpe A1-A3	0,1	0,4
PERT WW-Wärmepumpe B4	0,0	0,1
PERT WW-Wärmepumpe C3	1,2	3,5
PERT WW-Wärmepumpe C4	12,1	36,2
GWP SW-Wärmepumpe Erdkollektoren A1-A3	11,3	33,8
GWP SW-Wärmepumpe Erdkollektoren B4	11,4	34,3
GWP SW-Wärmepumpe Erdkollektoren C3	0,0	0,1
GWP SW-Wärmepumpe Erdkollektoren C4	0,1	0,4
PENRT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren A1-A3	185	555,1
PENRT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren C3	185,6	556,8
PENRT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren B4	0,5	1,5
PENRT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren C4	0,1	0,3
PERT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren A1-A3	18	54
PERT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren B4	18,2	54,5
PERT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren C3	0,1	0,4
PERT SW-Wärmepumpe Erdkollektoren C4	0,0	0,1
GWP SW-Wärmepumpe Erdsonden A1-A3	46,4	139,3
GWP SW-Wärmepumpe Erdsonden B4	46,7	140,2
GWP SW-Wärmepumpe Erdsonden C3	0,2	0,5
GWP SW-Wärmepumpe Erdsonden C4	0,1	0,4
PENRT SW-Wärmepumpe Erdsonden A1-A3	1.369,7	4.109,2
PENRT SW-Wärmepumpe Erdsonden C3	1372	4.116,1
PENRT SW-Wärmepumpe Erdsonden B4	2,2	6,5
PENRT SW-Wärmepumpe Erdsonden C4	0,1	0,3
PERT SW-Wärmepumpe Erdsonden A1-A3	96,3	288,9
PERT SW-Wärmepumpe Erdsonden B4	96,6	289,7
PERT SW-Wärmepumpe Erdsonden C3	0,2	0,7
PERT SW-Wärmepumpe Erdsonden C4	0,0	0,1

GWP Erdsonden A1-A3	0,6	1,7
GWP Erdsonden B4	0,6	1,7
GWP Erdsonden C3	0,0	0,00001
GWP Erdsonden C4	0,0	0,00001
PENRT Erdsonden A1-A3	6,4	19,2
PENRT Erdsonden C3	6,5	19,5
PENRT Erdsonden B4	0,0	0,00001
PENRT Erdsonden C4	0,1	0,3
PERT Erdsonden A1-A3	1,3	3,8
PERT Erdsonden B4	1,3	3,9
PERT Erdsonden C3	0,0	0,00001
PERT Erdsonden C4	0,0	0,00001
GWP Erdkollektoren A1-A3	0,4	1,1
GWP Erdkollektoren B4	0,4	1,1
GWP Erdkollektoren C3	0,0	0,00001
GWP Erdkollektoren C4	0,0	0,00001
PENRT Erdkollektoren A1-A3	12,6	37,9
PENRT Erdkollektoren C3	12,7	38,2
PENRT Erdkollektoren B4	0,0	0,00001
PENRT Erdkollektoren C4	0,1	0,3
PERT Erdkollektoren A1-A3	0,8	2,5
PERT Erdkollektoren B4	0,8	2,5
PERT Erdkollektoren C3	0,0	0,00001
PERT Erdkollektoren C4	0,0	0,00001
GWP Brunnensystem/Erdsonde A1-A3	4,6	13,8
GWP Brunnensystem/Erdsonde B4	4,6	13,8
GWP Brunnensystem/Erdsonde C3	0,0	0,00001
GWP Brunnensystem/Erdsonde C4	0,0	0,00001
PENRT Brunnensystem/Erdsonde A1-A3	2.803,7	8.411
PENRT Brunnensystem/Erdsonde C3	2.804,9	8.414,8
PENRT Brunnensystem/Erdsonde B4	1,2	3,5
PENRT Brunnensystem/Erdsonde C4	0,1	0,3
PERT Brunnensystem/Erdsonde A1-A3	265,9	797,8
PERT Brunnensystem/Erdsonde B4	266,4	799,1
PERT Brunnensystem/Erdsonde C3	0,4	1,3
PERT Brunnensystem/Erdsonde C4	0,0	0,00001
GWP Rohrleitungen Raumheizung/TWW A1-A3	1,7	5,2
GWP Rohrleitungen Raumheizung/TWW B4	2,8	8,4
GWP Rohrleitungen Raumheizung/TWW C3	0,0	0,00001
GWP Rohrleitungen Raumheizung/TWW C4	1,1	3,2
PENRT Rohrleitungen Raumheizung/TWW A1-A3	39,7	119,1
PENRT Rohrleitungen Raumheizung/TWW C3	39,9	119,7

PENRT Rohrleitungen Raumheizung/TWW B4	0,0	0,1
PENRT Rohrleitungen Raumheizung/TWW C4	0,2	0,5
PERT Rohrleitungen Raumheizung/TWW A1-A3	4,2	12,6
PERT Rohrleitungen Raumheizung/TWW B4	4,2	12,7
PERT Rohrleitungen Raumheizung/TWW C3	0,0	0,00001
PERT Rohrleitungen Raumheizung/TWW C4	0,0	0,1
GWP Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW A1-A3	140,1	420,3
GWP Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW B4	174,6	523,7
GWP Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW C3	0,1	0,2
GWP Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW C4	34,4	103,3
PENRT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW A1-A3	2.354	7.061,9
PENRT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW C3	2.371,2	7.113,7
PENRT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW B4	0,8	2,3
PENRT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW C4	16,5	49,5
PERT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW A1-A3	309,7	929,1
PERT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW B4	313,8	941,5
PERT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW C3	0,0	0,1
PERT Dämmung Rohrleitungen Raumheizung/TWW C4	4,1	12,2
GWP Fußbodenheizung A1-A3	0,9	2,8
GWP Fußbodenheizung B4	1,1	3,4
GWP Fußbodenheizung C3	0,0	0,00001
GWP Fußbodenheizung C4	0,2	0,6
PENRT Fußbodenheizung A1-A3	72,4	217,1
PENRT Fußbodenheizung C3	72,8	218,3
PENRT Fußbodenheizung B4	0,1	0,4
PENRT Fußbodenheizung C4	0,3	0,8
PERT Fußbodenheizung A1-A3	10,8	32,3
PERT Fußbodenheizung B4	10,8	32,5
PERT Fußbodenheizung C3	0,0	0,1
PERT Fußbodenheizung C4	0,1	0,2
GWP Radiatoren A1-A3	2,2	6,7
GWP Radiatoren B4	2,2	6,7
GWP Radiatoren C3	0,0	0,00001
GWP Radiatoren C4	0,0	0,00001
PENRT Radiatoren A1-A3	27,1	81,2
PENRT Radiatoren C3	27,1	81,4
PENRT Radiatoren B4	0,1	0,2
PENRT Radiatoren C4	0,0	0,00001
PERT Radiatoren A1-A3	0,9	2,6
PERT Radiatoren B4	0,9	2,7
PERT Radiatoren C3	0,0	0,1
PERT Radiatoren C4	0,0	0,00001

GWP Warmwasserspeicher A1-A3	1,8	5,4
GWP Warmwasserspeicher B4	2,1	6,4
GWP Warmwasserspeicher C3	0,0	0,00001
GWP Warmwasserspeicher C4	0,3	1
PENRT Warmwasserspeicher A1-A3	25,4	76,2
PENRT Warmwasserspeicher C3	25,9	77,7
PENRT Warmwasserspeicher B4	0,1	0,2
PENRT Warmwasserspeicher C4	0,5	1,4
PERT Warmwasserspeicher A1-A3	3,5	10,4
PERT Warmwasserspeicher B4	3,6	10,8
PERT Warmwasserspeicher C3	0,0	0,1
PERT Warmwasserspeicher C4	0,1	0,4
GWP Öl-Tank A1-A3	0,1	0,4
GWP Öl-Tank B4	0,2	0,7
GWP Öl-Tank C3	0,0	0,00001
GWP Öl-Tank C4	0,1	0,2
PENRT Öl-Tank A1-A3	3	9,1
PENRT Öl-Tank C3	3,1	9,2
PENRT Öl-Tank B4	0,0	0,00001
PENRT Öl-Tank C4	0,0	0,1
PERT Öl-Tank A1-A3	0,2	0,7
PERT Öl-Tank B4	0,2	0,7
PERT Öl-Tank C3	0,0	0,00001
PERT Öl-Tank C4	0,0	0,00001
<b>Kostenwerte aller betrachteten Komponenten (KOST):</b> (alle Werte für Phase D exkludiert)		
Öl-Kessel A1-A3	57,7	173,2
Öl-Kessel B4	61,8	185,4
Öl-Kessel C3	4	12,1
Öl-Kessel C4	0,0	0,00001
Gas-Kessel A1-A3	49,4	148,2
Gas-Kessel B4	53,4	160,3
Gas-Kessel C3	4	12,1
Gas-Kessel C4	0,0	0,00001
Biomasse-Kessel A1-A3	162,7	488,2
Biomasse-Kessel B4	166,8	500,3
Biomasse-Kessel C3	4	12,1
Biomasse-Kessel C4	0,0	0,00001
Fernwärmeabnahmestation A1-A3	114,9	344,6
Fernwärmeabnahmestation B4	118,9	356,7
Fernwärmeabnahmestation C3	4	12,1
Fernwärmeabnahmestation C4	0,0	0,00001

Elektrische Durchlauferhitzer A1-A3	12,8	38,3
Elektrische Durchlauferhitzer B4	8,7	26,2
Elektrische Durchlauferhitzer C3	4	12,1
Elektrische Durchlauferhitzer C4	0,0	0,00001
Elektroheizung A1-A3	5,4	16,2
Elektroheizung B4	5,6	16,9
Elektroheizung C3	0,2	0,6
Elektroheizung C4	0,0	0,00001
Fußbodenheizung A1-A3	7,5	22,4
Fußbodenheizung B4	9,9	29,8
Fußbodenheizung C3	2,5	7,5
Fußbodenheizung C4	0,0	0,00001
Gas-Speicher-Ofen A1-A3	81,3	243,8
Gas-Speicher-Ofen B4	77,2	231,7
Gas-Speicher-Ofen C3	4	12,1
Gas-Speicher-Ofen C4	0,0	0,00001
Wärmespeicher A1-A3	4,1	12,4
Wärmespeicher B4	8,2	24,6
Wärmespeicher C3	4	12,1
Wärmespeicher C4	0,0	0,00001
SW-Wärmepumpe Erdkollektor A1-A3	337,3	1.012
SW-Wärmepumpe Erdkollektor B4	341,4	1.024,1
SW-Wärmepumpe Erdkollektor C3	4	12,1
SW-Wärmepumpe Erdkollektor C4	0,0	0,00001
SW-Wärmepumpe Erdsonde A1-A3	337,3	1.012
SW-Wärmepumpe Erdsonde B4	341,4	1.024,1
SW-Wärmepumpe Erdsonde C3	4	12,1
SW-Wärmepumpe Erdsonde C4	0,0	0,00001
WW-Wärmepumpe A1-A3	418,5	1.255,4
WW-Wärmepumpe B4	422,5	1.267,5
WW-Wärmepumpe C3	4	12,1
WW-Wärmepumpe C4	0,0	0,00001
AW-Wärmepumpe A1-A3	504,7	1.514
AW-Wärmepumpe B4	508,7	1.526,1
AW-Wärmepumpe C3	4	12,1
AW-Wärmepumpe C4	0,0	0,00001
Öl-Tank 1A3	0,6	1,7
Öl-Tank B4	3,9	11,6
Öl-Tank C3	3,3	9,9
Öl-Tank C4	0,0	0,00001
Erdkollektoren A1-A3	7,5	22,6
Erdkollektoren B4	10	30,1

Erdkollektoren C3	2,5	7,5
Erdkollektoren C4	0,0	0,00001
Erdsonden A1-A3	16,5	49,4
Erdsonden B4	22	65,9
Erdsonden C3	5,5	16,5
Erdsonden C4	0,0	0,00001
Brunnensystem/Erdsonde A1-A3	97,9	293,6
Brunnensystem/Erdsonde B4	130,5	391,5
Brunnensystem/Erdsonde C3	32,6	97,8
Brunnensystem/Erdsonde C4	0,0	0,00001
Rohrleitungsdämmung A1-A3	255,5	766,6
Rohrleitungsdämmung B4	5,8	17,5
Rohrleitungsdämmung C3	175	525
Rohrleitungsdämmung C4	0,0	0,00001
Radiatoren A1-A3	5,4	16,2
Radiatoren B4	5,6	16,9
Radiatoren C3	0,2	0,6
Radiatoren C4	0,0	0,00001
Solarthermieanlage A1-A3	298	894
Solarthermieanlage B4	298	894
Solarthermieanlage C3	0,0	0,00001
Solarthermieanlage C4	0,0	0,00001
Rohrleitungen Raumheizung A1-A3	12,7	38
Rohrleitungen Raumheizung B4	17	51
Rohrleitungen Raumheizung C3	4,8	14,5
Rohrleitungen Raumheizung C4	0,0	0,00001
Rohrleitungen TWW A1-A3	14,1	42,4
Rohrleitungen TWW B4	18,1	54,4
Rohrleitungen TWW C3	4	12
Rohrleitungen TWW C4	0,0	0,00001

**Tabelle A.41.:** Betrachtete TGA-Komponenten des Heizungssystems - Lebensdauer nach Ökobaudat zur Berechnung der LCA und LCC (Quelle: [59])

<b>TGA Komponente</b>	<b>Lebensdauer [a]</b>
Gas-Kessel	20
Öl-Kessel	20
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe	20
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	20
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdkollektor(en)	20
Sole-Wasser-Wärmepumpe + Erdsonde(n)	20
Erdsonden Wasser-Wasser-Wärmepumpe	50
Erdkollektoren Sole-Wasser-Wärmepumpe	50
Erdsonden Sole-Wasser-Wärmepumpe	50
Elektroheizung	30
Biomasse-Kessel	20
Fernwärmeabnahmestationen	30
Durchlauferhitzer	15
Gas-Speicher Wassererhitzer	20
Solarthermie	20
Rohre Fußbodenheizung	30
Radiatoren	30
Öl-Tank	30
Rohre Heizungswasser	25
Rohre Trinkwarmwasser	25
Rohrleitungsdämmung	20
Warmwasserspeicher	20

**Tabelle A.42.:** Anzahl Wohngebäude pro Baualtersklasse - Stadt München

<b>Baualtersklasse</b>	<b>Anzahl Wohngebäude</b>
BAK1	7.053
BAK2	18.051
BAK3	14.882
BAK4	23.659
BAK5	12.576
BAK6	6.347
BAK7	13.556
BAK8	6.918
BAK9	7.295
BAK10	4.968
BAK11	0



## B. Anhang - Abbildungen

The screenshot shows a configuration window for urbi+ with the following sections:

- Step 1: Configuration Data Input and Output:** Includes text input fields for 'Path to City Gml Resource File', 'Path to Excel/CSV Output File', 'Please type in Name of Excel/CSV Output File', 'Path to CityGML Output File', and 'Please type in Name of CityGML Output File'. It also features 'select' buttons for 'City GML File', 'Excel/CSV Output Directory', and 'CityGML-file Output Directory'. On the right, there are two checkboxes: 'Export Excel-File' and 'Export CSV-File'.
- Step 2: Configuration Database Connection:** Includes text input fields for 'Please type in Database Driver', 'Please type in Database URL', 'Please type in Database User', and 'Please type in Database Password'.
- Step 3: Configuration XML Input/Output-Files:** Includes text input fields for 'Please select XML Output File Path', 'Please type in XML Output-File Name', and 'Please select XML Input File Path'. It also has 'select' buttons for 'XML Output-File Directory' and 'XML Input-File'. A checkbox labeled 'Use Input Information from XML-File:' is present.

A 'continue' button is located at the bottom center of the window.

Abbildung B.1.: Erstes Eingabefenster GUI von urbi+ (eigene Abbildung)

Die erste Eingabemaske (siehe Abbildung B.1) führt folgende Schritte an:

- **Schritt eins** führt Maßnahmen zur Auswahl des zu untersuchenden 3D-Stadtmodells an. Zudem müssen Zielordner und Name für die Ergebnisdateien (Excel, CSV und CityGML) bestimmt werden.
- **Schritt zwei** erlaubt das Eingeben der Datenbankverbindung zur LCA-Datenbank.
- In **Schritt drei** wird der Ausgangspfad für die Extensible Markup Language (XML)-Datei gewählt, die alle in der zweiten Eingabemaske getroffenen Angaben enthält.
- **Schritt vier** ermöglicht die Auswahl des Formats der Ergebnisdateien. Diese Möglichkeit wird nicht mehr wählbar und die zweite Eingabemaske übersprungen, sofern der Haken bei „Use Input Information from XML-file“ gesetzt wurde und die Input-Definitionen aus einer bereits bestehenden XML-Datei für die folgenden Berechnungen zur Verfügung gestellt werden.

Wird der Haken nicht gesetzt und wird in Schritt vier das Ausgabeformat der Ergebniswerte gewählt, dann springt urbi+ zur zweiten Eingabemaske (siehe Abbildung B.2).

Abbildung B.2.: Zweites Eingabefenster GUI von urbi+ (eigene Abbildung)

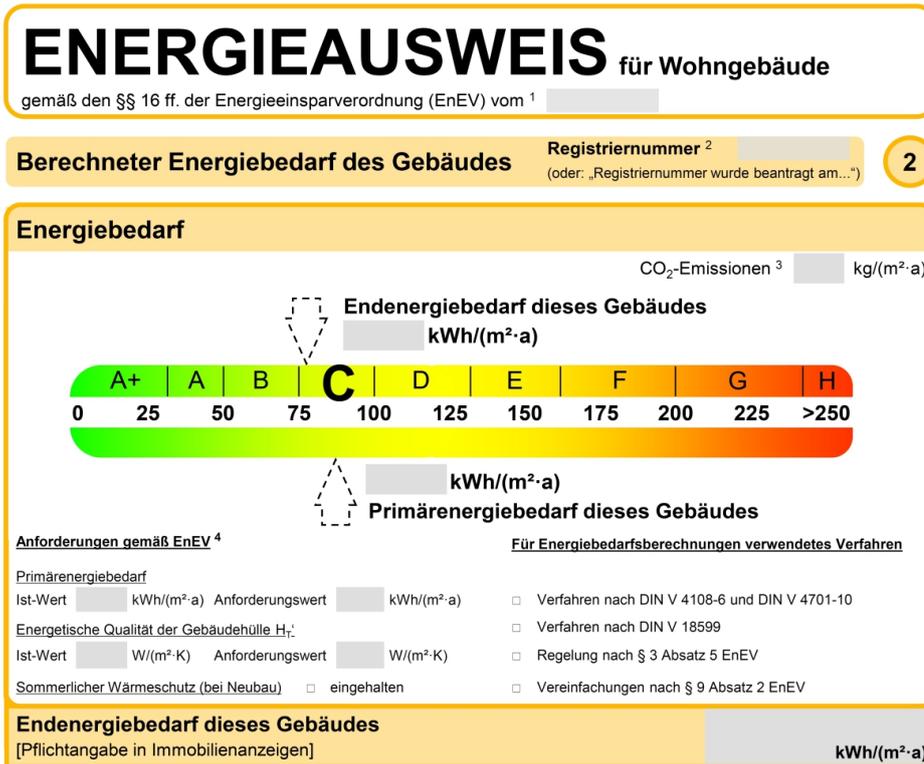
In der zweiten Eingabemaske werden alle weiteren Input-Informationen abgefragt:

- In **Schritt fünf** müssen das aktuelle Jahr (z. B. 2021) und ein Zeitraum an Jahren angegeben werden, wonach die Wohngebäude zur Untersuchung ausgewählt werden, deren Baujahre in diesen Zeitraum fallen (Baujahr zwischen 1920 und 2010). Es muss zusätzlich eingegeben werden, wie viel Prozent der Dachräume im betrachteten Stadtmodell beheizt sind. Das gilt für Gebäude ohne Flachdach. Zur Differenzierung der Dachformen wird ein spezifischer Wert, der für jedes Gebäude im 3D-Stadtmodell angegeben ist, herangezogen (siehe Tabelle A.8, Anhang A, Seite 252). Anhand eines zusätzlich spezifisch zu definierenden Wertes wird es ermöglicht, dass mithilfe der im 3D-Stadtmodell aufgeführten Nutzungsart der Gebäude, die gewünschten Wohngebäude identifiziert werden (siehe Tabelle A.7, Anhang A, Seite 251). Zudem wird die Postleitzahl angegeben, wonach sich die jährliche Durchschnittstemperatur und die geringste Temperatur eines Jahres für den spezifischen Standort für die Berechnung der Heizlast ergibt. Dabei muss die Postleitzahl einer deutschen Stadt oder eines Landkreises mit über 20.000 Einwohnern gewählt werden. Hierfür gibt es in der DIN EN 12831-1:2017-09 [231] bereits vordefinierte Werte, die analog in die LCA-Datenbank von urbi+ übernommen werden. Die Dauer des Entwicklungszeitraums wird in Jahren angegeben und umspannt den Zeitraum, in dem alle betrachteten Gebäude auf den zuvor festgelegten Standard saniert werden. Die Angabe der durchschnittlichen Lebensdauer der betrachteten Gebäude ist ebenfalls ein wichtiger Parameter, der bezüglich der Berechnung der Austauschzyklen von TGA-Komponenten sowie

der lebenszyklusbasierten Energiebedarfe und Emissionen während der Nutzungsphase einen großen Einfluss hat.

- In **Schritt sechs** werden die prozentualen Zusammenstellungen der Energiesysteme für die Warmwasser- und die Heizwärmebereitstellung eingetragen. Die Summe der Prozentwerte der Energiesysteme muss sowohl für die Warmwasser- als auch für die Heizwärmebereitstellung im Status quo und in den Szenarien 1 und 2 jeweils 100 % ergeben. Zusätzlich dazu muss neben jedem Wärmeerzeugertyp, der nicht in Prozent angegeben wird, die durchschnittliche Lebensdauer angegeben werden.
- In **Schritt sieben** wird für das Wärmeübergabesystem dieselbe Definition für das Wärmeübergabesystem für den Status quo sowie Szenario 1 und 2 vorgenommen.
- In **Schritt acht** wird die Lebensdauer zusätzlicher TGA-Komponenten erläutert, die im Rahmen der Berechnungen und Analysen untersucht werden.
- **Schritt neun** ermöglicht die Eingabe eines zusätzlichen Zuschlagfaktors, der zur Berücksichtigung nicht im Detail dimensionierter und untersuchter TGA-Komponenten vorgesehen ist (siehe Beschreibung Kapitel 3.2.1).
- Werden im kleinen Kasten von **Schritt zehn** jeweils Haken gesetzt, dann erlaubt das die eigenständige baualtersklassen- und komponentenspezifische Definition von U-Werten im großen Kasten von Schritt zehn. Falls die Haken nicht gesetzt werden, dann werden die in Kapitel 3.2 beschriebenen, bereits vorimplementierten U-Werte für die Berechnungen in allen Szenarien herangezogen.
- In **Schritt elf** werden die Primärenergiefaktoren der verwendeten Primärenergiequellen für jedes Szenario angeführt. Zusätzlich wird die Entwicklung des erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteils an der verwendeten Primärenergiequelle für alle Szenarien angegeben. Bei Gas können sich die erneuerbaren Anteile z. B. durch mehr Biogas im Gasnetz erhöhen.
- **Schritt zwölf** erfordert die Angabe von Ausgangskosten für das Jahr 2020, bezogen auf Energieträger. Für jeden berücksichtigten Energieträger müssen zusätzlich Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze eingegeben werden, um Abschätzungen zukünftiger Preise über den Entwicklungszeitraum bzw. die Lebensdauer des Gebäudes vornehmen zu können. Das Ganze muss ebenfalls für die Emissionskosten des GWP vorgenommen werden. Für die Preisentwicklung von Bauprodukten müssen ebenso die Preissteigerungen und Kalkulationszinssätze definiert werden. Die komponentenbezogenen Kosten ergeben sich aus der LCC. Der anzugebende ortsspezifische Faktor nimmt lokale Preisunterschiede z. B. zwischen ländlichen und städtischen Gebieten an. Der zuletzt zu definierende Faktor berücksichtigt überschlägig die Kosten nicht berücksichtigter TGA-Komponenten sowie zusätzliche Personalkosten, die vom Nutzer zusätzlich und optional ermittelt und eingegeben werden können.

Nach betätigen der Taste „Continue“ werden automatisch der Status quo sowie beide Entwicklungsszenarien für alle betrachteten Gebäude berechnet und die Ergebniswerte im gewählten Format und an die gewählte Stelle exportiert.



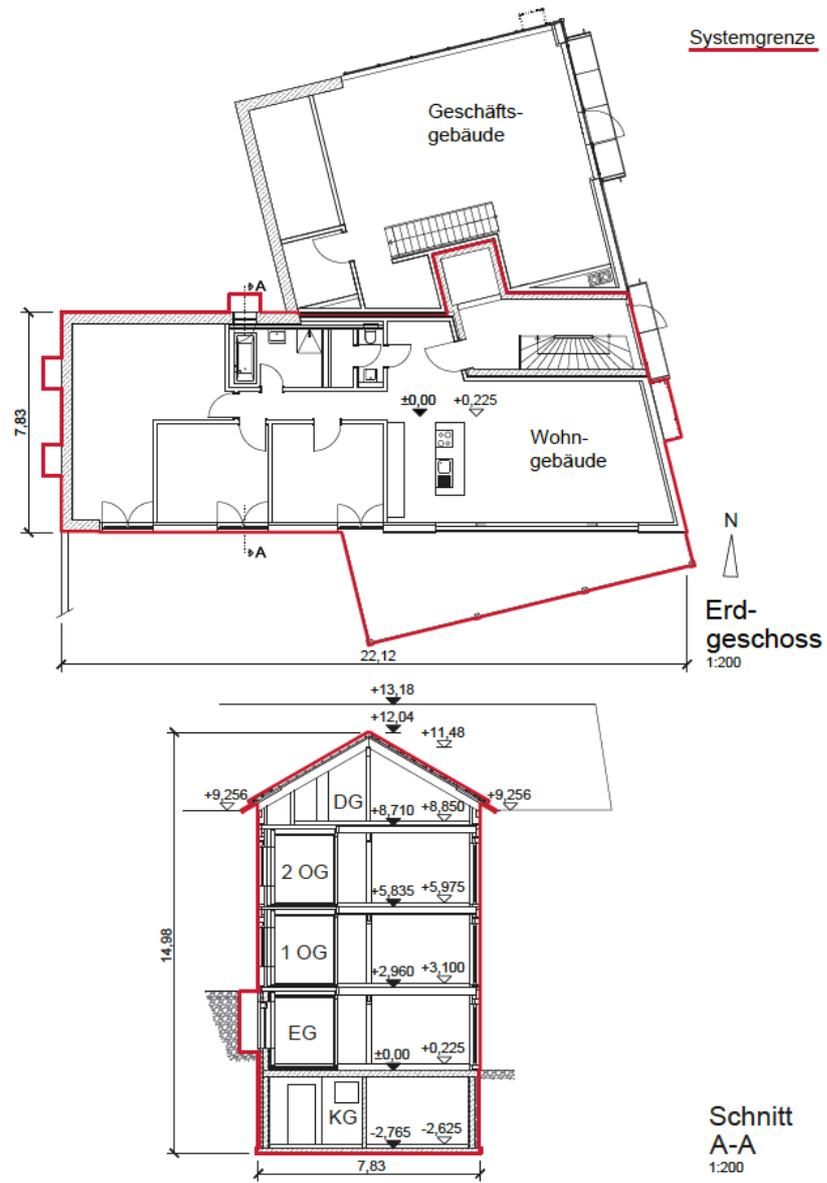


Abbildung B.5.: Mehrfamilienhaus nach Weißenberger (Fallbeispiel 3) (Quelle: [19])