

Multikriteriell optimierte Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung: Steuerung von Synergien und Trade-offs in frühen Planungsphasen

Roland Bernhard Reitberger

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
2. Prof. Dr. rer. nat. Herbert Palm
3. Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit

Die Dissertation wurde am 04.07.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 23.09.2024 angenommen.

Danksagung

Mit großer Freude und Verbundenheit bedanke ich mich anlässlich der Fertigstellung meiner Dissertation bei all jenen, die mich dem Weg dorthin begleitet und unterstützt haben. Diese Arbeit ist das Ergebnis der langjährigen Tätigkeit am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen an der Technische Universität München (TUM). Die am Lehrstuhl vorherrschende freie und überaus kollegiale Zusammenarbeit hat mir ermöglicht, mich stets in neue Themenfelder vorzuwagen und neuen Herausforderungen zu begegnen. Für dieses ausgezeichnete Arbeitsumfeld sowie für die zahlreichen Gespräche, Ratschläge und inhaltlichen Diskussionen möchte ich mich sehr herzlich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Werner Lang bedanken. Einen gleichermaßen produktiven wie kollegialen Lehrstuhl zu finden, war sicher ein großer Glücksfall für meine persönliche Entwicklung. In diesem Zuge gilt allen Kolleginnen und Kollegen ein großer Dank. Die inspirierenden Diskussionen und fachlichen Meinungs austausche haben meine Arbeit bereichert und stets zu neuen Perspektiven und Lösungsansätzen geführt. Darüber hinaus haben sich zahlreiche Freundschaften entwickelt, für die ich sehr dankbar bin.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Zweitbetreuer Prof. Dr. rer. nat. Herbert Palm bedanken, der von Beginn an großes Interesse an den Fragestellungen meiner Dissertation gezeigt hat. Seine fachliche Expertise und sein Engagement waren für den Erfolg der Arbeit von unschätzbarem Wert. Die Aufnahme in das Systems Engineering Labor und die Zusammenarbeit mit den Mitarbeitenden der Hochschule München haben meine wissenschaftliche Reise enorm bereichert. Herzlichen Dank für die wertvollen Diskussionen und die unterstützende Atmosphäre. Ein besonderer Dank gilt Nicolai Palm vom Münchner Zentrum für maschinelles Lernen für die hervorragende Zusammenarbeit und seine Unterstützung bei der Implementierung und Anpassung des Paref Algorithmus.

Danken möchte ich auch allen Beteiligten des Forschungsprojekts *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* sowie des Graduiertenkollegs *Research Training Group: Urban Green Infrastructure* für die stets spannenden Einblicke in andere Arbeitsfelder und die freundschaftliche Atmosphäre. Zudem danke ich dem Referat für Umwelt- und Klimaschutz der Landeshauptstadt München sowie dem Amt für Stadtplanung und Umwelt der Stadt Freising für die Teilnahme an den durchgeführten Interviews. Gleiches gilt für das Referat für Stadtplanung und Bauordnung der Landeshauptstadt München, welchem ich zudem für die unkomplizierte Bereitstellung der für die Ergebnisskalierung notwendigen Gebäude-daten danke.

Ein spezieller Dank gebührt Dipl.-Ing. Paul Oschatz für seine Unterstützung als Mentor und die Aufrechterhaltung des Kontakts zu meinem früheren Arbeitgeber, der Lindner AG. Zudem danke ich meiner Frau Kathrin von Herzen. Ihre andauernde Unterstützung und ihr Verständnis für die vielen Arbeitsstunden haben mir in den intensiven Phasen meiner Arbeit Halt gegeben. Gleiches gilt für unser beider Familien, ohne deren Rückhalt ein solches Vorhaben kaum umsetzbar gewesen wäre. Zuletzt möchte ich meinem Schwiegervater Robert Kriegl danken, der mich stets in der Bedeutung des nachhaltigen Bauens sowie der Aufnahme dieser Dissertation bestärkt hat, deren Abschluss aber leider nicht mehr erleben konnte.

Kurzfassung

Hintergrund und Ziel Mit dem Green Deal verdeutlicht die Europäische Union die Dringlichkeit von Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung. Dem weltweit für 38% an CO₂ Emissionen verantwortlichen Gebäudesektor kommt dabei eine Schlüsselrolle zu [1]. Bisherige Ansätze zur Quartiersentwicklung sind jedoch häufig auf einzelne Aspekte fokussiert, da die ganzheitliche Bewertung komplexer Quartiersysteme kaum umsetzbar scheint [2]. Es gilt daher Rahmenbedingungen zu identifizieren, die Klimaschutz und Klimaanpassung vereinen sowie einen positiven Beitrag zur Regeneration der Biokapazitäten unseres Planeten leisten. Diese Dissertation zeigt, wie Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und Außenraum untersucht werden können und welche Relevanz sie für damit verbundene Entscheidungsprozesse mit Blick auf resultierende Synergien und Trade-offs haben. Zudem werden Methoden entwickelt, um die gewonnenen Erkenntnisse der Planungspraxis zugänglich zu machen.

Methodischer Ansatz Zunächst erfolgt eine Analyse bestehender Definitionen zu den Begriffen Synergie und Trade-off in verschiedenen Themenfeldern. Die Übertragung auf den Bausektor liefert die Grundlage zur Ableitung entsprechender Bewertungskennzahlen und zur Konzeption eines generischen Prozesses für die multikriteriell optimierte Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung, der *Urban Systems Exploration*. Mittels parametrischer Gebäude- und Quartiersmodelle werden das synergetische Wirken von Maßnahmenkombinationen sowie multikriterielle Trade-offs hinsichtlich der lebenszyklusbasierten Treibhausgasemissionen, der Lebenszykluskosten und des thermischen Außenraumkomforts in Fallstudien untersucht. Die daraus entwickelten Quartiersteckbriefe dienen zur Integration der Erkenntnisse in Planungs- und Entscheidungsprozesse. Die Nutzbarkeit dieser Steckbriefe wird schließlich anhand von Expert:inneninterviews überprüft und verbessert.

Ergebnisse und Fazit Mit dem entwickelten Prozess der *Urban Systems Exploration* und der Bewertung von Synergieeffekten in der gebauten Umwelt wird ein Grundstein für die Integration von Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und Außenraum in Entscheidungsprozessen gelegt. Dabei zeigt sich, dass die Ermittlung des Pareto-optimalen Handlungsspielraums wesentlich zur ausgewogenen Quartiersplanung beiträgt. Dies unterstützt Planer:innen und Entscheider:innen bei der fundierten Abwägung von Zielkonflikten im Quartier, erfordert jedoch interdisziplinäre Herangehensweisen und ausgeprägtes Systemdenken aller Beteiligten. Die erstellten Quartiersteckbriefe bieten hierzu bereits in frühen Planungsphasen eine niedrigschwellige Diskussionsgrundlage.

Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen unter anderem, dass Außenraumbegrünungen in Kombination mit hohen Energiestandards und Photovoltaikflächen zur parallelen Verbesserung der lebenszyklusbasierten Treibhausgasemissionen, der Lebenszykluskosten und des Außenraumkomforts beitragen. Zudem sind diese Planungsvariablen gut geeignet, um Pareto-optimale Trade-offs gezielt zu steuern und dadurch Planungsentwürfe an den jeweiligen Quartierskontext anzupassen.

Zusammenfassend ist die Notwendigkeit einer systemischen Betrachtung des urbanen Raums für die nachhaltige Transformation des Bausektors feststellbar. Es wird daher empfohlen, bei Planungsprozessen eine multikriterielle Betrachtungsweise anzustreben und Entscheidungen basierend auf der vollständigen Exploration des Handlungsspielraums abzuwägen.

Abstract

Background and Goal With the Green Deal, the European Union highlights the urgency of climate change mitigation and adaptation. The building sector is responsible for 38% of CO₂ emissions worldwide and offers high potential for improvement [1]. However, previous approaches to neighborhood development often take a one-sided view, as a holistic assessment of the complex urban system seems hardly feasible [2]. Therefore, it is important to identify frameworks that combine climate change mitigation and adaptation while contributing positively to the regeneration of our planet's biocapacity. This dissertation shows how interactions between buildings and outdoor space can be investigated and what relevance they have for decision-making in neighborhood development with regard to resulting synergies and trade-offs. Additionally, this work explores how to make this knowledge accessible to professionals.

Methodology First, existing usages of the terms synergy and trade-off in various disciplines are analyzed. These interpretations are then transferred to the building sector and allow to derive corresponding evaluation indicators and establish a generic process for optimized multi-objective decision support in neighborhood development, called here the *Urban Systems Exploration*. Parametric building and neighborhood models allow to investigate the synergetic effect of measure combinations as well as multi-objective trade-offs with regard to lifecycle-based greenhouse gas emissions, lifecycle costs, and outdoor thermal comfort. Based on the results, neighborhood fact sheets are developed. These allow for the integration of the findings into planning and decision-making processes. Finally, expert interviews are conducted to ensure the usability of these fact sheets and to improve their visualization.

Results and Conclusion The proposed *Urban Systems Exploration* process and the evaluation of synergistic effects within the built environment establish a foundation for integrating interactions between buildings and outdoor spaces into decision-making processes. Several case study applications show that exploring the Pareto-optimal scope for action significantly contributes to balanced neighborhood planning. This supports planners and decision-makers in identifying well-founded framework conditions for urban neighborhoods. However, *Urban Systems Exploration* requires an interdisciplinary approach and pronounced systems thinking of all stakeholders. The neighborhood fact sheets offer a low-threshold basis for discussing prevailing interactions in the early planning phases.

The case studies demonstrate that outdoor greening, in combination with high building energy standards and photovoltaic surfaces, contributes to the parallel improvement of lifecycle-based greenhouse gas emissions, lifecycle costs, and outdoor thermal comfort. In addition, these planning variables are well suited to specifically control Pareto-optimal trade-offs and thus adapt designs to the respective neighborhood context.

In summary, the need for a systemic view of urban space for the sustainable transformation of the building sector is evident. Therefore, it is recommended to adopt a multi-objective approach in planning processes and to base decisions on a complete exploration of the scope for action.

Abkürzungsverzeichnis

BAK	Baualtersklasse
BGF	Bruttogrundfläche
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSV	Comma-separated values
DS	Design Space
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FFD	Fast Fluid Dynamics
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GPR	Gauß-Prozess Regression
IDF	Input data file
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
KDE	Kernel Density Estimate
KK	(Pearson) Korrelationskoeffizient
KPI	Key Performance Indicator
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
MOO	Multi-Objective Optimization
MRT	Mean Radiant Temperature
NGF	Nettogeschossfläche
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
PDF	Portable Document Format
PF	Pareto Front
PH	Passivhaus
PMV	Predicted Mean Vote

PV	Photovoltaik
RMSE	Root Mean Squared Error
SDG	Sustainable Development Goal
SETS	Social-Ecological-Technological Systems
S_{uni}	Unikriterielle Synergie
S_{multi}	Multikriterielle Synergie
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgas
TS	Target Space
TUM	Technische Universität München
UC	Use Case
UHI	Urban Heat Island
UTCI	Universal Thermal Climate Index
UWG	Urban Weather Generator
WWR	Window to Wall Ratio

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einführung und Fragestellung	1
1.1 Hintergrund der Arbeit und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit, Forschungsfragen und Hypothesen	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
1.4 Kurzfassung des Kapitels	6
2 Forschungsansatz und Begriffsdefinition	7
2.1 Stand der Forschung und Technik	7
2.1.1 Lebenszyklusbasierter Ansatz und Wechselwirkungen	7
2.1.2 Wechselwirkungen im System der gebauten Umwelt	9
2.1.3 Quantifizierung und Optimierung urbaner Wechselwirkungen	13
2.1.4 Multikriteriell optimierte Entscheidungsunterstützung in der Quartiersplanung	14
2.1.5 Entwicklung multikriterieller Entscheidungsprozesse	16
2.2 Die Begriffe Synergie und Trade-off im Bauwesen	17
2.2.1 Verwendung der Begriffe Synergie und Trade-off	17
2.2.2 Bestehende Untersuchungsmethoden für Wechselwirkungen	20
2.2.3 Begriffsdefinitionen im Rahmen dieser Arbeit	22
2.3 Kurzfassung des Kapitels	24
3 Methodischer Ansatz	25
3.1 Quantifizierung von Synergie im Bauwesen	25
3.1.1 Unikriterielle Quantifizierung von Synergie	25
3.1.2 Multikriterielle Quantifizierung von Synergie	27
3.2 Prozess zur multikriteriell optimierten Quartiersentwicklung	29
3.3 Kurzfassung des Kapitels	34
4 Anwendung in Fallstudien	35
4.1 Bewertungskriterien und allgemeine Randbedingungen	35
4.2 Bewertung von Synergien auf Gebäudeebene	37
4.2.1 Betrachtete Szenarien und Datengrundlagen	37
4.2.2 Lebenszyklusanalyse von Gebäudeaufstockungen	42
4.2.3 Simulationsmodell und Validierung auf Gebäudeebene	43
4.2.4 Ergebnisse unikriterielle Synergie auf Gebäudeebene	46
4.2.5 Ergebnisse multikriterielle Synergie auf Gebäudeebene	48

4.3	Bewertung von Synergien auf Quartiersebene	53
4.3.1	Betrachtete Szenarien und Datengrundlage	53
4.3.2	Simulationsmodell und Validierung auf Quartiersebene	58
4.3.3	Ergebnisse unikriterielle Synergie auf Quartiersebene	64
4.3.4	Ergebnisse multikriterielle Synergie auf Quartiersebene	66
4.4	Multikriterielle Optimierung von Trade-offs auf Quartiersebene	70
4.4.1	Werkzeugkette zur Umsetzung des Optimierungsprozesses	71
4.4.2	Ersatzmodelle zur Entscheidungsunterstützung	75
4.4.3	Ergebnisse der multikriteriellen Quartiersoptimierung	77
4.5	Kurzfassung des Kapitels	86
5	Übertragung in die Planungspraxis	87
5.1	Stakeholder:innen und deren Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung	87
5.1.1	Aufbau und Auswertungsmethode der Expert:inneninterviews	87
5.1.2	Umgang mit Trade-offs in der Planungspraxis	88
5.1.3	Einsatzgebiet des Quartiersteckbriefs	91
5.1.4	Darstellung multikriterieller Entscheidungsräume für die Praxis	92
5.1.5	Nutzungsform des Steckbriefs und Entwicklungspotentiale	96
5.2	Verwendung des Quartiersteckbriefs	97
5.3	Auswahl der Quartierstypologien	99
5.4	Kurzfassung des Kapitels	100
6	Diskussion der Ergebnisse	101
6.1	Nutzbarkeit synergetischer Effekte im Bauwesen	101
6.2	Steuerung von Trade-offs durch die multikriteriell optimierte Quartiersentwicklung	103
6.3	Übertragung multikriterieller Trade-offs in die Planungspraxis	105
6.4	Einschränkungen und Skalierbarkeit	106
6.5	Beantwortung der Forschungsfragen	109
6.6	Kurzfassung des Kapitels	110
7	Fazit und Ausblick	111
7.1	Fazit der Arbeit	111
7.2	Prüfung der Hypothesen	114
7.3	Ausblick	115
7.4	Kurzfassung des Kapitels	117
	Literaturverzeichnis	119
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	141
	Formelverzeichnis	143
	Glossar	145

Anhang	149
A Anhang - Tabellen	149
B Anhang - Abbildungen	154
C Anhang - Simulationsmodell	157
D Anhang - Quartiersteckbriefe	158
E Anhang - Datentabellen zu den Quartiersteckbriefen	177

1 Einführung und Fragestellung

Das nachhaltige Handeln unserer Gesellschaft ist von entscheidender Bedeutung, um eine stabile Lebensgrundlage auf unserem Planeten zu gewährleisten. Unsere gegenwärtigen Entscheidungen müssen so ausgerichtet sein, dass auch zukünftige Generationen die Möglichkeit haben, ihr Leben nach ihren eigenen Vorstellungen zu gestalten [3]. Aktuell verbraucht die Menschheit das 1,7-Fache der verfügbaren Erdressourcen [4], was die dringende Notwendigkeit nachhaltiger Praktiken verdeutlicht. Deren Umsetzung wird durch die zunehmende Komplexität der globalen Herausforderungen erschwert und erfordert integrierte Lösungsansätze, welche über die Betrachtung einzelner Aspekte hinausgehen. Insbesondere Städte stehen vor der Problematik, eine Vielzahl von Zielen gleichzeitig zu verfolgen. Diese Dissertation untersucht, wie ein ganzheitlicher Optimierungsansatz im städtischen Kontext eingeführt und umgesetzt werden kann und wie dies die nachhaltige Entwicklung von Städten unterstützt.

Im Folgenden ordnet Kapitel 1.1 zunächst die Relevanz dieser Dissertation in den gesellschaftlichen und thematischen Kontext von Nachhaltigkeit im Bauwesen ein. Die daraus abgeleiteten Herausforderungen überführt Kapitel 1.2 anschließend in die Forschungsfragen und Forschungshypothesen. Kapitel 1.3 gibt schließlich einen Überblick zum Aufbau der weiteren Ausarbeitung.

1.1 Hintergrund der Arbeit und Problemstellung

Die zunehmend spürbaren Folgen des Klimawandels erfordern ein radikales Umdenken unserer Gesellschaft. Das Scheitern bei Klimaschutz und Klimaanpassung wird im jährlich erscheinenden Bericht des Weltwirtschaftsforums als größtes langfristiges Risiko für Mensch, Natur und Wirtschaft genannt [5]. Der Gebäudesektor spielt dabei für beide Aspekte eine maßgebliche Rolle. Auf globaler Ebene sind 38 % der Treibhausgas (THG)-Emissionen auf diesen Bereich zurückzuführen [1]. Auch in Deutschland verursacht der Gebäudesektor mit 40 % den größten Anteil an THG-Emissionen aller Wirtschaftssektoren [6]. Damit zählen der Bau, der Betrieb und die Entsorgung von Gebäuden zu den größten THG-Emittenten. Gebäude repräsentieren dementsprechend einen entscheidenden Stellhebel beim Thema Klimaschutz. Neben der Begrenzung der Erderwärmung auf die Ziele des Pariser Klimaabkommens ist allerdings auch eine Anpassung an die bereits heute spürbaren Auswirkungen unumgänglich. Insbesondere Städte stehen hierbei vor großen Herausforderungen, da dort eine hohe Flächenkonkurrenz zwischen Maßnahmen zur Klimaanpassung und dem steigenden Bedarf an Wohnraum herrscht. Für die weltweite Urbanisierung wird eine Steigerung von derzeit 55,3 % im Jahr 2018 auf 68 % im Jahr 2050 prognostiziert. In den Industrieländern soll diese im gleichen Zeitraum von 78,7 % auf 86,6 % ansteigen [7]. Der aktuell vorherrschende Flächendruck wird dadurch weiter verstärkt, wodurch für Klimaanpassungsmaßnahmen verfügbare Flächen zurückgehen. Städte sind demnach ein wesentlicher Verursacher von THG-Emissionen und gleichzeitig vom dadurch beschleunigten Klimawandel besonders stark betroffen [8].

Aus diesem Grund ist insbesondere in Städten die integrierte Umsetzung von Klimaschutz und Klimaanpassung von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der nachhaltigen Transformation unserer

Gesellschaft. Es gilt Wege zu identifizieren, die generationengerechtes menschliches Dasein innerhalb der planetaren Grenzen ermöglichen [9]. Bisherige Ansätze in Forschung und Praxis fokussieren sich häufig nur auf einzelne Aspekte und führen dadurch lediglich zu einer Problemverschiebung [10, 11]. Beispielsweise erreichen Einzelmaßnahmen bei der Sanierung großer Gebäudebestände nur unzureichende Einsparungen, um dem Ziel der Klimaneutralität gerecht zu werden. Vielmehr sind integrale und über den Lebenszyklus von Gebäuden hinweg aufeinander abgestimmte Lösungen notwendig. Dazu müssen neben der Gebäudesanierung unter anderem die Gewinnung erneuerbarer Energien sowie die Verbesserung der Gebäudetechnik miteinander kombiniert werden [12]. Solche technologiegetriebenen Strategien sind jedoch auch vom sozialen und ökologischen Umfeld abhängig [13], was die Berücksichtigung weiterer Aspekte erfordert. Dabei bedingen sich Klimaschutz und Klimaanpassung gegenseitig [10]. Dies führt zu einem komplexen Gefüge von Wechselwirkungen, in welchem der Zusammenhang von Ursache und Wirkung nicht mehr unmittelbar erkennbar ist.

Menschliche Bedürfnisse sind der Hauptgrund, weshalb komplexe städtische Systeme existieren und weiterentwickelt werden [14]. Als Basis zum Verständnis und zur Optimierung nutzt die Wissenschaft eine Abbildung der Realität durch Modelle. Die damit verbundene Vereinfachung von Sachverhalten führt allerdings zur nur eingeschränkten Darstellbarkeit übergreifender Zusammenhänge. Bernard C. Patten beschreibt dies in seiner Abhandlung zur Netzwerktheorie im Zusammenhang mit Ökosystemen wie folgt [15]:

„The consequences point to a mind boggling, difficult quest with many unfathomable elements, so why, one might ask, should science go that way? The answer is immediate - because that is the way the world is. It is not diced up into isolated fragments faintly linked by a few single factor causes, as we in science have described it, or tried to. It is robustly interconnected, and therefore irreducible if its true properties are ever to be discerned.“

Obwohl die systemische Betrachtung seither einen Aufschwung in der Wissenschaft erlebt hat, besteht nach wie vor ein großer Bedarf bei der Berücksichtigung des Systemdenkens in der Untersuchung aktueller Problemstellungen. Synergien und Kompromisse (sogenannte Trade-offs) zu finden und gezielt zu steuern ist eine Herausforderung für die Entscheidungsfindung in komplexen Systemen [2]. Insbesondere im Gebäudesektor fehlen dabei einfache Methoden, um frühzeitig Klimaschutz- und Klimaanpassungsstrategien sowie deren Wechselwirkungen zu integrieren [16].

1.2 Zielsetzung der Arbeit, Forschungsfragen und Hypothesen

Die vorliegende Dissertation leistet einen Beitrag zur Nutzung der Wechselwirkungen im Gebäudesektor bei dessen dringend notwendiger, nachhaltiger Transformation. Diese Wechselwirkungen können sowohl zu positiven, sich gegenseitig verstärkenden Effekten (Synergien) als auch zu widersprüchlichen Effekten bzw. Kompromissen (Trade-offs) führen. Das oberste Ziel dieser Dissertation ist es, die komplexen Wirkzusammenhänge und Optimierungspotentiale der gebauten Umwelt zu identifizieren, zu quantifizieren, zu bewerten und schließlich für praktische Anwender:innen steuerbar zu machen.

Dazu werden folgende Forschungsfragen untersucht:

- Wie können die **Begriffe Synergie und Trade-off** für die gebaute Umwelt definiert werden?
- Wie kann Synergie zwischen baulichen und grünen Maßnahmen an Gebäudebeständen im Hinblick auf ein oder mehrere Kriterien **quantifiziert** werden?
- Wie können **Handlungsspielräume** für multikriterielle Trade-offs auf Quartiersebene identifiziert und in frühen Planungsphasen gezielt **angesteuert** werden?

Basierend auf den Forschungsfragen und dem Ziel der Dissertation werden folgende Hypothesen aufgestellt:

- Es können Maßnahmenkombinationen identifiziert werden, die in ihrem Zusammenwirken einen größeren positiven Effekt auf die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen haben, als die Summe ihrer Einzelmaßnahmen.
- Der bestmögliche Handlungsspielraum in multikriteriellen Problemstellungen kann durch den Einsatz urbaner Simulationsmodelle und multikriterieller Optimierungsverfahren ermittelt werden.
- Die Untersuchung von Synergien und Trade-offs ermöglicht die Ableitung von praxistauglicher Entscheidungsunterstützung zur kontextspezifischen Abwägung von THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort in frühen Planungsphasen.

Die **Kernfrage dieser Dissertation** lautet entsprechend:

Wie können Wechselwirkungen von Maßnahmen an Gebäudebestand und Außenraum quantitativ erfasst und auf dieser Basis hinsichtlich mehrerer Nachhaltigkeitsdimensionen optimiert werden, um sie zur gezielten Entscheidungsunterstützung in Planungsprozessen zu nutzen?

Als **Produkt dieser Dissertation** entstehen ein Prozess und eine Werkzeugkette zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung im stadtplanerischen Systemkontext. Mithilfe dieser Entwicklung werden Quartiersteckbriefe generiert, welche die erarbeiteten wissenschaftlichen Methoden und Erkenntnisse in kompakte und praxisnahe Handlungsempfehlungen transferieren. Diese sollen Architekt:innen, Stadtplaner:innen und Planungsämtern eine Hilfestellung in Wettbewerbs- und Bauleitplanverfahren geben. Mithilfe der Quartiersteckbriefe können Wechselwirkungen in der gebauten Umwelt eingeschätzt und in Planungsprozessen frühzeitig berücksichtigt werden. Dies soll den Weg für eine objektive und ganzheitliche Transformation des Bausektors ebnen, die neben der Klimaneutralität auch weitere Aspekte der Nachhaltigkeit umfassend berücksichtigt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1.1 fasst den Aufbau dieser Arbeit zusammen und stellt den Bezug der einzelnen Kapitel zu den Forschungsfragen her. Dabei wird zunächst in die Grundlagen urbaner Systeme eingeführt, wobei sowohl bisherige Ansätze zur urbanen Simulation, als auch im Zusammenhang damit verwendete Optimierungsverfahren beleuchtet werden. Die anschließende Definitionen der Begriffe Synergie und Trade-off dienen als Grundlage für die Entwicklung quantitativer Bewertungsmethoden (sh. Kapitel 2). Diese Methoden werden in Kapitel 3 dargelegt. Dabei stellen die Bewertung von Synergie und der Einbezug von Trade-offs zwei sich ergänzende Teile der Arbeit dar. Die Anwendung der entwickelten Methoden erfolgt im Rahmen mehrerer Fallstudien in Kapitel 4. Der Umgang mit Trade-offs in der Praxis wird anschließend in Kapitel 5 thematisiert. Es werden iterativ Quartiersteckbriefe entwickelt und deren Praxistauglichkeit mittels Expert:inneninterviews gesichert. Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgt im Rahmen der Ergebnisdiskussion (sh. Kapitel 6). In Kapitel 7 werden schließlich die aufgestellten Hypothesen überprüft und ein Fazit zur Verwendung der entwickelten Bewertungs- und Untersuchungsmethoden gezogen, bevor die Arbeit mit einem Ausblick zu künftigen Forschungsthemen und Entwicklungen schließt.

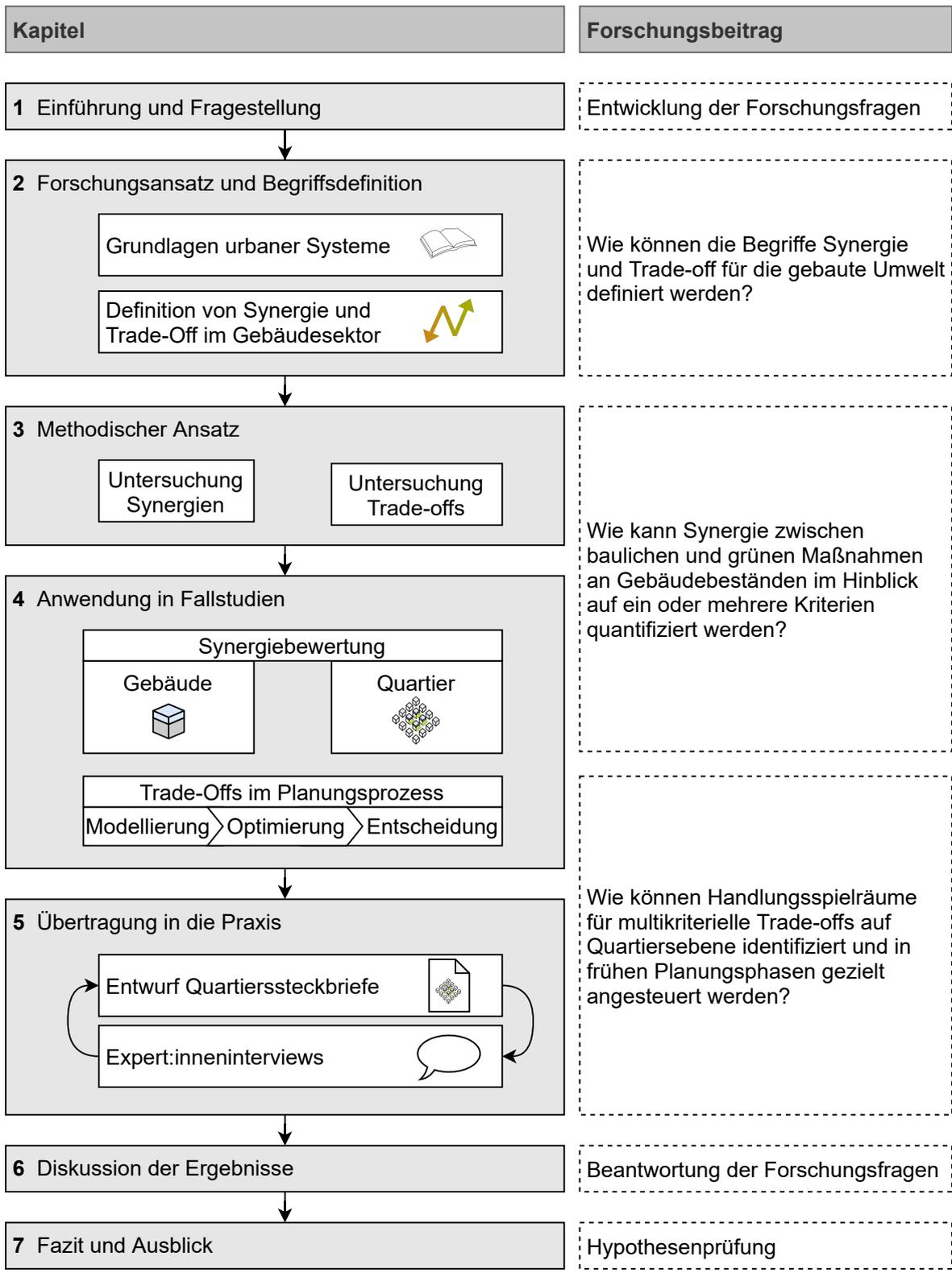


Abbildung 1.1 Aufbau dieser Dissertation und Beitrag der Kapitel zum Forschungsziel.

1.4 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus dem Kapitel Einführung und Fragestellung:

- Städte stehen angesichts des Klimawandels und des zunehmenden Flächendrucks vor der Notwendigkeit, Lösungen zu finden und umzusetzen, die Klimaschutz und Klimaanpassung parallel adressieren.
- Der Fokus der Dissertation liegt auf dem Umgang mit dieser Herausforderung im Kontext bestehender Quartiere.
- Die dabei vorherrschenden Wechselwirkungen führen dazu, dass die Wirkung von Maßnahmen keinem linearen Muster folgt, sondern auf komplexen Interaktionen beruht.
- Als Basis von Verständnis und multikriterieller Optimierung müssen solche komplexen Wirkzusammenhänge erfasst und quantifiziert werden, um Planer:innen und Entscheider:innen ein Verständnis und entsprechende Steuerungsmöglichkeiten zugänglich zu machen.
- Die vorliegende Dissertation setzt sich mit der Frage auseinander, wie die Begriffe Synergie und Trade-off für den Bausektor definiert und im urbanen Umfeld quantifiziert werden können. Zudem wird ein Prozess entwickelt, der eine multikriteriell optimierte Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung ermöglicht und dadurch optimale Handlungsspielräume aufzeigt.
- Abschließend wird dargelegt, wie die Komplexität urbaner Systeme für Stadtplaner:innen und Entscheidungsträger:innen in frühen Planungsphasen visualisiert werden kann.

2 Forschungsansatz und Begriffsdefinition

Kapitel 2.1 legt zunächst den Stand der Forschung und Technik für die zur Erreichung der Forschungsziele relevanten Teilbereiche dar. Dazu zählen unter anderem lebenszyklusbasierte Ansätze, urbane Simulationsmodelle sowie deren multikriterielle Optimierung und die Ableitung von Entscheidungsunterstützung für Planungsprozesse. Anschließend widmet sich Kapitel 2.2 den bisherigen Verwendungen der Begriffe Synergie und Trade-off mit Bezug zum Bauwesen. Dieser Teil der Arbeit mündet schließlich in deren Definition in Kapitel 2.2.3.

2.1 Stand der Forschung und Technik

Über den Lebenszyklus von Gebäuden bestehen zahlreiche Wechselwirkungen zwischen technologischen, ökologischen und sozialen Maßnahmen. Da diese Dissertation den Fokus auf die Bestandstransformation und damit die Untersuchung von Eingriffen in bestehende Baustrukturen legt, wird zunächst in Kapitel 2.1.1 der wissenschaftliche Konsens zur Anwendung lebenszyklusbasierter Analysen in diesem Bereich aufgezeigt. Als weiteres relevantes Themenfeld werden Arbeiten zur Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und dem Außenraum in Kapitel 2.1.2 strukturiert zusammengefasst. Die Erfassung von Komplexität sowie die Optimierung in urbanen Simulationsmodellen bilden die Grundlage zur Weiterentwicklung eines bestehenden Optimierungsverfahrens für die Anwendung in stadtplanerischen Fragestellungen (sh. Kapitel 2.1.3 bzw. 2.1.4). Schließlich wird in Kapitel 2.1.5 mit der Hyper Space Exploration der methodische Rahmen zur Entwicklung eines generischen Prozesses zur Ableitung multikriteriell optimierter Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung eingeführt.

2.1.1 Lebenszyklusbasierter Ansatz und Wechselwirkungen

Im Bauwesen stellt die ökologische Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz oder Life Cycle Assessment (LCA) genannt, neben der ökologischen Bewertung von Neubauten eine häufig verwendete Methode dar, um die Umweltwirkung von Eingriffen in den Gebäudebestand möglichst ganzheitlich zu erfassen [17]. Dazu werden die Herstellung, der Betrieb sowie der Rückbau und die Entsorgung (End-of-Life) der bewerteten Gebäude mithilfe entsprechender Baustoffdatensätze analysiert. Das in den Normen DIN EN ISO 14040:2009-11 bzw. DIN EN ISO 14044:2006-10 beschriebene Rahmenwerk wird mit DIN EN 15978:2012-10 um die Anwendung im Gebäudesektor erweitert [18–20]. Darin werden standardisierte Vorgehensweisen zur Festlegung des Untersuchungsrahmens, zur Ermittlung der relevanten Materialmassen und Energieströme (Sachbilanz) sowie zur Übertragung auf Wirkungsindikatoren (Wirkungsabschätzung) aufgeführt. Eine in Deutschland weit verbreitete Datenbank für LCA Datensätze im Baubereich ist die ÖkobaDat [21]. Darin finden sich Angaben zur Berechnung der Umweltwirkungen von Baumaterialien, -komponenten und -prozessen über die genannten Lebenszyklusphasen hinweg. Die Ökobilanz stellt zudem ein probates Mittel für die Effizienzprüfung von Maßnahmen auf Quartiersebene dar und ermöglicht die Erhöhung der Wirksamkeit von Nachhaltigkeitskonzepten [22]. Dabei ist die Methode der Ökobilanzierung vor allem für den Neubau standardisiert. Die Bewertung von

Eingriffen in den Bestand ist dagegen nur begrenzt festgelegt [23, 24]. Zudem stellt die Lebenszyklusanalyse größerer urbaner Strukturen (Quartiere, Stadtteile, Städte) eine noch wenig gängige Praxis dar [25]. Eine umfassende Standardisierung steht hierzu ebenfalls noch aus.

Die in der Vergangenheit überwiegend verfolgte Optimierung des Gebäudeenergiebedarfs und damit verbundener THG-Emissionen der Betriebsphase führte dazu, dass deren Einfluss auf den Gesamtfußabdruck von Bauwerken zurückging. Durch diese Entwicklung haben die mit der Herstellung und dem End-of-Life von Dämmmaterialien sowie Baukonstruktion einhergehenden grauen THG-Emissionen an Bedeutung gewonnen, was deren Untersuchung insbesondere bei hochgedämmten Gebäuden zwingend erforderlich macht [26–29]. Verbesserungen der Energieeffizienz durch zusätzliche Dämmschichten ziehen in der Regel eine Erhöhung der grauen THG-Emissionen nach sich, was das Einsparpotential aus einer lebenszyklusorientierten Perspektive verringert [30, 31]. Die Optimierung beider Seiten (graue und betriebliche THG-Emissionen) erfordert daher eine integrative Betrachtung von Maßnahmen und Wirkungen am Gebäude [32].

Einige Forschungsarbeiten diskutieren Wechselwirkungen über den Lebenszyklus von Gebäuden hinsichtlich mehrerer Zielaspekte. Allacker et al. zeigen beispielsweise anhand von Parameterstudien an europäischen Typgebäuden auf, dass der Einfluss von einzelnen Sanierungsmaßnahmen bei der Anwendung einer lebenszyklusbasierten Bewertungsmethode vergleichsweise gering ausfällt [12]. Sie schlussfolgern, dass die Anwendung integraler Maßnahmen notwendig ist, um einen nennenswerten Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudebestandes zu erreichen. Die Autor:innen vergleichen dazu die Kombination von Nachtabenkung, Solarthermie und erhöhtem Dämmstandard mit der jeweiligen Anwendung als Einzelmaßnahme. Matic et al. kommen bei der Untersuchung von Wohngebäudesanierungen zu dem Schluss, dass weder die Anwendung aktueller Technologien, noch die Fokussierung auf passive Maßnahmen zum Erreichen von Nullenergiehäusern führt [33]. Vielmehr halten sie eine Kombination der verfügbaren Möglichkeiten für notwendig, um durch deren kollektives Wirken das Ziel von Nullenergiehäusern im Bestand zu erreichen. Die Kombination von Energie- und Behaglichkeitsmaßnahmen mit ohnehin geplanten Instandsetzungen wurde von Gohardani et al. untersucht [34]. Dabei legen die Autor:innen unter anderem den Ausbau von Wissen zu kombinierbaren Maßnahmen sowie deren Wechselwirkungen als erforderlich dar. Galimshina et al. untersuchen die optimale Reihenfolge von Renovierungsmaßnahmen und stellen fest, dass mit der chronologischen Anwendung von Renovierungsmaßnahmen am Gebäude (Wärmeversorgung, Außenwand, Fenster) die Auswirkungen von externen Parametern wie der bestehenden Baustruktur auf die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse ansteigen [35]. Den Einfluss der zeitlichen Komponente konnten Harter et al. auch auf der Ebene von Quartieren zeigen [36]. Die Autor:innen legen dar, dass mit Blick auf die THG-Emissionen im Lebenszyklus die Sanierung dem Abriss und Ersatzneubau vorzuziehen ist und zudem die Reihenfolge der Maßnahmen das Ausmaß der positiven Effekte beeinflusst. Ähnliche Ergebnisse erzielen Zimmermann et al. bei der Bewertung von Sanierung, Erhalt und Abriss mit Neubau [23]. Auch in dieser Studie schneidet der Bestandserhalt unter ökologischen Gesichtspunkten am besten ab.

2.1.2 Wechselwirkungen im System der gebauten Umwelt

Besonders das nachhaltige Bauen spielt sich innerhalb eines Systemgefüges ab, das in seiner Komplexität bislang nur unzureichend erfassbar ist. Die Untersuchung der dort vorherrschenden Wechselwirkungen wird in der Forschung allerdings zunehmend gefordert [2, 37]. Komplexe Probleme erfordern dabei nicht zwangsläufig komplexe Lösungsansätze. Das Verständnis der zugrundeliegenden Vorgänge und Zusammenhänge kann Lösungen ermöglichen, die nur durch den Einbezug des großen Ganzen erkennbar werden [38]. Bestehende Ansätze und Zertifizierungssysteme für nachhaltiges Bauen betrachten allerdings meist keine Kausalzusammenhänge von Indikatoren, was zu einer verzerrten Bewertung führen kann [2, 39]. Dabei treten Wechselwirkungen bereits auf der Gebäudeebene und in zunehmendem Maß auch auf größeren Betrachtungsskalen wie dem Quartier auf.

Eine Untersuchung zur Interaktion von Sanierungsmaßnahmen aus energetischer Sicht führen beispielsweise Chidiac et al. für Bürogebäude durch [40]. Dabei stellen sie fest, dass die Kombination von Sanierungsmaßnahmen meist nicht zur linearen Addition von Einsparungen führt sondern eine gesonderte Betrachtung des kombinierten Zustandes notwendig ist. Sie identifizieren Maßnahmenbündel mit einem gesteigerten Wert durch Kombination, wie etwa die Verbesserung der thermischen Hülle parallel zur Anwendung eines Sanierungspakets für die Gebäudetechnik. Im überwiegenden Teil der Fälle verringern sich jedoch die kombinierten Effekte im Vergleich zur linearen Addition. Zudem führen die Autor:innen an, dass Wechselwirkungen zwischen mehreren Sanierungsmaßnahmen oft nur unzureichend betrachtet werden. Andere Untersuchungen bestätigen den interaktiven Charakter von Gebäudesanierungen und deren positiven Einfluss auf weitere Aspekte, wie beispielsweise den Nutzer:innenkomfort [41, 42].

Zudem weisen zahlreiche Untersuchungen nach, dass die Erhöhung der Kompaktheit von Gebäuden bzw. Quartieren deren Heizwärmebedarf positiv beeinflusst [43, 44]. Leskovar et al. zeigen beispielhaft, dass durch modulare Aufstockungen eine Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden erzielbar ist [45]. Sie belegen zudem, dass sich durch die Kombination von Sanierung und Aufstockung zusätzliche Einsparungen erzielen lassen. Eine Betrachtung hinsichtlich des Lebenszyklus findet dabei allerdings nicht statt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Eingriffen an Gebäuden sowie den damit einhergehenden THG-Emissionen ein integratives Zusammenwirken von Maßnahmen und dadurch ein nicht linearer Charakter vorliegen [46–49]. Lumpkin et al. beschreiben Gebäude daher auch als „*offene, komplexe sozial-technische Systeme*“ [49].

Die Komplexität steigt durch den Einbezug von auf Quartiersebene auftretenden Wechselwirkungen im Außenraum, urbanen Wärmeinseln oder geteilten Energiesystemen weiter an [50]. Natanian et al. weisen nach, dass das Mikroklima im Quartier wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf von Gebäuden nimmt [51]. Ihre Ergebnisse zeigen einen Anstieg von bis zu 50 % des Kühlenergiebedarfes bei Berücksichtigung von mikroklimatischen Verhältnissen, was den hohen Interaktionsgrad zwischen Einzelgebäuden und urbanem Raum unterstreicht. In weiteren Untersuchungen wird dargelegt, dass die Veränderung der baulichen Dichte mit mehreren Indikatoren des energetischen Abschneidens korreliert [52]. Beispielsweise kann ein Zusammenhang zwischen der Gebäudeform und der zu erwartenden Auslastung des Energienetzes im Quartier hergestellt werden. Dies ist insbesondere relevant, wenn sich lokale Wärmeinseln durch eine kompaktere urbane Form verstärken und dadurch höhere

Kühlenergiebedarfe in den Sommermonaten vorliegen. Dementsprechend erhöht sich die Nachfrage nach elektrischer Energie, was bei vorhandenen Photovoltaik (PV)-Anlagen zu einer Verschiebung des Anteils der Eigennutzung führen kann. Dicht besiedelte Wohnbereiche haben allerdings aufgrund von Schattenwürfen und begrenzter Flächenverfügbarkeit oft nur ein eingeschränktes Potential für Solarnutzung [42]. Die gegenseitige Verschattung von Gebäuden konnte in mehreren Arbeiten als wesentlicher Einfluss auf deren Energiebedarf nachgewiesen werden. Resultierende Abweichungen lagen in einer Studie von Liu et al. bei 45 % für Kühl- und 21 % für Heizenergiebedarfe [53]. Weitere Forschungsarbeiten zeigen, dass die Gebäudeumgebung einen ähnlich hohen Einfluss auf den Heizwärmebedarf ausüben kann wie beispielsweise der Dämmstandard [54]. Auf Quartiersebene auftretende Wechselwirkungen zwischen der urbanen Form und dem Energiebedarf von Gebäuden müssen daher präziser untersucht werden, um mögliche Interaktionen aufzuzeigen und diese in positiver Weise nutzbar zu machen [54, 55].

Bekannte Entwurfsansätze der Außenraumgestaltung, z. B. zur Schaffung öffentlicher Grünflächen, stehen vielfach in Konkurrenz mit der zunehmenden Forderung nach baulicher Dichte. Grünflächen sind insbesondere in stark versiegelten Gebieten notwendig, um den negativen Auswirkungen des Klimawandels zu begegnen [10]. Der Einsatz von Begrünung an Gebäuden und im Außenraum wird mit vielseitigen Vorteilen, sogenannten Ökosystemleistungen, verbunden [56]. Diese erstrecken sich unter anderem über die Aspekte des Klimaschutzes, der Klimaanpassung sowie der menschlichen Gesundheit. Dabei wird städtisches Grün auch als wichtiger Bestandteil von Konzepten zur Abminderung des urbanen Wärmeinseleffekts betrachtet [57]. Die Möglichkeit, negative stadtklimatische Auswirkungen durch vertikale Nachverdichtung mittels grüner Infrastruktur zu reduzieren und sogar positive Wirkungen zu erzielen, untersuchen Loibl et al. [58]. Dabei nutzen sie mikroklimatische Simulationen auf Quartiers- und Stadtebene, um die Folgen von Nachverdichtung und kombinierten Maßnahmen wie Begrünung an Gebäuden und Außenraum zu quantifizieren. Sie kommen zu dem Schluss, dass eine Berücksichtigung des Mikroklimas sowie des Energieverbrauchs sowohl auf urbaner Ebene, als auch auf Gebäudeebene bereits in den frühen Planungsphasen notwendig ist, um geeignete Maßnahmen zur integrativen Nachverdichtung zu entwickeln. Im Forschungsprogramm *Experimenteller Wohnungs- und Städtebau* des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit konnten weitere Beispiele für einen positiven Einfluss von kombinierten Nachverdichtungs- und Grünmaßnahmen auf stadtklimatische Belange sowie Klimaschutzkonzepte gezeigt werden [59].

Die Interaktion zwischen großen technischen Systemen, wie Gebäuden oder ganzen Städten, mit der Umwelt gewinnt in Forschung und Praxis zunehmend an Bedeutung, da viele Effekte nur global betrachtet werden können [14]. Wie dargelegt kann die oftmals vorliegende Beschränkung auf ausgewählte Zusammenhänge oder Systeminteraktionen zur Vernachlässigung wichtiger Teilaspekte führen. Beispielsweise werden sozio-ökonomische Systeme häufig nur in Zusammenhang mit Energieverbräuchen diskutiert, wodurch Einschränkungen bei der Verbindung zu weiteren relevanten Bereichen entstehen [2]. Das Social-Ecological-Technological Systems (SETS) Rahmenwerk bietet eine Unterstützung zur Betrachtung urbaner Räume als komplexe Systeme. SETS ermöglicht es, Zusammenhänge zwischen sozialen, ökologischen und technischen Systemen sowie deren gegenseitiges Verstärken und dabei auftretende Konflikte einzuordnen [60]. In dieser Dissertation dient es als gedankliches Rahmenwerk für die Implementierung des Systemdenkens bei der qualitativen Identifikation von Wech-

selwirkungen. SETS wurde beispielsweise für Ökosystemleistungen in Städten angewandt, wobei die systemische Betrachtung als zwingend notwendig für die Realisierung der angestrebten Positiveffekte genannt wird [61]. Abbildung 2.1 zeigt eine beispielhafte Verortung einiger zuvor genannter Maßnahmen an Quartieren innerhalb der SETS Dimensionen. Die Verortungen stellen dabei eine Einschätzung des Autors dieser Dissertation dar und können je nach betrachtetem Schwerpunkt variieren. Es ist jedoch ersichtlich, dass die verschiedenen Maßnahmen meist mehrere Aspekte aus sozialen, ökologischen und technischen Bereichen abdecken. Eindeutige Grenzen sind dabei kaum identifizierbar und die resultierenden Auswirkungen verschwimmen mit steigender Komplexität.

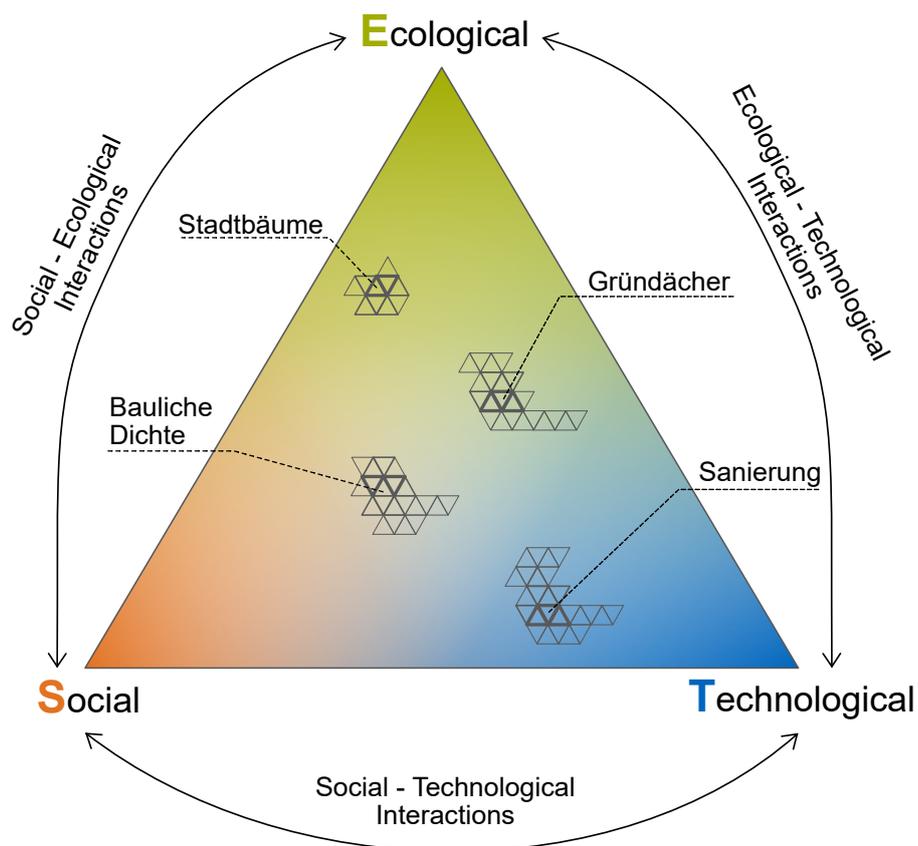


Abbildung 2.1 Beispielhafte Verortung von Quartierseingriffen im SETS Rahmenwerk. Eigene Darstellung basierend auf [61].

Neben allgemeinen Rahmenwerken wie dem SETS Ansatz existieren mehrere konkrete Anwendungsfelder des Systemdenkens auf urbaner Ebene. Rus et al. identifizieren mithilfe eines systemischen Ansatzes die Resilienz gegenüber Extremereignissen wie Erdbeben [62]. Dabei führen die Autor:innen eine Methodik zur Erarbeitung komplexer urbaner Systeme in diesem Kontext ein. Bezogen auf den Stadtbereich wurde durch Anders ein qualitatives Wirkungsgefüge erstellt, welches die Komplexität der Wechselwirkungen im städtischen Kontext abbildet [63]. Hierfür erläutert er eine Vielzahl an Parametern und ordnet deren Auswirkungen in den Gesamtkontext der Nachhaltigkeit auf Stadtebene ein. Das System Stadt kann demnach als offenes, komplexes System gesehen werden, da Verbindungen nach außerhalb existieren (Energie-, Material-, Rohstoffzufuhr, etc.) und innerhalb des Systems sich gegenseitig beeinflussende Knotenpunkte vorliegen [49, 63, 64].

Das System Gebäude weist dabei andere Zusammenhänge und Abhängigkeiten auf als das System der gebauten Umwelt [49], weshalb diese gemeinsam betrachtet werden müssen. Dementsprechend sind sowohl Bottom-up als auch Top-down Ansätze notwendig, um systemische Lösungen zu kreieren [64]. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Wahl der Betrachtungsebene zu. Viele Arbeiten beschäftigen sich mit den Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen und vernachlässigen dabei Interaktionen innerhalb dieser Systeme [65–67]. Dabei ist die Festlegung des Betrachtungsrahmens wesentlich, um sowohl räumlich als auch zeitlich die Potentiale von Wechselwirkungen zu identifizieren [68].

Das steigende Interesse an der Bewertung des Zusammenspiels urbaner Stoff- und Energieströme führt schließlich zur Frage nach Möglichkeiten diese zu quantifizieren und ihre Interaktion abzubilden. Dabei spielt neben der absoluten Bewertung von Einflussgrößen (THG-Emissionen, Ressourcenströme, Energie, etc.) auch zunehmend der Einbezug interaktiver Effekte eine wichtige Rolle. In der Wissenschaft ist dies häufig bei der Bewertung ganzer Stadtssysteme der Fall [67, 69]. Dass die gebaute Umwelt und die damit verbundenen Wechselwirkungen nur durch die Zusammenführung von Skalen und Kategorien erfassbar gemacht werden können, stellt auch Sevaldson in seinem Buch *Systems-oriented design for the built environment* fest [70]. Er fordert eine intensivere Berücksichtigung von Systemdenken, insbesondere in der Architektur. Darin sieht Sevaldson großes Potential zur Erzielung synergetischer Effekte:

„True innovation for the built environment is clearly needed, but to achieve it we need to investigate further and better forecast the consequences of our interventions. The biggest potential for innovation is no longer found on the singular technological invention but at the systemic level where such inventions are contextualised and where systems synergies are exploited.“

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein hohes Maß an Wechselwirkungen im urbanen Raum vorherrscht. Eingriffe am Gebäudebestand und im Außenraum beeinflussen dieses Gefüge in nicht linearer Weise. Zahlreiche Untersuchungen weisen nach, dass die simultane Anwendung von Maßnahmen an Gebäuden und Quartieren notwendig ist, um die gesteckten Ziele hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung zu erreichen. Daraus resultierende Synergien gilt es zu forcieren und auftretende Trade-offs gezielt zu erkennen und zu steuern. Sowohl die Identifikation und Quantifizierung, als auch die Steuerung von Synergien und Trade-offs stellen dabei eine anspruchsvolle und bislang nicht umfänglich gelöste Aufgabe dar. Dies wird auch zunehmend von Kommunen und Städten erkannt, was deren Maßnahmenpriorität hin zu einer kombinierten Betrachtung von Klimaschutz und Klimaanpassung lenkt [8]. Es fehlen jedoch Methoden, um die Voraussetzungen für Win-Win Situation zu erkennen sowie deren niedrigschwellige Umsetzung zu ermöglichen [71].

2.1.3 Quantifizierung und Optimierung urbaner Wechselwirkungen

Wie im Vorangegangenen dargelegt, ist der Gebäudesektor mit einer Vielzahl von Wechselwirkungen behaftet, die zu zahlreichen multikriteriellen Fragestellungen führen. Diese müssen im Planungsprozess berücksichtigt werden, um bestmögliche Ergebnisse sicherzustellen und unbewusste Negativwirkungen zu verhindern. Zur Quantifizierung dieser Wechselwirkungen existieren bereits methodische Ansätze in urbanen Simulationsmodellen, die ausgewählte Interaktionen bewertbar machen. Insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Innen- und Außenräumen wurden anhand solcher Modelle intensiv erforscht [51, 53, 54, 72–74]. Eine wesentliche Herausforderung besteht in den hohen Simulationszeiten, die bei der Berücksichtigung von Außenkomfort [58], Wind [75] oder Energieverbrauch [76] anfallen. Dabei ist offensichtlich, dass die Simulationszeit weiter ansteigt, wenn diese Aspekte parallel untersucht werden. Die Kopplung solcher rechenintensiver Simulationsmethoden kann jedoch zu einem besseren Verständnis der vorherrschenden Interaktionen in urbanen Systemen beitragen [77].

Das Ziel solcher vernetzter, urbaner Simulationsmodelle besteht darin, optimale Lösungen (mathematisch: nicht-dominierte Lösungen oder Pareto-optimale Lösungen) für komplexe Planungsprobleme zu finden. Dafür müssen mehrere Zielgrößen gleichzeitig berücksichtigt werden. Pareto-optimale Lösungen verallgemeinern das Konzept des mathematischen Minimums auf mehreren Dimensionen. Eine Pareto-optimale Lösung ist dadurch charakterisiert, dass keine andere Lösung existiert, die in jeder Zielgröße besser abschneidet [78]. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass eine Verringerung der lebenszyklusbasierten THG-Emissionen nur durch eine Verschlechterung des Außenraumkomforts erreicht werden kann oder umgekehrt. Es existieren daher oft mehrere Pareto-optimale Lösungen für solche multikriteriellen Probleme, was zur Ausbildung einer Pareto Front (PF) führt. Ein breites Spektrum an möglichen Pareto Lösungen ermöglicht Entscheidungsträger:innen die Diskussion vorherrschender Zielkonflikte und deren Abwägung [79]. Die umfassende Identifikation der PF ist im Falle urbaner Simulationsmodelle allerdings häufig mit einem hohen Rechenaufwand verbunden, da viele der erforderlichen Softwaretools für die Bewertung von Einzelszenarien entwickelt wurden. Zudem führt die Vielfalt aus Planungsvariablen, Zielgrößen und Anwendungsfällen schnell zu einer nicht mehr handhabbaren Anzahl erforderlicher Simulationen.

Forschung und Praxis bedienen sich im Fall möglicher Zielkonflikte Verfahren zur multikriteriellen Optimierung (engl. Multi-Objective Optimization (MOO)), um deren bestmögliche Kompromisse zu identifizieren. Auch im Bausektor hat die Anwendung von MOO Methoden in den letzten Jahren ein wachsendes Forschungsinteresse erfahren [80]. Dabei lassen sich die direkte Suche und die Suche mittels Ersatzmodellen unterscheiden. Es gibt nur wenige direkte Suchalgorithmen, die für Anwendungen im Bauwesen relevant sind. Dies ist darin begründet, dass MOO Methoden oft nur mit einer begrenzten Anzahl von Eingaben effizient arbeiten und mathematische Garantien für ein globales Optimum selten geben sind [81]. Brute-Force-Methoden werten alle Eingabekombinationen sequentiell aus, sind aber nur für endliche (auch diskrete oder kategorische) Parameter geeignet [82]. Gradientenbasierte Verfahren sind empfindlich gegenüber lokalen Extremwerten und daher für nichtlineare Gebäudesimulationen ungeeignet [83]. Modellbasierte Algorithmen erzeugen Ersatzmodelle für die zu optimierende Simulation. Zu dieser Gruppe gehören evolutionäre Algorithmen und Particle-Swarm-Optimization, welche sich im Kontext der Gebäudeoptimierung als geeignet erwiesen haben [77, 81, 84]. In der Praxis bestehen jedoch oft Unsicherheiten im Umgang mit derartigen Algorithmen. Dies führt zur Untersu-

chung von rechenintensiven Modellen mit ungeeigneten Methoden oder zur Anwendung von zu kurzen Optimierungslaufzeiten [85]. Wortmann vergleicht mehrere Optimierungsalgorithmen in einer Analyse von Tageslicht und Blendung [86]. Dabei stellt er fest, dass die Anwendung von modellbasierter MOO in der Architektur sehr gut für rechenintensive Simulationsmodelle geeignet ist. Zhang et al. zeigen, wie modellbasierte MOO eingesetzt werden kann, um signifikante Verbesserungen beim Energieverbrauch und der Gebäudestruktur zu erzielen [87]. Allerdings muss gleichzeitig ein Kompromiss mit den Solarerträgen eingegangen werden. Die Autor:innen betonen dabei auch die Bedeutung von Optimierungsansätzen für die Entscheidungsfindung in frühen Planungsphasen. Viele MOO Algorithmen garantieren keine vollständige Abdeckung der PF, die für eine ganzheitliche Ermittlung des Entscheidungsraums von Planenden notwendig ist [88]. Zhao et al. verwenden beispielsweise einen genetischen Algorithmus zur Untersuchung der Tageslichtleistung und des Energiebedarfs [89]. Obwohl die Optimierung zur tatsächlichen PF hin konvergiert, gibt es noch Lücken in den Ergebnissen. Darüber hinaus benötigen auch diese MOO Ansätze einige Modellevaluierungen, da die PF Abdeckung mit einer sehr geringen Anzahl von Auswertungen abnehmen kann [84]. Sie sind daher für die im Rahmen dieser Dissertation betrachteten, vernetzten Simulationsmodelle für den Innen- und Außenraum nur bedingt geeignet und es gilt alternative Herangehensweisen für die multikriterielle Optimierung rechenintensiver Quartiersmodelle zu identifizieren.

2.1.4 Multikriteriell optimierte Entscheidungsunterstützung in der Quartiersplanung

Für Stadtplaner:innen ist die Entscheidungsfindung in frühen Planungsphasen eine mit großen Unsicherheiten behaftete Herausforderung. Längst ist bekannt, dass im Verlauf von Projekten die Kosten von Entwurfsanpassungen umso weiter ansteigen je später diese erfolgen. Die Möglichkeiten, dagegen steuernd einzugreifen reduzieren sich im Projektverlauf [16, 90]. Ebenso kann der größte Effekt auf die Energie- und THG Bilanz eines Gebäudes in den frühen Planungsphasen erzielt werden, da dort noch Einfluss auf dessen geometrische Gestaltung möglich ist [91]. Eine Vielzahl weiterer Zielaspekte (z. B. hohe PV Erträge, hohe Tageslichtverfügbarkeit, etc.) kann und sollte zudem bereits in diesen frühen Planungsphasen Berücksichtigung finden, da spätere Anpassungen meist zu hohen Folgekosten führen [92, 93].

Im Bausektor zeigen Kiss et al. wie MOO die Entscheidungsfindung unterstützen kann, indem Umweltindikatoren aus dem Betrieb und der Konstruktion von Gebäuden gegeneinander abgewogen werden [32]. Der von Bader et al. entwickelte HypE-Algorithmus wird verwendet, um konkurrierende Wirkkategorien einer Ökobilanz zu identifizieren [94]. Die Verfasser:innen betonen in diesem Zug das Potential von MOO Ansätzen, den Entscheidungsraum für Planende aufzuzeigen. Schuler et al. untersuchen mittels linearer Gleichungssysteme Planungsoptionen für Entscheidungsträger:innen und resultierende Kompromisse bei Einzelgebäuden sowie auf der städtischen Ebene [48]. Sie weisen darauf hin, dass detaillierte dynamische Simulationen einen erheblichen Rechenaufwand erfordern können, um ein vollständiges Bild des Entscheidungsraums zu generieren. Abdollahzadeh et al. demonstrieren die Verwendung von gekoppelten Innen- und Außenraumsimulationen in einem parametrischen Ansatz zur gleichzeitigen Bewertung des Energiebedarfs von Gebäuden und des thermischen Außenraumkomforts [95]. Sie diskutieren die Ermittlung des vorhandenen Entscheidungsraumes und die Auswahl des optimalen Entwurfsergebnisses. Die zunehmende Simulationszeit stellt jedoch auch in ihrer Studie eine

große Herausforderung für die Verwendung eines detaillierteren Simulationsmodells dar. Mukkavaara und Shadram zeigen, wie Sensitivitätsanalysen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Abwägung zwischen grauen und betrieblichen Energiebedarfen eingesetzt werden können [30]. Sie wenden MOO an und wählen Pareto-optimale Lösungen auf der Basis errechneter Sensitivitäten mit der Methode von Morris aus. Die Verwendung von Ersatzmodellen zur Analyse der Eigenschaften von Pareto Lösungen wird in Li et al. dargelegt [96]. Die Autor:innen erstellen ein Ersatzmodell für ein einzelnes Simulationswerkzeug und verwenden dieses Modell zur Suche nach Pareto Lösungen. Aus der zugehörigen Verteilung der Inputparameter leiten sie Empfehlungen für deren Auswahl ab. In ihrem Ausblick erwähnen sie die Integration weiterer Aspekte, um die systemische Perspektive im urbanen Umfeld umzusetzen. Liu et al. nutzen das MOO Tool Wallacei [97] zur multikriteriellen Optimierung der urbanen Form, des Energiebedarfs und der Solarnutzung [77]. Die dadurch identifizierten Pareto Punkte gruppieren sie in Clustern und vergleichen die Ergebnisse mit dominierten Lösungen (d. h. nicht Pareto-optimale Lösungen). Die Autor:innen weisen insbesondere auf die Verwendbarkeit des Pareto Ansatzes in frühen Planungsphasen hin und zeigen wie dadurch kontextspezifische Empfehlungen zum Umgang mit Trade-offs abgeleitet werden können.

Zusammenfassend wird eine hohe Nachfrage nach Wissen und Methoden zur Entscheidungsfindung in frühen Planungsphasen deutlich. Dabei ist die Berücksichtigung von Wechselwirkungen auf Gebäude- und Quartiersebene essenziell, um durch Synergieeffekte eine bestmögliche Nutzung von begrenzten Ressourcen sicherzustellen. Es gilt die Frage zu klären, in wie weit die Nutzung bestehender Baustruktur und im Quartier anfallender Wechselwirkungen einen Positivbeitrag zu ökologischen Aspekten leisten kann und wie Trade-offs gezielt gesteuert werden können [10]. Derzeit gibt es nur wenige Leitlinien für die Planung von Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels oder zur Anpassung an den Klimawandel, die potentielle Konfliktbereiche bei stadtpolitischen Entscheidungen aufzeigen und systematische Wege zur Lösung solcher Zielkonflikte anbieten [98]. Ein Beispiel stellt das 2024 abgeschlossene Forschungsprojekt *Grüne Stadt der Zukunft* dar, welches insbesondere Unterstützung beim Einbezug von Ökosystemleistungen grüner Infrastruktur bietet [99]. Neben qualitativen Planungshilfen fehlt es an einfach zu handhabenden Werkzeugen zur Unterstützung in frühen Planungsphasen. Die Notwendigkeit derartiger Tools wird unter anderem durch Landauer et al. und Balouktsi in Bezug auf Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen hervorgehoben [68, 100]. Bisherige Methoden integrieren dabei oft zu wenige Dimensionen der Nachhaltigkeit, vernachlässigen soziale Systeme oder nehmen keine hinreichende Verbindung von Gebäude- und urbaner Ebene vor [2, 101].

2.1.5 Entwicklung multikriterieller Entscheidungsprozesse

Die Hyper Space Exploration ist ein Konzept aus dem Bereich des Systems Engineering, das die Entwicklung virtueller Prototypen (z. B. Simulationsmodelle) mit statistischem Lernen kombiniert, um den Raum Pareto-optimaler Lösungsalternativen in komplexen Umgebungen zu ermitteln [79, 102]. Sie bietet einen prozessualen Rahmen, methodische Hintergründe zu den einzelnen Prozessschritten sowie Techniken zu deren Umsetzung. In dieser Dissertation dient die Hyper Space Exploration als Leitrahmen für die Entwicklung eines Verfahrens zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersplanung.

Der Hyper Space besteht aus dem durch die veränderbaren Variablen (Design Space, DS), der Systemkonfiguration (Use Case, UC) und den Zielvariablen (Target Space, TS) aufgebauten Raum. Die Hyper Space Exploration ermöglicht es, die Auswirkungen von Inputs und Systemkonfigurationen auf die Zielindikatoren zu untersuchen und gegenüber zu stellen. Sie quantifiziert Kompromisse und identifiziert Pareto Lösungen. Die Methodik umfasst einen fünfstufigen iterativen Prozess: Variablendefinition, Versuchsplanung, Simulation, Erstellung von Ersatzmodellen und Optimierung von System und Ersatzmodellen. Die Anwendung der Methodik erfolgt innerhalb einer Werkzeugkette zusammen mit einem Simulationsmodell, das die systemischen Wechselwirkungen abbildet. Alle Teile müssen mit der Hyper Space Exploration-Umgebung gekoppelt werden, um die Kontrolle und Überwachung der Inputs und Outputs während der Optimierung zu gewährleisten. Der generische Arbeitsablauf wurde erfolgreich in verschiedenen Forschungsfeldern eingesetzt, beispielsweise bei Batteriespeichersystemen [103], dezentralen Energiesystemen [104] oder hybridelektrischen Schienenfahrzeugantrieben [105].

Diese Dissertation adaptiert das universelle Konzept der Hyper Space Exploration auf die Quartiersplanung. Darüber hinaus wird ein entsprechender Implementierungsprozess entwickelt.

2.2 Die Begriffe Synergie und Trade-off im Bauwesen

Als Grundlage für die folgenden Bewertungsansätze werden die Begriffe Synergie und Trade-off im Rahmen dieser Arbeit definiert. Dazu wird ihre derzeitige Verwendung in Kapitel 2.2.1 zunächst allgemein und anschließend spezifisch für das Bauwesen beleuchtet. Zudem erläutert Kapitel 2.2.2 bestehende Untersuchungsmethoden für Synergien und Trade-offs. Darauf aufbauend wird in Kapitel 2.2.3 eine Definition der Begriffe abgeleitet.

2.2.1 Verwendung der Begriffe Synergie und Trade-off

Die ursprünglich von Aristoteles stammende Erkenntnis eines möglichen, sich gegenseitig unterstützenden Zusammenwirkens einzelner Elemente im Sinne von

„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“

wird im heutigen Sprachgebrauch als Synergie bezeichnet und für zahlreiche Anwendungsgebiete adaptiert. In der Architektur wurde der Begriff maßgeblich durch den amerikanischen Architekten Richard Buckminster Fuller geprägt. Er setzte sich gegenseitig stützende Dreiecksstrukturen zur Herstellung von Hüllbauteilen ein und beschrieb ihren kollektiven Lastabtrag als Synergie [106]. Um die Bedeutung der Synergiebetrachtung in der Forschung zu beleuchten, wurde eine Literaturrecherche mithilfe der Datenbank *Web of Science* durchgeführt. Dabei wurden nur englischsprachige Journal Artikel sowie Beiträge in Konferenzbänden aus den Jahren 1990 bis 2023 berücksichtigt. Die Suche wurde im Januar 2024 durchgeführt, weshalb unter Umständen noch nicht alle Artikel des Jahres 2023 veröffentlicht und damit erfasst sind. Als Suchbegriffe in Titel, Kurzfassung und Schlagwörtern wurden folgende Syntaxen basierend auf Corning verwendet [107]: *synerg**, *emergence*, *cooperativity*, *symbiosis*, *coevolution*, *symmetry*, *order*, *interactions*, *interdependencies*, *systemic effects*. Die Suche führte zu insgesamt 7.569.166 Treffern. Dabei ist eine Stabilisierung der Zahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen in diesem Themenfeld in den vergangenen Jahren feststellbar. Abbildung 2.2 zeigt einen starken Anstieg der Publikationszahlen ab den zweitausender Jahren, wobei sich diese seit 2019 auf einem konstanten Niveau bewegen. Um die dabei behandelten Aspekte thematisch einzuordnen, wurden die bei *Web of Science* hinterlegten Zuordnungen zu den Sustainable Development Goals (SDGs) herangezogen. Diese waren für 70 % der Publikationen verfügbar. Abbildung 2.3 visualisiert den jeweiligen Anteil der 16 SDGs. Dem Ergebnis kann eine starke Repräsentation des Synergiebegriffs im SDG 3 (Gesundheit und Wohlbefinden) entnommen werden. Danach folgen die Ziele zur nachhaltigen Entwicklung von Städten und Gemeinden (SDG 11), Maßnahmen zum Klimaschutz (SDG 13) sowie bezahlbare und saubere Energie (SDG 7). Auf alle diese SDGs nimmt das Bauwesen erheblichen Einfluss [108], was die hohe Relevanz des Synergiebegriffs in diesem Kontext unterstreicht. Bei der Auswertung nach Forschungsfeldern treten neben den Ingenieurwissenschaften insbesondere die Naturwissenschaften, die Informatik sowie medizinische Bereiche häufig auf. Die folgende Suche nach bisherigen Interpretationen der Begriffe Synergie und Trade-off konzentriert sich daher auf diese Disziplinen.

Die Recherche zeigt eine stark disziplinenabhängige Verwendung des Synergiebegriffs. Im medizinischen Kontext werden häufig Interaktionen von Medikamenten untersucht, um verbesserte Genesungseffekte durch die Anwendung mehrerer Präparate zu erzielen [109] oder die Interaktion von Ausgangs-

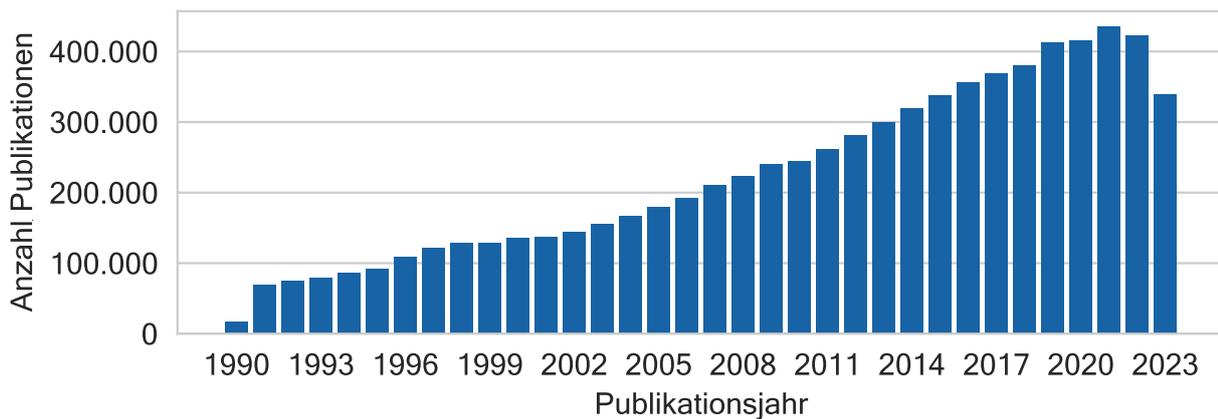


Abbildung 2.2 Anzahl der Publikationen zum Themenfeld Synergie auf *Web of Science*.



Abbildung 2.3 Suchergebnisse zum Themenfeld Synergie je SDG auf *Web of Science*. Prozentuale Angaben beziehen sich auf den Anteil der Publikationen, die dem jeweiligen SDG zugeordnet sind.

werten (Geschlecht, Überlagerung von Vorerkrankungen) zu bewerten [110]. Der wirtschaftliche Kontext strebt insbesondere im Rahmen von Fusionen und Firmenübernahmen Synergieeffekte an [111]. Diese spiegeln oft monetäre Einsparungen durch die Reduktion und Bündelung von gemeinschaftlichen Prozessen wider. Auf dem Gebiet der Informationstechnik bestehen Synergieeffekte bei der Erschließung von Inhalten auf Grundlage von mehreren Datensätzen, die isoliert voneinander keinen Schluss auf die gesuchte Information zulassen [112]. Auch auf soziologischer Ebene wird mittels synergetischer Betrachtungen versucht, das Zusammenwirken von Projektgruppen zu quantifizieren [113]. Rehak et al. beziehen den Synergiebegriff auf das parallele Versagen kritischer Infrastrukturen [114]. Dabei wird klar, dass Synergie auch als negativ interpretiert werden kann.

Die Analyse des synergetischen Wirkens mehrerer Dimensionen der Nachhaltigkeit wird häufig zur Evaluation von politischen Entwicklungsstrategien angewandt. Fan und Fang führen den Begriff der urbanen Synergie ein, um das Maß der Zusammenarbeit von Akteuren der Stadtplanung hinsichtlich

der Realisierung von Kooperationsgewinnen zu bestimmen [115]. Du Plessis stellt zudem fest, dass Nachhaltigkeit durch das Zusammenwirken verschiedener Lösungen auf technischer, ökonomischer und sozialer Ebene entsteht und nicht durch die isolierte Aufsummierung von Maßnahmen abgebildet werden kann [116]. Als Voraussetzung für das Auftreten von Synergie ist demnach die Interaktion einzelner Bestandteile in einem System notwendig. Richard Buckminster Fuller führt dazu aus:

„Das Verhalten eines Systems kann nicht aus dem Verhalten seiner Bestandteile abgeleitet werden.“

Insgesamt lässt sich nicht nur eine disziplinspezifische Definition von Synergie erkennen, sondern auch eine kontextspezifische Einordnung innerhalb des jeweiligen Betrachtungsrahmens. Beide Aspekte beeinflussen die erzielbaren Erkenntnisse [117]. Dabei ist eine Übertragung zwischen den Bereichen umsetzbar, wie etwa Meijers durch die Anwendung der Grundprinzipien ökonomischer Synergie auf die Untersuchung des Netzwerkeffekts zwischen Städten zeigt [118]. Die Abhängigkeit des Auftretens und der Einordnung von Synergie vom betrachteten Kontext führt dazu, dass zahlreiche Autor:innen den Synergiebegriff für den jeweiligen Anwendungsfall definieren. Wie Yin feststellt, handelt es sich zwar stets um Effekte aus Interaktionen, jedoch existiert aufgrund der vielfältigen Betrachtungsweisen von Synergien keine umfassende Definition [68, 119]. Es ist feststellbar, dass die Interaktionen zwischen Prozessen oder Elementen als Voraussetzung für das Auftreten von Synergie einzuordnen ist. Corning weist außerdem darauf hin, dass die häufig verwendete Metapher „ $1 + 1 > 2$ “ in diesem Zusammenhang irreführend wirkt, da ebenso ein Ergebnis kleiner als zwei und damit negative Synergie vorliegen kann [120]. Er führt den Kern des Synergiebegriffs auf den aus Interaktionen resultierenden Effekt zurück. Dabei ist stets darauf zu achten, dass neben Synergien als Positiveffekte auch negative Effekte aus Interaktionen resultieren können, sogenannte Trade-offs bzw. Kompromisse [49, 121]. Einen Überblick über gängige Begriffe kann Landauer et al. in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung entnommen werden. Beispiele für verwendete Begrifflichkeiten sind unter anderem [10, 68]:

- Positiv wirkend: Synergie, Co-Benefit, Harmonisierung
- Neutral wirkend: Verbindung, Integration, Substituierbarkeit, Kompromiss, Trade-off
- Negativ: Kompromiss, Trade-off, negative Synergie

Grafakos et al. beschreiben den Begriff Trade-off als Situation, in der eine Abwägung bzw. Auswahl erforderlich ist, da nicht alle wünschenswerten Ziele gleichzeitig erreichbar sind [8]. Die Autor:innen unterscheiden dabei ausdrücklich zwischen dem Begriff Trade-off, welcher eine Abwägungssituation darstellt und dem Begriff Konflikt, bei welchem Ziele eingeschränkt oder die Umsetzung von Maßnahmen z. B. durch räumliche Konkurrenzen verhindert wird. Als Beispiel für einen stadtplanerischen Trade-off nennen Hamin und Gurrán die für den Klimaschutz wünschenswerte, hohe Dichte von Quartieren, wohingegen für die Klimaanpassung Grünflächen und entsprechend geringere bauliche Dichten vorteilhaft sind [98]. Klimaschutz und Klimaanpassung bilden dabei einen Trade-off und müssen in solchen Situationen balanciert werden, wobei Konflikte nicht immer vermeidbar sind [16]. Im Folgenden werden die Begriffe Trade-off und Zielkonflikt synonym verwendet. Der Begriff Konflikt bezeichnet hingegen unmittelbare physische oder temporale Konkurrenzsituationen. Beispielsweise wenn die Pflanzung von Bäumen aufgrund vorhandener Baukörper nicht möglich ist. Generell sind Trade-offs im Bausektor

zahlreich, jedoch nur wenig untersucht [10]. Mehrere Autor:innen nennen zudem die Quantifizierung von Synergien und Trade-offs als Forschungslücke und erwarten einen hohen Nutzen für die Entscheidungsunterstützung in der Stadtentwicklung [8, 16].

Im Rahmen der Recherchearbeiten wurde in Bezug auf das Bauwesen ein vergleichsweise einheitliches Bild der Definition von Trade-offs erkannt. Dagegen bestehen grundlegende Unterschiede in der Definition und Bewertung von Synergie. Dieses diffuse Bild des Synergiebegriffs wird in anderen Arbeiten bestätigt [122]. Um eine Definition speziell in Bezug zum Bauwesen abzuleiten, wurden Forschungsbeiträge nach der Verwendung des Synergiebegriffs gruppiert. Dabei konnte insbesondere eine Aufgliederung in verschiedene Betrachtungsebenen festgestellt werden. Die strikte Interpretation als „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ folgt meist einem unikriteriellen Ansatz. Das bedeutet, die Betrachtung bezieht sich auf nur eine Zielgröße. Daneben wird Synergie in einigen Arbeiten auch in der Erreichung eines durch Einzelmaßnahmen nicht erzielbaren Effekts gesehen. Diese Sichtweise liegt dem Bauwesen häufig zugrunde, auch wenn sie in dieser Form nicht explizit genannt wird. Es ist aber durch zahlreiche Arbeiten erwiesen, dass besonders energieeffiziente Gebäude oft nur durch eine Kombination von technischen, ökologischen und sozialen Maßnahmen umsetzbar sind [33]. Die Wirkung auf mehrere Kriterien (mutikriteriell) versteht hingegen eine Verbesserung hinsichtlich mehrerer Aspekte des nachhaltigen Bauens durch ein oder mehrere Maßnahmen. Ein ähnliches Konzept wurde von Luukkanen et al. für die Bewertung von SDGs vorgeschlagen [123]. Die Autor:innen stellen dabei fest, dass sowohl Synergien zwischen verschiedenen SDGs als auch innerhalb von nur einem SDG untersucht werden sollten. Die drei genannten Interpretationen und beispielhafte Verwendungen in der Literatur sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Tabelle 2.1 Verschiedene Interpretationen des Synergiebegriffs und ihre Verwendung in der Literatur.

Interpretation Synergiebegriff	Betrachtungsebene	Verwendung
Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile	Unikriteriell	[8, 10, 40, 121, 123–126]
Das Ganze ist durch Einzelmaßnahmen nicht erreichbar	Unikriteriell	[33, 112, 120]
Die Maßnahme erzielt Gewinne in zusätzlichen Bereichen	Multikriteriell	[2, 10, 16, 64, 98, 100, 127–130]

2.2.2 Bestehende Untersuchungsmethoden für Wechselwirkungen

Wechselwirkungen wurden im Vorangegangenen als grundlegende systemische Eigenschaften identifiziert, die zu Synergien bzw. Trade-offs führen. Im Folgenden werden bestehende Methoden für deren Bewertung beleuchtet. Die meisten dieser Methoden sind dabei qualitativer Natur und erlauben nur eine eingeschränkte Quantifizierung [121]. Eine Möglichkeit zur Quantifizierung von Synergie schlagen Luukkanen et al. vor. Diese wird eingesetzt, um die Entwicklung verschiedener Bewertungskriterien der Nachhaltigkeit gegenüberzustellen [123]. Die Autor:innen folgen der Auffassung, dass Synergie

durch das Auftreten eines kombinierten Ergebnisses, das größer als die Summe der Einzelergebnisse ausfällt, nachgewiesen werden kann. Der Grundgedanke dieser Arbeit wurde durch Mainali et al. um eine Netzwerkanalyse zwischen den SDGs erweitert [121]. Dies ermöglicht die Untersuchung von Synergien und Trade-offs zwischen verschiedenen SDGs. Ebenfalls in Bezug auf die SDGs schlagen Pedercini et al. eine Bewertungsmethodik für Synergien zwischen politischen Entwicklungsstrategien vor, welche eine Quantifizierbarkeit herstellt [131]. Sie vergleichen einen Ausgangsfall mit der Entwicklung nach politischen Interventionen und berechnen aus den Ergebnissen einen Bewertungsparameter für den Beitrag aus Synergieeffekten. Mu et al. bewerten die Synergie zwischen verschiedenen Indikatoren zu Wirtschaft, Energie und Ökologie anhand von Vergangenheitsdaten [65]. Almeida und Duarte entwickeln die Kennzahl *Synergy-Gain*, welche den durch Gruppenkonstellation generierten Mehrwert von Projektportfolios in Prozent ausdrückt [124]. Dazu teilen sie die Bewertung in einen Grundbeitrag sowie einen synergetisch erwirkten Beitrag ein. Diese Art der Synergiebewertung zwischen Projekten ist allerdings auf zwei Projekte begrenzt. Die Bewertung der Synergie erfolgt dabei für jede der Projektkombinationen durch Entscheidungsträger:innen. Auch Alshebli et al. beschäftigen sich mit durch Gruppenkonstellationen generierten Mehrwerten [113]. Die Autor:innen schlagen zur Bewertung einen Interaktions-Index vor, der die Gruppenleistung ins Verhältnis zu den individuellen Leistungen setzt.

Zur Bewertung von Trade-offs sind häufig Simulationsmodelle und damit verbundene Verfahren zur multikriteriellen Optimierung notwendig. Diese wurden in Kapitel 2.1.3 (sh. Seite 13) beleuchtet und werden daher an dieser Stelle nicht erneut ausgeführt. Das Grundprinzip besteht dabei stets in der Suche nach Pareto-optimalen Lösungen, bei welchen sich Optima für einzelne Zielgrößen nur durch die Verschlechterung anderer Zielgrößen erreichen lassen. Dabei entstehen mehrdimensionale Lösungsräume, welche die Entscheidungsfindung unterstützen, indem sie den optimalen Handlungsspielraum aufzeigen. Ein etabliertes Verfahren zur Auflösung solcher multidimensionalen Problemstellung ist die Nutzwertanalyse. Diese weist den einzelnen Zielgrößen eine Gewichtung zu und versucht sie dadurch auf einen Wert zusammen zu führen, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Dies kann jedoch zu Verzerrungen führen, wenn die optimalen Ergebnisse jeder Dimension noch nicht bekannt sind und Abhängigkeiten zwischen mehreren Zielgrößen vorliegen. Zudem können subjektive Einschätzungen entstehen, da keine objektive Vorgabe zur Einordnung als gutes bzw. schlechtes Ergebnis besteht [11]. Im Bausektor führen Bi und Little die Situationsabhängigkeit von Gebäuden als problematisch bei der Anwendung von Nutzwertanalysen an [2]. Die Nutzwertanalyse funktioniert gut für Gebäude in einem spezifischen Betriebszustand. Eine Vergleichbarkeit zwischen Gebäuden oder ganzen Szenarien könne sie aber aufgrund von sich ändernden Kausalzusammenhängen nicht abbilden und dadurch zu Verzerrungen führen.

Mit Blick auf den Bausektor existieren in Teilbereichen Ansätze, die sich explizit mit der Bewertung von Wechselwirkungen auseinandersetzen. Die Erweiterung der Lebenszyklusanalyse um *Induced Impacts* wurde durch Anderson in seiner Dissertation vorgeschlagen, um die aus Wechselwirkungen zwischen der Mobilität und dem Gebäudesektor resultierenden THG-Emissionen zu erfassen [132]. Xu et al. führen den *Network Synergy Effect* auf Quartiersebene ein, um Interaktionen zwischen Sanierungsmaßnahmen und Nachbargebäuden zu bewerten [125]. Dabei stellen sie fest, dass Maßnahmen gefunden werden können, die größere Einsparungen für das Quartier im Ganzen als für die dortigen Einzelgebäude nach sich ziehen. Gjorgievski et al. bewerten die zwischen Klimaschutzmaßnahmen

möglichen Synergien und Trade-offs anhand einer qualitativen Einordnung der Interaktion zwischen Maßnahmen und dem Entwicklungsziel Klimaschutz [133]. Dazu verwenden sie eine Skala von +3 (maximale Synergie) bis -3 (maximaler Trade-off). Dies ermöglicht die Ermittlung von synergetisch bzw. kompromittierend wirkenden Maßnahmen hinsichtlich der Zielgrößen. Ihre Einordnung verschiedener Maßnahmenkataloge zum Klimaschutz und die jeweilige Bewertung anhand der 17 SDGs gibt einen Überblick darüber, welche Ziele besonders profitieren und wo eine hohe Gefahr von Verschlechterungen durch die Umsetzung von Maßnahmen besteht. Die Verbindung von quantitativen Aspekten (z. B. Energieverbrauch, Kosten) mit der qualitativen Erfüllung funktioneller Anforderungen zeigt Österreicher in ihrer Arbeit auf. Die Autorin entwickelt eine Bewertungsmethodik für Schulgebäude, welche die Identifikation von Maßnahmenpaketen mit hohen quantitativen Synergieeffekten ermöglicht [129]. Zudem sichert die Methodik eine qualitative Umsetzung geforderter Funktionen. Einige wenige Arbeiten im Bausektor haben versucht die Ungleichung „ $1 + 1 > 2$ “ nachzubilden und Maßnahmenkombinationen mit synergetischen Effekten zu finden. Dabei wird die Arbeit in Szenarien als wesentlich für die Untersuchung von Eingriffen in bestehende Strukturen und die Evaluation von Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen eingestuft. Diese Untersuchungen bleiben jedoch auf der Ebene von Bauelementen oder beschränken sich auf Sanierungsmaßnahmen [40, 41]. Sie werden im Zuge der Ergebnisdiskussion dieser Arbeit wieder aufgegriffen.

2.2.3 Begriffsdefinitionen im Rahmen dieser Arbeit

Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird die Erfordernis einer eindeutigen Definition der Begriffe Synergie und Trade-off zusammen mit Bewertungsmethoden für den Bausektor deutlich. Es konnten verschiedene Sichtweisen auf die Begriffe hervorgehoben werden. Dabei beziehen sich Autor:innen teils auf Synergie im Sinne von „*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile*“, wobei darin meist die Bewertung hinsichtlich eines Aspekts (unikriteriell) gesehen wird. Ebenso spielt der gegenteilige Fall eine Rolle, bei dem Maßnahmenkombinationen zu einem schlechteren Abschneiden als der Summe ihrer Teile führen.

Wird die Wirkung von Maßnahmen auf mehrere Kriterien (multikriteriell) betrachtet, lassen sich zwei wesentliche Gruppen unterscheiden. Multikriterielle Synergie herrscht dann vor, wenn mehrere Aspekte sich gleichzeitig verbessern. Dies ist im Bausektor jedoch nicht immer möglich, weshalb es zu Situationen kommen kann, in denen die Verbesserung einer Zieldimensionen nur bei einer Verschlechterung von anderen Zieldimensionen erreichbar ist. In diesem Fall liegt ein Trade-off bzw. Zielkonflikt vor. Davon abzugrenzen sind Konflikte, bei welchen die Umsetzung von Maßnahmen aufgrund von z. B. physischen Beschränkungen, wie etwa fehlenden Freiflächen für die Platzierung von Bäumen, nicht möglich ist.

Abbildung 2.4 fasst die identifizierten Gruppen für Synergie und Trade-off im Bausektor zusammen. Aus den vorangegangenen Erläuterungen und Darstellungen der Begriffe Synergie und Trade-off über verschiedene Anwendungsbereiche sowie den schließlich hergestellten Bezug zum Bauwesen und dem Gebäudebestand werden folgende Definition für diese Arbeit abgeleitet:

„**Synergie** bezeichnet durch systemische Interaktionen hervorgerufene Veränderungen hinsichtlich der gewählten Zielgröße(n) im Vergleich zur singulären Bewertung von Teilsystemen. Dies schließt sowohl das Abweichen von aufsummierten Wirkungen aus Maßnahmenkombinationen zu deren gesamthafter Wirkung (unikriterielle Synergie), als auch die parallele Verbesserung mehrerer Zieldimensionen (multikriterielle Synergie) ein.“

„**Trade-offs** liegen bei multikriteriellen Fragestellungen vor, in denen eine von mehreren Zielgrößen nicht weiter optimiert werden kann, ohne andere Zielgrößen zu verschlechtern. Sie repräsentieren das Pareto Prinzip und können nach dessen Grundsätzen behandelt werden.“

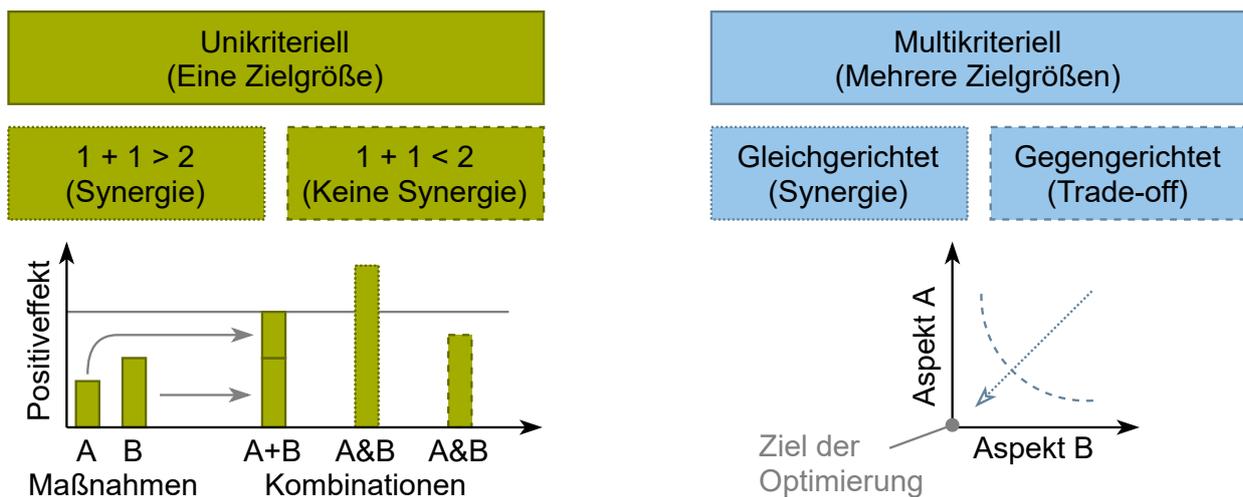


Abbildung 2.4 Unterscheidung der Begriffe Synergie und Trade-off in unikriterielle und multikriterielle Betrachtungsebene.

2.3 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus dem Kapitel Stand der Forschung und Technik:

- In der gebauten Umwelt treten eine Vielzahl an Wechselwirkungen auf, die ein komplexes Verhalten hervorrufen. Daher können Ursache und Wirkung häufig nicht unmittelbar in Zusammenhang gebracht werden, was Vereinfachungen notwendig macht.
- Wechselwirkungen treten innerhalb verschiedener Ebenen auf. Die Quartiersebene eignet sich, um Aspekte des Außenraums mit gebäudebezogenen Fragestellungen zusammen zu führen.
- Urbane Simulationsmodelle bieten eine Möglichkeit, um die Wirkung von Maßnahmen auf mehrere Zielaspekte zu quantifizieren. Dies ist jedoch häufig mit hohem Rechenaufwand verbunden. Verfahren zur multikriteriellen Optimierung können hierbei unterstützen, müssen aber für den Anwendungsfall geeignet ausgewählt werden.
- Insbesondere in frühen Planungsphasen fehlen oft Möglichkeiten, die zugrundeliegende Komplexität vereinfacht in Entscheidungsverfahren zu berücksichtigen.

Kernpunkte aus dem Kapitel Begriffsdefinition:

- Der Synergiebegriff ist stark disziplinenabhängig und bedarf einer spezifischen Definition für das Bauwesen. Trade-offs bzw. Zielkonflikte werden hingegen anhand des zugrundeliegenden Pareto Prinzips einheitlicher definiert.
- Synergie wird im Bausektor oft nur qualitativ erfasst, Quantifizierungsmöglichkeiten sind nur wenige vorhanden.
- Für den Bausektor sollte zwischen unikriterieller und multikriterieller Betrachtung von Synergie unterschieden werden.
- Unikriterielle Synergie geht der Frage nach, ob das Ganze mehr als die Summe seiner Teile werden kann, wohingegen multikriterielle Synergie eine gleichzeitige Verbesserung mehrerer Zielaspekte durch Maßnahmen anzeigt.
- Trade-offs treten ausschließlich in multikriteriellen Fragestellungen auf und spielen eine Rolle, wenn nicht alle Zielgrößen gleichzeitig optimiert werden können. Ihnen liegt das Pareto Prinzip zugrunde.

3 Methodischer Ansatz

Nach der Definition begrifflicher Grundlagen werden diese im Folgenden in quantifizierbare Indikatoren übersetzt. Deren Einführung erfolgt in Kapitel 3.1 zunächst für den Synergiebegriff. Anschließend wird in Kapitel 3.2 ein generischer Prozess beschrieben, der die Bewertung und Steuerung von Trade-offs in frühen Planungsphasen ermöglicht.

3.1 Quantifizierung von Synergie im Bauwesen

In diesem Kapitel werden die entwickelten Methoden zur Quantifizierung von Synergie im Bauwesen vorgestellt. Die Anwendung auf Gebäude- und Quartiersebene erfolgt anhand von Fallbeispielen in Kapitel 4. Aufbauend auf den in Kapitel 2.2.1 eingeführten Definitionen (sh. Seite 17) werden Bewertungsansätze für Synergieeffekte vorgestellt, die sich auf einzelne Aspekte (unikriteriell) sowie auf mehrere Zielaspekte (multikriteriell) beziehen.

3.1.1 Unikriterielle Quantifizierung von Synergie

Die Bewertungsmethode der unikriteriellen Synergie fokussiert sich auf die Identifikation von Synergiepotentialen im Gebäudebestand, da dieser einen entscheidenden Hebel für die nachhaltige Transformation der gebauten Umwelt darstellt (sh. Kapitel 1.1, Seite 1). Dazu wird ein Vergleich mit der betrachteten Ausgangssituation herangezogen. Zunächst ist dafür eine Zustandsbewertung des bestehenden Gebäudes bzw. Quartiers erforderlich. Für den gewählten Fokus auf lebenszyklusbasierte THG-Emissionen bedeutet dies, dass diese für die Instandhaltung und den weiteren Betrieb von Bestandsgebäuden bzw. Bestandsquartieren ermittelt werden müssen. Für die anschließende Untersuchung von Modifikationsmöglichkeiten und deren Kombinationen wurden in Kapitel 2.1.3 (sh. Seite 13) parametrische Gebäudesimulationen als geeignet identifiziert. Im Gegensatz zu Optimierungsmethoden erlaubt dieser Ansatz eine vollständige Evaluierung der möglichen Konfigurationen anhand ausgewählter diskreter Parameter [93]. Das Vorgehen ist allerdings mit einem hohen Rechenaufwand verbunden.

Zur Quantifizierung der Wirkungsabweichungen des Gesamtsystems gegenüber der Summe seiner Einzelmaßnahmen wird der in Kapitel 2.2 eingeführte Begriff der unikriteriellen Synergie (S_{uni} , [Einheit = Prozent]) als Grundlage verwendet (sh. Seite 17). Dessen mathematische Umsetzung gibt den Beitrag einer Maßnahmenkombination zur Verbesserung eines Zielwertes an. Die Kennzahl S_{uni} ist entsprechend der geläufigen Einordnung von Synergie als „*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile*“ zu interpretieren. Die Bewertung im Rahmen dieser Dissertation erfolgt im Verhältnis zum absoluten Ergebnis des Bestandes. Dadurch werden irreführende Interpretationen bei geringen Abweichungen vermieden. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn Maßnahmen nur zu vernachlässigbaren Einsparungen führen. Das prozentuale Verhältnis zur Maßnahmenkombination könnte dann bereits auf Grund von Modellunsicherheiten sehr hoch ausfallen. Der Bezug zum Ergebnis des Ausgangsfalls verhindert solche Konstellationen und ermöglicht gleichzeitig Rückschlüsse auf die absolute Relevanz der Einsparung.

Die Formel zur Berechnung der unikriteriellen Synergie wird in dieser Dissertation wie folgt definiert:

$$S_{uni} = \frac{\Delta W_{M_i+M_{i+1}} - (\Delta W_{M_i} + \Delta W_{M_{i+1}})}{W_{Basis}} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

mit	S_{uni}	Unikriterielle Synergie [%]
	ΔW_{M_i}	Änderung der Wirkung bzw. Zielgröße durch Maßnahme M_i
	$\Delta W_{M_{i+1}}$	Änderung der Wirkung bzw. Zielgröße durch Maßnahme M_{i+1}
	$\Delta W_{M_i+M_{i+1}}$	Änderung der Wirkung bzw. Zielgröße durch Kombination von M_i und M_{i+1}
	W_{Basis}	Absoluter Bezugswert (Basisfall)
	i	Index der betrachteten Maßnahme

S_{uni} bezieht sich dabei stets auf ein zu untersuchendes Szenario, das die Kombination verschiedenster Maßnahmen umfassen kann. Die Sanierung eines Gebäudes ist ein mögliches Beispiel für ein solches Szenario. Die Dämmung der Außenwände und ein Fensteraustausch könnten in diesem Szenario als Maßnahmen angewandt und ihr synergetisches Wirken mithilfe von S_{uni} bewertet werden. Bei der Anwendung von Formel 3.1 ist darauf zu achten, dass die numerischen Werte der Änderungen so gewählt werden, dass eine Zunahme die Verbesserung der Zielgröße widerspiegelt. Beispielsweise impliziert eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs eine Verschlechterung und ist demnach anzupassen. In diesem Fall könnte die Reduktion von Heizwärmebedarf herangezogen werden. Damit würde eine höhere Reduktion die positive Entwicklung des Zielwerts ausdrücken.

Zur Veranschaulichung der Berechnung dient das fiktive Beispiel eines Gebäudes mit einem Heizwärmebedarf von $120 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$. Die Wirkung von zwei Maßnahmen wird zunächst unabhängig voneinander untersucht und ergibt Einsparungen von 10 bzw. $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$. Die gleichzeitige Anwendung beider Maßnahmen führt zu einer Gesamtreduktion des Heizwärmebedarfes um $30 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$. Eingesetzt in Formel 3.1 ergibt sich:

$$S_{uni} = \frac{30 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a} - (10 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a} + 15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a})}{120 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}} \cdot 100 \%$$

$$S_{uni} = 4,2 \%$$

Das Ergebnis kann folgendermaßen interpretiert werden: Werden beide Maßnahmen gemeinsam durchgeführt, ist eine Einsparung von weiteren 4,2% des Heizwärmebedarfs gegenüber der Einzelanwendung erzielbar.

3.1.2 Multikriterielle Quantifizierung von Synergie

Die multikriterielle Synergiebewertung dient insbesondere der Identifikation von Maßnahmen, die in allen betrachteten Zielaspekten zu einer Verbesserung führen. Dadurch können diese Verbesserungen über verschiedene Bereiche des nachhaltigen Bauens hinweg einbezogen werden. Im Gegensatz zur unikriteriellen Bewertung finden daher Veränderungen in mehreren Zielindikatoren Berücksichtigung. Dies führt zur Problematik der Vergleichbarkeit. Da die Gewichtung einzelner Kennzahlen nicht Ziel dieser Arbeit ist (sh. Kapitel 2.2.2, Seite 20), wird hierfür der Ansatz einer Normierung ohne Gewichtung gewählt. Dadurch fließen alle Aspekte gleichermaßen in die Abwägung ein. Die multikriterielle Synergie (S_{multi} , [dimensionslos]) wird in folgenden Schritten ermittelt:

1. Berechnung der absoluten Differenzen zum unveränderten Ausgangsfall je Zielindikator. Den Ausgangsfall kann sowohl eine Bestandssituation als auch ein gesetzlicher oder projektspezifischer Mindeststandard darstellen.
2. Ausschluss von Kombinationen, mit negativer Auswirkung auf einen der Zielindikatoren.
3. Normierung der Differenzen je Zielindikator auf einen Wertebereich zwischen null und eins.
4. Aufsummierung der normierten Differenzen.

Das Vorgehen zur multikriteriellen Synergiebewertung unterscheidet sich von konventionellen Kosten-Nutzen Analysen durch den Fokus auf Verbesserungen anstelle des absoluten Abschneidens. Während in Kosten-Nutzen Analysen meist positive und negative Auswirkungen einbezogen werden (sh. Kapitel 2.2.2, Seite 20), konzentriert sich die hier verwendete Berechnungsmethode auf die Identifikation von Maßnahmen, die positive Veränderungen in allen Aspekten bewirken. Diese Ausrichtung ermöglicht eine gezielte Betrachtung von Szenarien mit umfassenden Verbesserungen, ohne dabei Szenarien mit potentiellen Nachteilen in die Gesamtbewertung einzubeziehen. Diese Herangehensweise ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt des Bauens mit einem positiven Fußabdruck relevant. Dabei besteht eines der Hauptziele in der Generierung positiver Effekte in mehreren Nachhaltigkeitsaspekten, ohne dabei potentielle Verschlechterungen der bestehenden Situation in einzelnen Bereichen hervorzurufen.

Die Formel zur Berechnung der multikriteriellen Synergie wird in dieser Dissertation wie folgt definiert:

$$S_{multi} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta W_{K_i}^+ - \Delta W_{K_{i,min}}^+}{\Delta W_{K_{i,max}}^+ - \Delta W_{K_{i,min}}^+} \right) \quad (3.2)$$

mit	S_{multi}	Multikriterielle Synergie [-]
	$\Delta W_{K_i}^+$	Positive Wirkung auf Kriterium K_i
	$\Delta W_{K_{i,max}}^+$	Maximale Wirkungsverbesserung in Kriterium K_i
	$\Delta W_{K_{i,min}}^+$	Minimale Wirkungsverbesserung in Kriterium K_i
	i	Index des betrachteten Kriteriums
	n	Anzahl einbezogener Kriterien

Als Beispiel wird das fiktive Gebäude aus dem vorangegangenen Kapitel um den Aspekt der sommerlichen Überhitzung erweitert. Als Ausgangsfall werden 800 Übergradtemperaturstunden (Einheit Kelvin Stunden, Kh) angenommen sowie ein Heizwärmebedarf von 120 kWh/m²·a. Drei Szenarien führen zu neuen Werten von 750 Kh und 100 kWh/m²·a, 700 Kh und 110 kWh/m²·a sowie 715 Kh und 105 kWh/m²·a. Es können alle drei Szenarien in die Bewertung einbezogen werden, da sie jeweils zu einer Verbesserung in beiden betrachteten Aspekten führen.

Damit liegen folgende maximale ($\Delta W_{K_i,max}^+$) bzw. minimale ($\Delta W_{K_i,min}^+$) Verbesserungen vor:

$$\begin{aligned} \Delta W_{K1,max}^+ &= 800 \text{ Kh} - 700 \text{ Kh} &= 100 \text{ Kh} \\ \Delta W_{K2,max}^+ &= 120 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 100 \text{ kWh/m}^2 \cdot a &= 20 \text{ kWh/m}^2 \cdot a \\ \Delta W_{K1,min}^+ &= 800 \text{ Kh} - 750 \text{ Kh} &= 50 \text{ Kh} \\ \Delta W_{K2,min}^+ &= 120 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 110 \text{ kWh/m}^2 \cdot a &= 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a \end{aligned}$$

Eingesetzt in Formel 3.2 ergibt sich für das erste Szenario:

$$\begin{aligned} S_{multi} &= \frac{(800 \text{ Kh} - 750 \text{ Kh}) - 50 \text{ Kh}}{100 \text{ Kh} - 50 \text{ Kh}} + \frac{(120 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 100 \text{ kWh/m}^2 \cdot a) - 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a}{20 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a} \\ S_{multi} &= 0 + 1 = 1 \end{aligned}$$

Für die zweite Szenario ergibt sich:

$$\begin{aligned} S_{multi} &= \frac{(800 \text{ Kh} - 700 \text{ Kh}) - 50 \text{ Kh}}{100 \text{ Kh} - 50 \text{ Kh}} + \frac{(120 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 110 \text{ kWh/m}^2 \cdot a) - 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a}{20 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a} \\ S_{multi} &= 1 + 0 = 1 \end{aligned}$$

Für die dritte Szenario ergibt sich:

$$\begin{aligned} S_{multi} &= \frac{(800 \text{ Kh} - 715 \text{ Kh}) - 50 \text{ Kh}}{100 \text{ Kh} - 50 \text{ Kh}} + \frac{(120 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 105 \text{ kWh/m}^2 \cdot a) - 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a}{20 \text{ kWh/m}^2 \cdot a - 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot a} \\ S_{multi} &= 0,7 + 0,5 = 1,2 \end{aligned}$$

Demnach sollte in diesem fiktiven Beispiel das dritte Szenario bevorzugt werden, da es innerhalb der Bewertungsparameter zu einer insgesamt größeren Verbesserung führt als die Szenarien eins und zwei.

3.2 Prozess zur multikriteriell optimierten Quartiersentwicklung

Dieses Kapitel führt den generischen Prozess zur Ableitung von multikriterieller Entscheidungsunterstützung in der Quartiersplanung (*Urban Systems Exploration*) ein. Die in Kapitel 2.1.5 beschriebene Hyper Space Exploration bildet hierfür das methodische Rahmenwerk [79] (sh. Seite 16). Die Vielzahl konkurrierender Ziele und hochdimensionale Entscheidungsräume stellen eine große Herausforderung für Stadtplaner:innen dar. Rechenintensive Simulationsmodelle unterstützen sie zwar in der Gegenüberstellung von Szenarien im Hinblick auf einzelne Nachhaltigkeitsaspekte, eine ganzheitliche Entscheidungshilfe lässt sich aus solchen Modellen jedoch kaum ableiten. Daher wird ein methodischer Ansatz zur Erstellung und multikriteriellen Optimierung von vernetzten urbanen Simulationsmodellen und der anschließenden Ableitung von vereinfachten Entscheidungshilfen benötigt. Der Prozess der *Urban Systems Exploration* trägt dazu bei, diese Lücke zu schließen, indem er aufzeigt, welche Schritte unternommen werden müssen und wie diese miteinander zu verknüpfen sind. Der generische Prozess wurde im Rahmen eines Peer-Review Journal Artikels veröffentlicht [134]. Abbildung 3.1 fasst die wichtigsten Bestandteile dieses Prozesses zusammen: Datenakquise, Aufbau des Simulationsmodells, Trade-off-Analyse und multikriterielle Entscheidungsunterstützung.

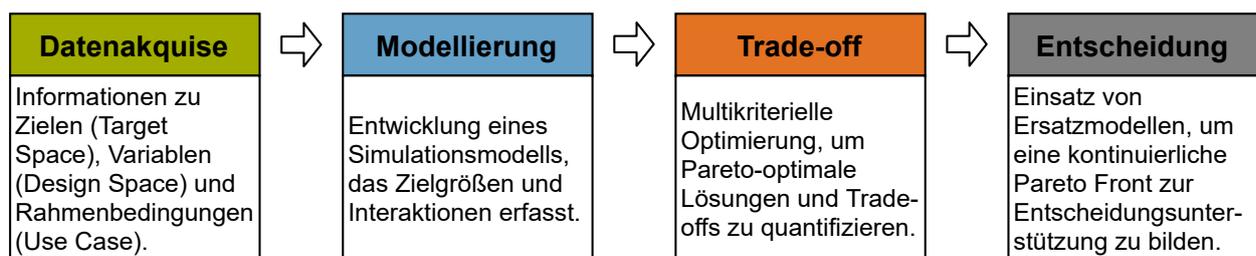


Abbildung 3.1 Grundprozess zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung (*Urban Systems Exploration*).

Dieser Prozess ist sowohl für Neuentwicklungen als auch für die Umgestaltung bestehender Quartiere anwendbar. Er kann in der derzeitigen Stadtplanungspraxis eingesetzt werden, um einen Überblick über die Spannweite optimaler Ergebnisse zu geben und damit eine disziplinenübergreifende Diskussionsgrundlage für Entscheidungen schaffen. Der Einsatz in Projekten sollte möglichst frühzeitig erfolgen. Simulationsmodelle, die speziell für diese frühen Phasen entwickelt wurden, können trotz der begrenzten Informationen zu einer initialen Bewertung der vorherrschenden Trade-offs beitragen. Darüber hinaus erhöht die wiederholte Anwendung des Prozesses die Belastbarkeit der Ergebnisse und Unsicherheiten können im Laufe eines Vorhabens reduziert werden. Abbildung 3.2 zeigt die im Rahmen dieser Dissertation definierten Schritte der *Urban Systems Exploration*. Darüber hinaus finden sich dort Beispiele für Methoden und Werkzeuge, die zur Umsetzung des Prozesses verwendet werden können. Das Vorgehen wird im Folgenden für jeden der zehn Einzelschritte im Detail erläutert.

(1) *Zieldefinition*: Die angestrebten Ziele des Vorhabens werden definiert und über Zielindikatoren messbar gemacht, die damit den sogenannten Target Space aufspannen. Sie können eine Vielzahl von Aspekten aus den Bereichen der Ökologie, der Ökonomie und des Sozialwesens umfassen. Um eine mathematische Optimierung zu ermöglichen, müssen alle definierten Ziele quantifizierbar sein. Dazu werden entsprechende Key Performance Indicators (KPIs), welche die jeweiligen Ziele repräsentieren,

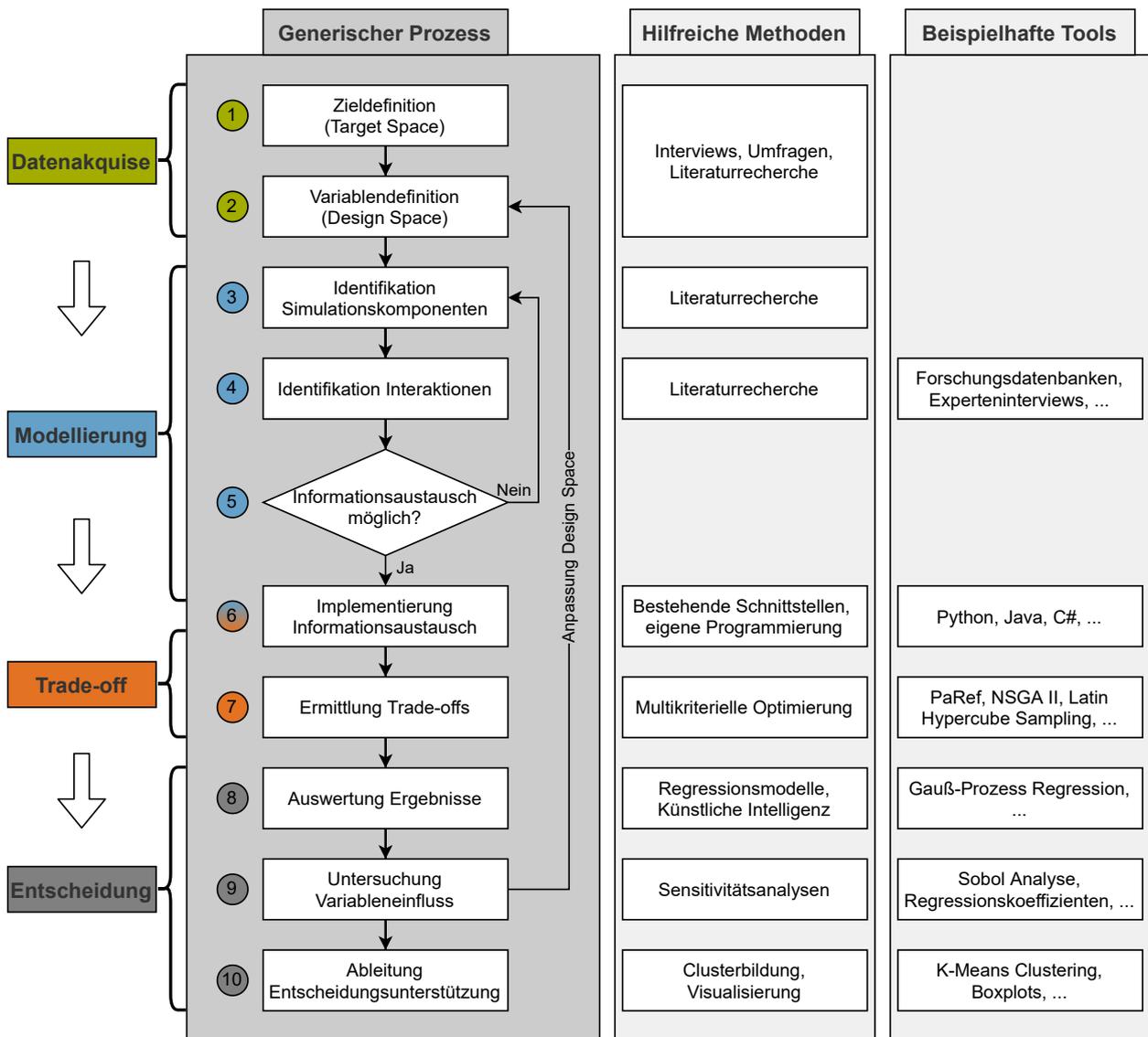


Abbildung 3.2 Prozesskette zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung (*Urban Systems Exploration*).

ausgewählt. Diese gewährleisten ein messbares Ergebnis des Designprozesses. Ein beispielhafter Ansatz zur Ableitung dieser Ziele und zugehöriger KPIs ist der öffentliche Diskurs und die Orientierung der Auswahl an den veröffentlichten politischen Absichten für die zukünftige Quartiers- bzw. Stadtentwicklung.

(2) *Variablendefinition*: Die Definition der möglichen Interventionen (auch Modifikationen oder bauliche Maßnahmen) hängt vom Kontext des Projektes ab und davon, ob es sich um eine Neu- oder Bestandentwicklung handelt. Im Neubaubereich sind dabei beispielsweise Geometrien und Freiflächen von Bedeutung, während im Bestand Variablen wie Nachverdichtung und Sanierung eine wichtige Rolle spielen. Nachdem die relevanten Interventionen definiert sind, werden diesen Randbedingungen zugeordnet. Die Randbedingungen können Bandbreiten für einzelne Variablen oder Einschränkungen beinhalten. Beispielsweise kann die Bebauungsdichte durch Vorschriften begrenzt sein und daher einen bestimmten Bereich nicht überschreiten. Eine Diskussion innerhalb der Projektgruppe oder frühere Erfahrungen sind mögliche Wege, zutreffende Wertebereiche einzugrenzen. Die Interventionen und ihre möglichen Ausprägungen bilden den Design Space des Projekts. Wenn die Relevanz einzelner Wertebereiche unklar ist, können sie dennoch in einer ersten Untersuchung berücksichtigt werden, da der spätere Optimierungsprozess ihren Einfluss und die mit dieser Auswahl verbundenen Trade-offs aufzeigt. Darauf aufbauend können weitere Prozessiterationen mit eingeschränkten Wertebereichen erfolgen.

(3) *Identifikation der Simulationskomponenten*: Nach der Definition des Variablen- und des Zielraums müssen Simulationskomponenten (z. B. Energiesimulation, Außenraumsimulation) identifiziert werden, welche die Zielgrößen aus Schritt (1) und die Interventionen aus Schritt (2) integrieren. Der beschriebene Prozess ist auch für rechenintensive Simulationsmodelle einsetzbar. Dies ermöglicht es den Nutzer:innen aus einer Vielzahl von Simulationskomponenten des jeweiligen Fachbereichs zu wählen, da die Auswahl nicht auf ressourcenarme Simulationen beschränkt ist, wie es bei vielen MOO Anwendungen der Fall ist.

(4) *Identifikation von Interaktionen*: Während jede der Simulationskomponenten in der Lage ist, den KPI zu ermitteln, für den sie ausgewählt wurde, gewährleistet dieser Schritt eine systemische Betrachtung der gebauten Umwelt. Dies bedeutet, dass aus den gewählten Einzelkomponenten ein vernetztes Gesamtmodell entsteht, welches zur weiteren Trade-off Analyse genutzt werden kann. Dafür müssen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten identifiziert werden. In diesem Zusammenhang werden zwei Arten von Wechselwirkungen unterschieden. Einerseits können die Ergebnisse eines Berechnungsschrittes als Eingangsgrößen für eine anschließende Simulationskomponente dienen. Andererseits können sich mehrere Berechnungsschritte auf dieselben Eingangswerte beziehen. Darüber hinaus sollte der Einfluss von Wechselwirkungen innerhalb des Modells kritisch hinterfragt werden, um eine gute Balance zwischen Rechenressourcen und Genauigkeit aufrecht zu erhalten. Literaturrecherchen oder Expert:inneninterviews zu einer bestimmten Wechselwirkung unterstützen diesen Schritt. Der Ausschluss bekannter Wechselwirkungen sollte allerdings nicht nur anhand der Literatur, sondern auch mittels eigener Sensitivitätsanalysen (sh. Schritt (9)) erfolgen. Andernfalls besteht die Gefahr, wichtige interaktive Effekte zu vernachlässigen, da sich das Systemverhalten stark von der individuellen Betrachtung einzelner Teilsysteme unterscheiden kann (sh. Kapitel 2.1.2, Seite 9).

(5) *Überprüfung des Informationsaustausches*: Da die Methoden zur Ermittlung der identifizierten KPIs je nach Modelltyp (physikalische Simulation, Modelle auf Basis künstlicher Intelligenz, stochastische Vorhersagen) unterschiedlich sind, müssen praktikable Möglichkeiten zur technischen Implementierung der identifizierten Wechselwirkungen in das Gesamtmodell sichergestellt werden. Dies ist für alle in Schritt (4) erkannten und als relevant bewerteten Interaktionen zu überprüfen. Verbleiben isolierte Einzelkomponenten, die keine Verbindung zum Gesamtmodell haben, müssen alternative Berechnungsmethoden für den jeweiligen Zielaspekt gefunden werden. Sofern ein Informationsaustausch technisch nicht möglich ist, beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Programmiersprachen oder fehlender Import-/Exportfunktionen, kann eine alternative Simulationskomponente gewählt oder eine manuelle Schnittstelle implementiert werden (sh. Schritt (6)).

(6) *Implementierung Informationsaustausch*: Für die Implementierung des Informationsaustausches zwischen den Simulationskomponenten sollte möglichst eine einzige Plattform zum Einsatz kommen, an die alle als notwendig identifizierten Bestandteile angebunden werden können. Dies kann eine bestehende Softwareumgebung wie Grasshopper [135] sein, auf der mehrere Simulations-Plug-Ins kombinierbar sind. Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine eigene Methodik für diesen Informationsaustausch zu entwickeln, die auf Programmiersprachen wie Python basiert. Letztendlich führt dieser Schritt zu einem simulationsfähigen und vernetzten Quartiersmodell, das für die nachfolgende Trade-off Analyse verwendet werden kann. Neben dem Datenaustausch zwischen Simulationskomponenten muss unter Umständen eine Schnittstelle zum Informationsaustausch mit der Optimierungsumgebung (sh. Schritt (7)) hergestellt werden.

(7) *Ermittlung der Trade-offs*: Da die theoretische Bestimmung von Pareto Lösungen nur eingeschränkt möglich ist [136], muss für diesen Schritt ein MOO Algorithmus ausgewählt und auf das Modell angewandt werden. Dieser MOO Algorithmus muss effektiv sein, indem er Lösungen identifiziert, die einen Pareto-optimalen Kompromiss darstellen. Er muss zudem effizient sein, indem er nur geringe Rechenressourcen benötigt und dadurch eine umfangreiche Suche nach Pareto Lösungen erlaubt. Nach der Auswahl eines geeigneten Algorithmus wird dieser mit dem Simulationsmodell gekoppelt. Einige Algorithmen bieten vorgefertigte Schnittstellen an, in anderen Fällen müssen Nutzer:innen eine eigene Austauschmethode zwischen MOO und Simulationsmodell entwickeln. Nach Durchführung der Optimierung ist eine erste Analyse der vorliegenden Trade-offs und von deren Abhängigkeiten durchführbar. Dies kann bereits in der Entscheidungsfindung hilfreich sein und das Vorgehen für die weiteren Untersuchungen leiten.

(8) *Auswertung der Ergebnisse*: Um eine detaillierte Analyse der resultierenden Trade-offs zu erreichen, werden die Einzelergebnisse aus der Optimierung mit Hilfe eines Ersatzmodells in einen kontinuierlichen Wertebereich übertragen. Ersatzmodelle erlauben eine umfangreiche Auswertung der abgebildeten Zielfunktion mit geringen Rechenressourcen. Dies ermöglicht die Umsetzung interaktiver Designprozesse. Zudem sind mithilfe von Ersatzmodellen nicht nur einzelne Pareto Lösungen, sondern die vollständige PF bestimmbar. Dies verbessert die Darstellung des bestmöglichen Entscheidungsraums und dient als Grundlage für die folgenden Schritte. Dafür werden die generierten Simulationsergebnisse und die entsprechenden Inputs aus dem Design Space verwendet. Da die Anzahl der verfügbaren Trainingspunkte die Qualität der Ersatzmodellbildung begrenzt, stellt die Gauß-Prozess Regression (GPR) ein mögliches Werkzeug für diesen Schritt dar. Die GPR ist ein flexibler Model-

lierungsansatz, der sich empirisch als geeignete Wahl für Regressionsprobleme mit wenigen Daten erwiesen hat [96, 137]. Durch die Verwendung von GPR kann der gesamte Zielraum, einschließlich der PF, abgedeckt werden. Darüber hinaus sind GPR Ersatzmodelle für die anschließende multikriterielle Entscheidungsfindung von Vorteil, da sie die Unsicherheit jeder Modellvorhersage ausgeben. Für die Abbildung der Zielfunktion stellt die GPR nur ein mögliches Beispiel dar und es können abhängig vom Anwendungskontext auch andere Methoden verwendet werden. In diesem Schritt muss zudem die Validität des Modelltrainings sichergestellt werden, da ein ungenaues Training des Ersatzmodells im nächsten Schritt zu fehlerhaften Ergebnissen und damit zu falschen Schlussfolgerungen in der Entscheidungsunterstützung führen würde.

(9) *Untersuchung des Variableneinflusses*: Durch die Bestimmung des Einflusses der Input Variablen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden zwei wesentliche Aspekte abgedeckt. Zum einen kann die Anzahl der Designvariablen aus Schritt (2) verringert werden. Diese Modellreduktion führt zu einem geringeren Rechenaufwand und einer effizienteren Nutzung des Optimierungsprozesses. Es ist jedoch zu beachten, dass wenig sensitive Parameter immer noch wertvolle Informationen über ihre Wertebereiche liefern können. Hierfür sollte zudem die statistische Relevanz der Parameter untersucht werden. Niedrige Sensitivitäten zeigen an, dass Änderungen dieser Variablen nur zu geringen Unsicherheiten in den Ergebnissen führen und ihr Wert auf einen kleinen Bereich begrenzt werden kann. Zum anderen sind Parameter mit hoher Sensitivität gut zur Steuerung der betrachteten Trade-offs geeignet. Ihr Einfluss sollte daher weiter evaluiert werden. Dies ist besonders bei Planungsaufgaben mit zahlreichen Variablen nützlich, da in solchen Fällen nur eine begrenzte Anzahl von Eingaben visualisiert und diskutiert werden kann. Die Untersuchung des Einflusses durch eine Sensitivitätsanalyse impliziert in diesem Zusammenhang, auf welche Variablen sich Planende konzentrieren sollten.

(10) *Ableitung von Entscheidungsunterstützung*: Im letzten Schritt wird die Entscheidungsunterstützung sowohl aus den unmittelbaren Ergebnissen der multikriteriellen Optimierung (Schritt (7)) als auch aus dem erzeugten Ersatzmodell (Schritt (8)) abgeleitet. Eine Möglichkeit, die Ergebnisse einfach zugänglich zu machen, besteht darin, ähnlich charakterisierte Bereiche der Pareto-optimalen Lösungen zu gruppieren und die entsprechenden Variablenwerte je Gruppe auszugeben. Durch eine gleichmäßige Verteilung der Pareto Punkte ermöglichen daraus hervorgehende Verteilungsplots Einblicke in die Steuerung von Kompromissen durch die Wahl bestimmter Eingabekombinationen. Sie zeigen zudem an, innerhalb welcher Spannweiten die Eingabewerte liegen sollten, um einen bestimmten Trade-off anzusteuern. Methodisch können hierfür gängige Clusteringverfahren wie etwa K-Means Clustering verwendet werden.

3.3 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus dem Kapitel Methodischer Ansatz zur Bewertung von Synergien:

- Das Kapitel führt Kennzahlen zur Bewertung von Synergieeffekten durch Maßnahmen an Gebäuden und Quartieren ein. Neben der Suche nach synergetisch wirkenden Maßnahmen sind Trade-offs eine große Herausforderung in der Stadtplanung. Es wird daher zusätzlich ein generischer Prozess (*Urban Systems Exploration*) aufgezeigt, um sie zu untersuchen und für die Entscheidungsfindung zugänglich zu machen.
- Für Synergie im Sinne von „*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile*“ wird die Kennzahl der unikriteriellen Synergie (S_{uni}) eingeführt. Diese zeigt die prozentuale Veränderung eines Zielwerts durch Wechselwirkungen im Vergleich zum Bestand oder gesetzlichen Vorgaben an.
- Die parallele Verbesserung mehrerer Zielwerte wird als multikriterielle Synergie (S_{multi}) eingeführt. Sie betrachtet nur Varianten, die zu einer Verbesserung in allen Aspekten führen, um dem Ziel des positiven Bauens gerecht zu werden. Die Abwägung unter diesen Varianten erfolgt durch Normierung und Aufsummierung der definierten Kennzahlen.

Kernpunkte aus dem Kapitel Methodischer Ansatz zur Bewertung von Trade-offs:

- Der vorgeschlagene Prozess zur Untersuchung von Trade-offs in der Quartiersentwicklung (*Urban Systems Exploration*) besteht aus vier wesentlichen Schritten: Datenakquise, Aufbau des Simulationsmodells, Trade-off Analyse und multikriterielle Entscheidungsunterstützung.
- Die Datenakquise legt Zielwerte und Input-Variablen mit zugehörigen Wertebereichen fest.
- Der Aufbau des Simulationsmodells fokussiert sich insbesondere auf die Erfassung von Wechselwirkungen und den dafür erforderlichen Informationsaustausch.
- Die Trade-off Analyse nutzt Verfahren zur multikriteriellen Optimierung, um Pareto-optimale Lösungen zu ermitteln.
- Zur Entscheidungsunterstützung werden Sensitivitätsanalysen und Ersatzmodelle herangezogen.

4 Anwendung in Fallstudien

Im Folgenden werden die in Kapitel 3 beschriebenen Bewertungsmethoden beispielhaft in zwei Fallstudien angewandt. Dafür erfolgt zunächst die Festlegung von Bewertungskriterien sowie allgemeinen Randbedingungen in Kapitel 4.1. Anschließend werden die Simulationsmodelle und die Ergebnisse der Bewertung von Synergie auf Gebäude- und Quartiersebene dargelegt (sh. Kapitel 4.2 bzw. 4.3). Schließlich erfolgt die Untersuchung von Trade-offs und deren Steuerungsmöglichkeiten auf Quartiers-ebene anhand des entwickelten Prozesses zur *Urban Systems Exploration* in Kapitel 4.4.

4.1 Bewertungskriterien und allgemeine Randbedingungen

Der Gebäudebestand stellt einen entscheidenden Hebel für die nachhaltige Transformation der gebauten Umwelt dar. Im Folgenden werden daher insbesondere Bestandsstrukturen und damit verbundene Eingriffe betrachtet. Dazu zählen beispielsweise Sanierung und Nachverdichtung. Der Fokus dieses Kapitels liegt zunächst auf der Bewertung interaktiver Effekte auf die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen von Gebäuden, um die erste Forschungshypothese zu überprüfen. Eine derartige Spezialisierung sollte nicht dazu führen, dass soziale und ökonomische Abhängigkeiten vernachlässigt werden [37]. Da die dafür relevanten Aspekte in ihrer Umfänglichkeit kaum in einem einzigen Simulationsmodell erfassbar sind, fokussieren sich die Fallstudien exemplarisch auf die methodische Integration ausgewählter Teilbereiche sowie deren Vernetzung. Zudem ist die Wahl konkreter Bewertungsindikatoren stark vom Quartierskontext abhängig [100]. Für den ökologischen Aspekt wird im Folgenden das Kriterium der lebenszyklusbasierten THG-Emissionen gewählt. Der ökonomische Aspekt wird durch die Bewertung der Lebenszykluskosten abgedeckt. Als soziales Kriterium wird der thermische Außenraumkomfort in die Untersuchung einbezogen. Diese drei Kennwerte dienen im Rahmen der Fallstudien zur Bewertung von multikriteriell optimierten Lösungsalternativen und damit zur Überprüfung der zweiten und dritten Forschungshypothese. In der Ergebnisauswertung werden zudem szenarienspezifische KPIs für weitere Aspekte dargestellt. Hierzu zählen unter anderem der thermische Innenraumkomfort, die grauen THG-Emissionen sowie die Heiz- und Kühlenergiebedarfe. Tabelle 4.1 ordnet den Aspekten die jeweils herangezogenen KPIs und deren Definition zu. Die verwendeten KPIs ermöglichen eine vollständig quantitative Betrachtung im Rahmen der vorliegenden Dissertation. Dies ist insbesondere für die geplante Anwendung von Optimierungsverfahren notwendig. Hierfür müssen alle qualitative Ziele in quantitative Werte übersetzt werden. Bei dieser Übersetzung besteht die Herausforderung darin, subjektive Einschätzungen in objektive Zielwerte zu übertragen und festzulegen, welche Ausprägung als bestmöglich eingeordnet wird. Da die vorliegende Dissertation ausschließlich quantitative KPIs anwendet, wird die Integration qualitativer Kriterien im Ausblick (sh. Kapitel 7) erneut aufgegriffen. Alle im Folgenden untersuchten Fallstudien beziehen sich auf den Standort München. Entsprechende Wetterdaten werden für die Station Flughafen München aus der Meteororm Datenbank bezogen [138]. Als Basis für den Aufbau der Simulationsmodelle wird die visuelle Programmierumgebung Grasshopper innerhalb der Modelliersoftware Rhinoceros 3D (Version 7) verwendet [135]. Diese bietet neben den gängigen Funktionen von CAD-Software eine Einbindung zahlreicher Simulationskerne (Plug-Ins). Tabelle 4.2 stellt die für den Aufbau der Simulationsmodelle eingesetzten Plug-Ins zusammen.

Tabelle 4.1 Zielaspekte und Zielgrößen (KPIs) zur Untersuchung von Wechselwirkungen in der gebauten Umwelt.

Zielaspekt	KPI und Erläuterung	Einheit
Thermischer Außenraumkomfort	Universal Thermal Climate Index (UTCI) [139] Empfundene Temperatur im Außenraum unter Berücksichtigung von u. a. Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte sowie Wind.	°C
Thermischer Innenraumkomfort	Anzahl der Jahresstunden mit einem Predicted Mean Vote (PMV) über 1 (leicht zu warm) im Innenraum.	Stunden
Heizwärmebedarf	Zur Gebäudebeheizung erforderliche Energiemenge.	kWh/m ² ·a
Kühlenergiebedarf	Zur Gebäudekühlung erforderliche Energiemenge.	kWh/m ² ·a
Lebenszyklusbasierte THG-Emissionen	Ökologische Lebenszyklusanalyse zur Bewertung von Herstellung, Betrieb und End-of-Life von Gebäuden.	kg CO ₂ -Äq./m ² ·a
Lebenszykluskosten	Ökonomische Lebenszyklusanalyse zur Bewertung von Herstellung, Betrieb und End-of-Life von Gebäuden.	€/m ²

Tabelle 4.2 Zum Aufbau der Simulationsmodelle eingesetzte Grasshopper Plug-Ins.

Software	Funktionen	Version
Energy Plus	Frei verfügbarer Simulationskern für Energiemodelle, bereitgestellt vom US-amerikanischen Energieministerium.	22.1.0 [140]
Ladybug Tools Honeybee	Ermöglicht die Erstellung von parametrisierten Energiemodellen und deren Ausführung in Energy Plus.	1.6.43 [141]
Ladybug Tools Urban Weather	Beaufschlagt Wetterdatensätze mit dem Urban Heat Island (UHI) Effekt, basierend auf Geometrie sowie Grünflächen.	4 [142]
Ladybug Tools Ladybug	Berechnung von thermischem Außenraumkomfort in Form des UTCI.	1.6.43 [141]
Climate Studio	Standortspezifische Simulation von PV-Anlagen und Energiespeichern auf Stundenbasis.	1.9 [143]
GH Wind	Simulation der Windverhältnisse basierend auf Fast Fluid Dynamics (FFD).	V2 [144]
TT Toolbox Colibri	Parametrisierung von Simulationsmodellen und automatisierte Erfassung der Ergebnisse.	2.0.0 [145]

4.2 Bewertung von Synergien auf Gebäudeebene

Um festzustellen, auf welcher Ebene Synergien besonders relevant sind, wird zunächst die Gebäudeebene untersucht. Dazu wird ein generisches Untersuchungsgebäude erstellt und parametrisiert. In die Parametrisierung fließen Informationen zum Gebäudebestand sowie zu den möglichen Sanierungs- und Erweiterungsmaßnahmen ein. Anschließend erfolgen Energieberechnungen und LCA, welche anhand der in Kapitel 3.1 beschriebenen Bewertungsmethode hinsichtlich ihres Synergiepotentials ausgewertet werden (sh. Seite 25). Die Vorgehensweise ist zusammenfassend in Abbildung 4.1 dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert.

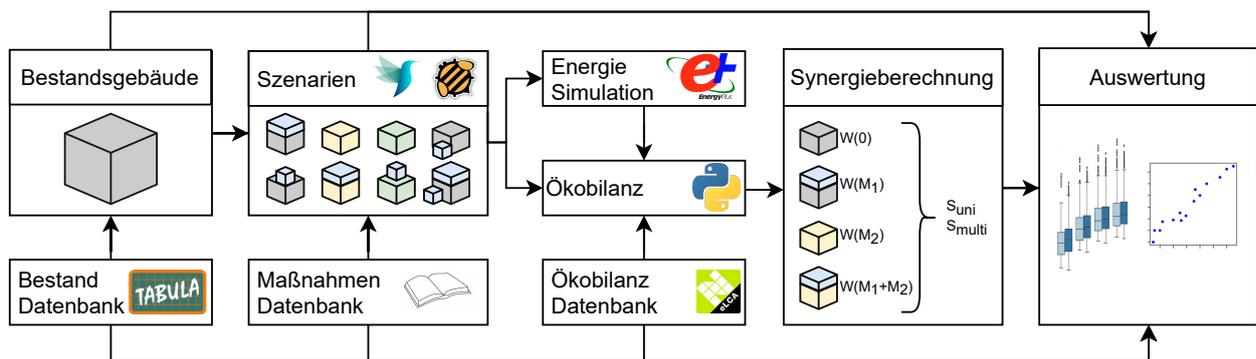


Abbildung 4.1 Methode zur Ermittlung der Synergiekennzahlen auf Gebäudeebene durch parametrische Energiesimulation und Ökobilanzierung.

4.2.1 Betrachtete Szenarien und Datengrundlagen

Die Anwendung auf Gebäudeebene erfolgt anhand einer generischen Zeilenbebauung am Standort München. Diese Siedlungsart stellt deutschlandweit eine der am häufigsten vorkommenden Siedlungstypologien dar und bietet daher ein hohes Potential zur Übertragbarkeit [146]. Als geometrischer Grundkörper wird ein Quader mit einer Länge von 35 m, einer Breite von 10 m und einer Höhe von 8 m verwendet. Das dadurch generierte Gebäude erstreckt sich über drei Stockwerke und weist im Bestand eine Bruttogrundfläche (BGF) von 1.050 m² auf. Es wird im Folgenden mit einer Vielzahl von Szenarien zu energetischen Eigenschaften, Materialien und Nachverdichtungsmaßnahmen kombiniert.

Zunächst müssen die zu untersuchenden Basisvarianten für das Bestandsgebäude definiert werden. Um eine möglichst übertragbare Auswertung sicher zu stellen, wird ein auf Gebäude- und Quartierstypologien basierender Ansatz verfolgt. Röck et al. stellen die Verwendung von Archetypen als gängigste Methode dar, um die Zusammensetzung des Gebäudebestandes abzubilden und zu kategorisieren [147]. Dabei führen die Autor:innen Gebäudetypologie (z. B. Mehrfamilien-, Einfamilien-, Reihenhäuser), Baujahr und Gebäudegröße als meist gewählte Kriterien zur Gruppenbildung an. Im Folgenden wird daher die TABULA Wohngebäudetypologie für Deutschland herangezogen [148]. Diese fokussiert sich insbesondere auf die energetischen Eigenschaften des Gebäudebestandes und bietet über verschiedene Baujahre hinweg repräsentative Werte für die energetische Qualität der Gebäudehülle im Bestand. Dabei werden historisch vergleichbare Baujahre in jeweils eine Baualtersklasse (Abkürzung in Tabellen und Abbildungen: BAK) zusammengefasst. Die Datenbank enthält zudem

zahlreiche Beispielgebäude, welche den energetischen Standard der entsprechenden Typologien abbilden. Da diese Dissertation auf urbane Wohngebäude abzielt, wurden Durchschnittswerte für die energetischen Eigenschaften der TABULA Wohngebäudetypologien von Mehrfamilien-, Reihen- und großen Mehrfamilienhäusern je Baualtersklasse gebildet. Die Ergebnisse werden im Folgenden als Ausgangssituationen für den Bestand herangezogen und sind in Tabelle A.1 im Anhang zusammengestellt (sh. Seite 149). Zudem zeigt Tabelle A.2 die U-Werte der betrachteten Sanierungsvarianten Gebäudeenergiegesetz (GEG) und Passivhaus (PH) auf.

Neben Angaben zur energetischen Qualität definiert die TABULA Wohngebäudetypologie beispielhafte Bauteilaufbauten der jeweiligen Baualtersklassen. Diese Informationen sind notwendig, um die mit dem Rückbau von Baumaterialien im Zuge von Sanierungen oder dem Austausch von Bestandsmaterialien verbundenen THG-Emissionen zu bestimmen. Diese Aufbauten stellen allerdings keine synthetischen Gebäude dar, wie dies bei anderen Gebäudedatenbanken der Fall ist [149]. Sie bieten jedoch einen Auszug aus den typischen Materialien der entsprechenden Baujahre, welche insbesondere für die ökologische Lebenszyklusanalyse notwendig sind. Zudem wird dadurch eine konsistente Datengrundlage für Energie- und Materialinformationen sichergestellt. Um dennoch zu überprüfen, in wie weit diese Materialangaben als repräsentativ betrachtet werden können, wurde eine bauteilbasierte Ökobilanzierung durchgeführt. Dafür wurde zunächst die Materialität der Beispielgebäude aus dem TABULA Projekt je Baualtersklasse und Gebäudetyp erfasst [150]. Bei fehlenden Angaben wurden diese durch Aufbauten aus einer Veröffentlichung des Passivhaus-Instituts zu typischen Konstruktionen in der Altbausanierung ergänzt [151]. Die dadurch generierten Baukonstruktionen wurden mithilfe des Ökobilanzierungstools eLCA [152] mit Datensätzen der Ökobaodat (Version 2020-II) [21] kombiniert. Anschließend erfolgte die Extraktion der Ergebnisse für die Lebenszyklusphasen Austausch (Phase B4), Rückbau und Entsorgung (Phasen C3 und C4) sowie Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Phase D). Zur Plausibilisierung der Werte wurde die vom Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) veröffentlichte Gebäudetypologie herangezogen [153]. Diese fokussiert sich auf Materialinformationen zu den enthaltenen Gebäuden und bezieht diese aus der Bildung synthetischer Gebäudetypen. Die IÖR Typologie bietet weniger Abstufungen als die TABULA Typologie, stellt jedoch im Hinblick auf Materialien eine allgemeinere Repräsentation der Baualtersklassen dar. Für den Vergleich wurden die Werte für Mehrfamilienhäuser herangezogen und ebenfalls mit Datensätzen aus der entsprechenden Ökobaodat Version (2020-II) hinterlegt. Die Abweichungen sind in den Abbildungen B.1 und B.2 im Anhang (sh. Seite 154) dargestellt.

Es zeigt sich, dass insbesondere bei älteren Baualtersklassen hohe Differenzen bei den Entsorgungsphasen vorliegen. Dies ist auf die verschiedenen hinterlegten Konstruktionstypen zurückzuführen (TABULA: Fachwerk, IÖR: überwiegend verputztes Ziegelmauerwerk, nur eines von acht einfließenden Gebäuden mit Fachwerk). Zudem bilden die Gebäude aus der IÖR Studie jeweils längere Zeiträume ab. Die älteste Klasse umfasst Gebäude mit einem Baujahr bis 1918 und deckt sich somit nicht vollständig mit den Zeiträumen der TABULA, bei welcher die am längsten zurückreichende Kategorie Gebäude bis zum Baujahr 1859 umfasst. Daher mussten Zuordnungen der beiden Systeme getroffen werden, welche Tabelle A.3 im Anhang zu entnehmen sind (sh. Seite 150). Im Vergleich zur IÖR Studie bietet die TABULA Typologie detailliertere Werte für den Energiestandard des Bestandes. Da Energiebedarfe für den Gebäudebetrieb nach derzeitigen gesetzlichen Vorgaben den größten Anteil an THG-Emissionen

darstellen [29], wird im Folgenden die TABULA Wohngebäudedatenbank verwendet. Außerdem wurde in einem vom Autor dieser Dissertation veröffentlichten Konferenzbeitrag zur Ökobilanzierung von Aufstockungen gezeigt, dass Rückbauphasen bei Bestandeingriffen zwar einen nennenswerten Effekt haben können, dieser aber meist nicht über die Herstellungsphasen hinausgeht [154].

Die Festlegung der Fensterflächenanteile des Bestandes erfolgt ebenfalls unter Zugrundelegung des TABULA Projekts [148]. Für das verwendete Energiemodell ist die Angabe des Fensterflächenanteils bezogen auf die Außenwände (Window to Wall Ratio (WWR)) erforderlich. Die entsprechende TABULA Veröffentlichung zu Fensterflächenanteilen bietet hierfür nur wohnflächenbezogene Kennzahlen. Daher wurde die zugrundeliegende Datenbasis beim Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) angefordert und daraus entsprechende Fensterflächenanteile abhängig von Baualtersklassen und Gebäudetypen ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass zwischen den relevanten Gebäudetypen (Einfamilien-, Mehrfamilien- und Reihenhäuser) erhebliche Unterschiede auftreten. Dies bestätigt die bisherige Auswertung der TABULA Studie, welche einen steigenden Fensteranteil bei zunehmenden Nutzflächen angibt. Darüber hinaus kann die von Heinrich in seiner Dissertation festgestellte Abnahme des Fensterflächenanteils seit den 1970er Jahren (Baualtersklasse fünf), mit Ausnahme von Baualtersklasse acht bestätigt werden [155] (sh. Abbildung 4.2, links). Die im rechten Teil von Abbildung 4.2 gezeigten Mediane der jeweiligen Gebäudetypen werden für das Gebäudesimulationsmodell herangezogen und nach allen Himmelsrichtungen identisch festgesetzt. Für neue Nutzflächen wie Aufstockungen und Anbauten wird der Median aus den Baualtersklassen zehn und elf gewählt, welcher 22 % beträgt. Neben dem Flächenanteil spielt der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Fenster eine wichtige Rolle für die energetische Bilanz des Gesamtgebäudes [156]. Dieser wird für den Bestand auf 0,70 und für die Sanierung sowie den Neubau auf 0,50 festgesetzt. Dies entspricht dem Standard von Zweifachverglasungen bzw. Dreifachverglasungen [157]. Als Materialität des Fensterrahmens wird eine Holz-Aluminium Ausführung angenommen.

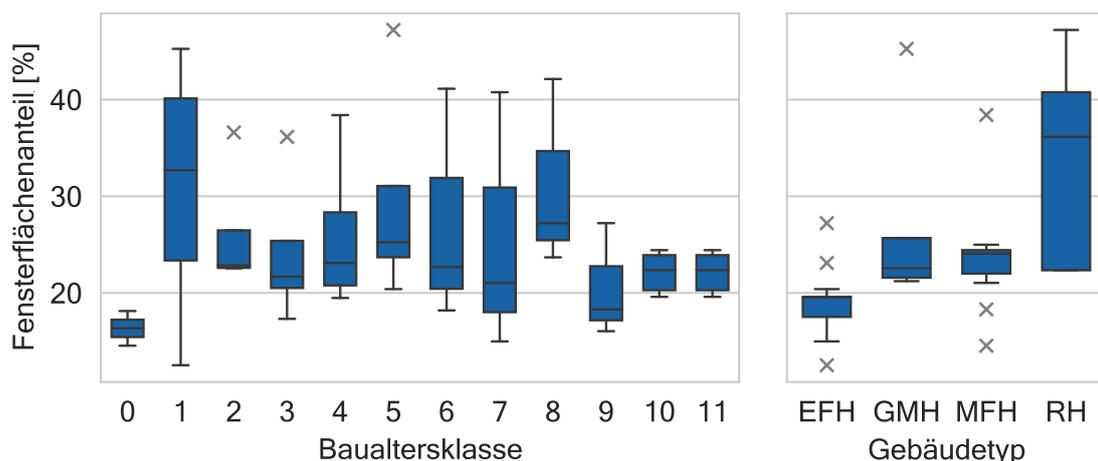


Abbildung 4.2 Auswertung der Fensterflächenanteile bezogen auf die Außenwandfläche je Baualtersklasse (links) und Gebäudetyp (rechts, EFH = Einfamilienhaus, GMH = Großes Mehrfamilienhaus, MFH = Mehrfamilienhaus, RH = Reihenhäuser). Datengrundlage ist die TABULA Beispielgebäudedatenbank [150].

Der Anteil an Innenwänden wird nach den Berechnungen von Heinrich auf $0,77 \text{ m}^2$ Innenwand pro m^2 BGF festgesetzt [155]. Für Umrechnungen zwischen der Nettogeschossfläche (NGF) und der BGF wird ein Faktor von 0,89 nach Bogenstätter verwendet [158]. Hinsichtlich der technischen Gebäudeausrüs-

tung (TGA) werden die von Harter in seiner Dissertation ermittelten Werte zur Ökobilanzierung von Wärmeerzeugern herangezogen [159]. Wärmeübertragungsflächen sowie Verteilnetze werden nicht berücksichtigt. In Deutschland ist nur ein geringer Teil des Wohngebäudebestandes mit einer aktiven Kühlanlage ausgerüstet [160, 161]. Aus diesem Grund wird für die Fallstudien von Wohngebäuden ohne aktive Kühlung ausgegangen. Da erwartet wird, dass der Bedarf nach aktiver Kühlung aufgrund des Klimawandels in Zukunft ansteigt [162], sollte der aktuelle Kühlenergiebedarf mindestens beibehalten oder soweit möglich verringert werden. Das Ziel besteht darin, die künftige Beschaffung und den Einsatz aktiver Kühlgeräte möglichst gering zu halten. Der simulierte Kühlenergiebedarf der Gebäude wird daher nicht in den Gesamtenergiebedarf und damit die Ökobilanzierung eingerechnet. Er wird im Folgenden als potentieller Kühlenergiebedarf bezeichnet. Als Datengrundlage für den Gebäudebetrieb werden die ÖkobaDat (Version 2020-II) sowie der LCA-Datensatz für den Strommix im Jahr 2020 verwendet.

Neben den Datengrundlagen für bestehende Gebäude müssen relevante Eingriffe (Modifikationen und Sanierungsmaßnahmen) sowie deren Rahmenbedingungen definiert werden. Als Orientierung für Gebäudeeingriffe dienen dabei die Design Kategorien nach Longo et al. [26]. Diese unterteilen Optimierungsmöglichkeiten auf Gebäudeebene wie folgt:

- Gebäudehülle (z. B. Dämmeigenschaften, Verschattung)
- Technische Gebäudeausrüstung (z. B. Wärmeerzeuger)
- Einbauten (z. B. Eigenschaften von Verglasungen)
- Erneuerbare Energien (z. B. Einsatz von Holzpellets, PV)

Hinzu kommen Modifikationen, die unmittelbar in die Gebäudegeometrie eingreifen. Hierzu zählen beispielsweise Aufstockungen und Anbauten. Für die geplante Methode der parametrischen Simulation muss die Anzahl der Designparameter niedrig gehalten werden [163]. Zudem ist es für den methodischen Ansatz zur Synergiebewertung notwendig, dass für alle Kombinationen einer Maßnahme Simulationsergebnisse vorliegen. Es werden daher ausschließlich diskrete Modifikationen definiert. Das bedeutet, dass vorgegebene Maßnahmenbündel, wie beispielsweise eine Sanierung aller thermischen Hüllflächen nach gesetzlichen Standard oder nach Passivhausstandard gebildet werden. Da auf Gebäudeebene kein Einfluss durch Nachbarbebauung und damit keine Kontextverschattung berücksichtigt wird, erfolgt der Einbezug von erneuerbarer Energieerzeugung durch PV erst auf der Quartiersebene (sh. Kapitel 4.3).

Als gängige Nachverdichtungsmaßnahmen wurden in einem Fachgutachten zu städtebaulicher Nachverdichtung im Klimawandel Anbau, Aufstockung, Blockrandschließung, Blockinnenverdichtung, Umstrukturierung sowie Konversion als relevante Ansätze dargelegt [59]. Die Gebäudegeometrie stellt dabei einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen dar [164] und kann Energiebedarfe unter Umständen stärker beeinflussen als die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle [165]. Nach Welters et al. bieten sich Aufstockungen insbesondere bei dichten Strukturen an [59]. Sie sind jedoch auch in durchmischten und offenen Siedlungstypen gut anwendbar. Aufstockungen werden daher in der Gebäudefallstudie mit ein oder zwei Etagen mit einer Bruttogeschosshöhe von 2,75 m vorgesehen. Der Einsatz von Anbauten in kompakten Siedlungstypen sollte hingegen ver-

mieden werden, um klimatische Auswirkungen gering zu halten [166]. Anbauten bieten aber im Falle offener Siedlungsstrukturen eine relevante Entwicklungsmöglichkeit [59]. Da Subtypen des Zeilenbaus auch locker bebaute Gebiete umfassen, werden Anbauten mit bis zu zwei Stockwerken und Bruttogeschosshöhen von 2,75 m in die Betrachtungen aufgenommen. Die Anbauten werden jeweils über eine komplette Gebäudeseite angesetzt. Für beide Nachverdichtungsmaßnahmen wird ohne weitere Eingriffe in das Bestandsgebäude der gesetzliche Mindeststandard angenommen. Sofern eine Sanierung des Bestandsgebäudes auf einen höheren Standard stattfindet, wird dieser auch für die Aufstockung bzw. den Anbau berücksichtigt. Als Ausführungsart der Gebäudeerweiterungen wird ein Holzrahmenbau angenommen, da dieser aufgrund des geringen Eigengewichts insbesondere bei Aufstockungen eine große Rolle spielt [167]. Zudem wird jeweils eine Konstruktion für Flach- und Steildach in die parametrische Untersuchung aufgenommen. Die Bauteilaufbauten der Neubauten sowie deren bauteilbasierte Ökobilanzierung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* entwickelt und veröffentlicht [168]. Gleiches gilt für die verwendeten Ökobilanzdatensätze von Dämmmaterialien im Falle von Sanierungen. Mastrucci et al. zeigen, dass die Umweltwirkungen von Gebäudesanierungen stark vom verwendeten Material abhängen [31]. Bei Dämmstoffen können beispielsweise Schwankung der Gesamtergebnisse von 6–15 %, bei Fenstern von 12–51 % auftreten. Für die generische Betrachtung im Rahmen dieser Dissertation wurden Sanierungsmaterialien gruppiert und Durchschnittswerte für ökologisch überdurchschnittlich bzw. durchschnittlich abschneidende Baustoffe gebildet. Dies erlaubt eine materialunabhängigere Bewertung, als dies durch die Auswahl einzelner Dämmstoffe möglich wäre. Die herangezogenen Quellen und Aufbauten sind im Abschlussbericht des Projekts *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* wiedergegeben [168]. Die resultierenden Werte sind in Tabelle A.4 im Anhang zusammengestellt (sh. Seite 150). Für die Ökobilanzierung auf Gebäudeebene wird die Gruppe der dort definierten „ökologisch durchschnittlichen“ Dämmstoffe verwendet. Dazu zählen beispielsweise Glaswolle, Zelluloseflocken und Flachsfasern.

Neben der geometrischen Veränderung stellt die energetische Qualität der Gebäudehülle einen wesentlichen Hebel für den Energiebedarf und somit für die gesamten THG-Emissionen eines Bauwerks dar. Hinsichtlich der Gebäudehülle werden daher Modifikationen in Form verschiedener Sanierungsstandards (GEG, PH) für die Wände, das Dach, die Bodenplatte und die Fenster vorgesehen. Im Rahmen eines vom Autor dieser Dissertation veröffentlichten Konferenzbeitrags wurde mittels einer Sensitivitätsanalyse zudem gezeigt, dass die Wahl des Energieträgers einen hohen Einfluss auf die Ergebnisunsicherheit hat [169]. Daher finden auch wechselnde Energieträger in der parametrischen Untersuchung Berücksichtigung. Im Ausgangsfall wird der Betrieb mit Heizöl angenommen. Für eine mögliche Umstellung des Energieträgers werden Fernwärme, Gas, Holzpellets sowie die Verwendung einer Wärmepumpe in die Betrachtung integriert. Zudem konnte in anderen Forschungsarbeiten nachgewiesen werden, dass die mit der Herstellung und dem End-of-Life der Gebäudetechnik verbundenen THG-Emissionen einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz haben können [159, 170].

Alle im Rahmen dieser Dissertation variierten Ausgangslagen und Modifikationen auf Gebäudeebene sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Insgesamt ergeben sich dadurch 23.416 mögliche Kombinationen.

Tabelle 4.3 Im parametrischen Gebäudemodell einbezogene Ausgangskonfigurationen und Gebäudeeingriffe.

Parameter Bestand	Varianten	Quelle
Energiestandard & Material	Je Baualtersklasse, 0 bis 11 (entspricht A bis L der TABULA Bezeichnung)	[150]
Dachform Bestand	Flachdach, Steildach	-
Parameter Modifikation	Varianten	Quelle
Aufstockung	Keine Aufstockung, ein oder zwei Stockwerke	[59]
Anbau	Kein Anbau, Nord, Ost, Süd, West	[59]
Dachform Erweiterung	Flachdach, Steildach	-
Luftdichte	0,00045; 0,00030; 0,00015 [m ³ /m ² Fassade · Sekunde]	[171]
Verschattung außen	Keine, Fenster mit dynamischer Verschattung	-
Sanierung	Keine, GEG, Passivhausstandard	[157, 172]
Wärmeerzeuger	Heizöl, Fernwärme, Gas, Wärmepumpe, Holzpellet	[21]

4.2.2 Lebenszyklusanalyse von Gebäudeaufstockungen

Soweit möglich werden die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen der Gebäudekonfigurationen anhand einer Ökobilanz nach DIN EN 15978:2011 ermittelt [20]. Auf die dadurch festgelegten Grundlagen wird im folgenden Kapitel 4.2.3 näher eingegangen. Diese Norm bietet insbesondere für Sanierungen und Nachverdichtungsmaßnahmen nur unzureichende methodische Rahmenbedingungen [24]. Daher werden die im Rahmen des Forschungsprojekts *Leitlinie zur Vereinfachung der Planung und Durchführung von Aufstockungs- / Erweiterungsmaßnahmen als Nachverdichtungsmaßnahmen in innerstädtischen Bereichen* vorgeschlagenen Bilanzierungsgrenzen für Aufstockungsmaßnahmen angewandt [167, 173]. Die dort geschilderte Berechnungsmethode berücksichtigt für rückgebaute Bauteile ausschließlich die Entsorgungsphasen, neu hinzukommende Elemente werden hingegen über deren kompletten Lebenszyklus erfasst. Es wird davon ausgegangen, dass durch eine Sanierung die Lebensdauer des betroffenen Gebäudes um 50 Jahre verlängert werden kann [24]. Die Bewertungsmethode zu Aufstockungen wurde im Rahmen dieser Dissertation um Konstruktionen zur Ertüchtigung und Verstärkung von Bestandsbauten erweitert. Dadurch können die Auswirkungen verschiedener Bestandskonstruktionen auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung detaillierter erfasst und in der Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden. Das Vorgehen und die Ergebnisse einer Fallstudie wurden vom Autor dieser Dissertation im Rahmen eines Konferenzbeitrags veröffentlicht [154]. Durch diese erweiterte Berechnungsmethode können die Auswirkungen von Gebäudeeingriffen auf lebenszyklusbasierte THG-Emissionen und deren Abhängigkeiten vom Bestand bewertet werden. Abbildung 4.3 fasst die genannten Bilanzierungsgrenzen zusammen.

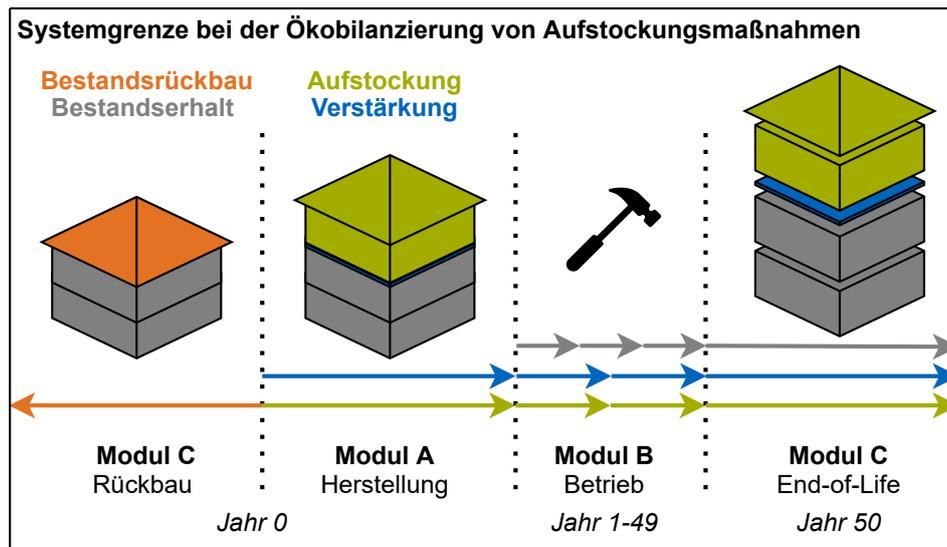


Abbildung 4.3 Methode zur Ökobilanzierung der grauen THG-Emissionen von Gebäudeaufstockungen, eigene Abbildung basierend auf [173].

4.2.3 Simulationsmodell und Validierung auf Gebäudeebene

Die in Kapitel 2.2.1 beschriebene Methode zur Bewertung von unikriterieller Synergie setzt voraus, dass zu jeder Kombination die entsprechenden Ausgangswerte des Bestandes ohne weitere Eingriffe vorliegen. Aus diesem Grund wird eine parametrische Untersuchung im Full Factorial Design verwendet. Das bedeutet, dass alle möglichen Kombinationen der im Rahmen der Diskretisierung gewählten Varianten (sh. Tabelle 4.3) simuliert werden, was zu einer hohen Anzahl erforderlicher Evaluationen führt. Um dies in einem Simulationsmodell abzubilden, sind effiziente parametrische Methoden unumgänglich. Derartige Methoden erfahren zunehmendes Forschungsinteresse bei der Untersuchung lebenszyklusbasierter Wirkungen in frühen Planungsphasen [174]. Im Folgenden werden die Simulationskomponenten des Gebäudesimulationsmodells und insbesondere ihr Zusammenwirken beschrieben. Wie in Tabelle 4.2 dargelegt, werden dabei mehrere Plug-Ins innerhalb der Grasshopper Umgebung kombiniert und vernetzt. Diese Softwareumgebung wurde aufgrund ihres modularen Aufbaus bereits für zahlreiche parametrische Untersuchungen an Gebäuden und Quartieren herangezogen [30, 74].

Energie- und Komfortsimulation

Zunächst wird die Gebäudegeometrie des Bestandes je Stockwerk in Rhinoceros 3D modelliert. Darüber hinaus werden Aufstockung und Anbau als parametrische Optionen in Grasshopper vorgesehen. Das bedeutet, dass diese aus der Programmierung heraus aktiviert werden können und sich dadurch die Gebäudegeometrie und die thermische Zonierung automatisiert anpassen. Es wird ein Mehrzonenmodell mit einer thermischen Zone je Etage eingesetzt. Zudem wird eine Logik zur Erstellung von Aufstockungen und Anbauten als eigene thermische Zonen hinterlegt, um Ergebnisse nach Erweiterungen und Bestand unterscheiden zu können. Die stockwerksweise Zonierung wird für vergleichbare Detaillierungsgrade häufig in der Literatur angewendet [42, 54, 76]. Anschließend erfolgt die Zuweisung der thermischen Eigenschaften (U-Werte) und entsprechender Baukonstruktionen zu den jeweiligen Bauteilen. Gründächer werden mittels der in Energy Plus implementierten Methodik nach Sailor berücksichtigt [175]. Als Rahmenbedingungen für den Gebäudebetrieb wird die DIN V 18599 Teil 10,

Tabelle 4 für Mehrfamilienhäuser herangezogen [176]. Zudem wird eine manuelle Fensterlüftung in die Simulation integriert. Zur Bewertung des thermischen Innenraumkomforts wird im Gebäudemodell der potentielle Kühlenergiebedarf herangezogen. Dies ist aufgrund der dynamischen Berechnung abhängig von den Innenraumtemperaturen eine gängige Möglichkeit, um gleichzeitig auf den thermischen Innenraumkomfort und künftige Energieeinsparungen zu schließen [177]. Die beschriebenen Datenschnittstellen sowie die Randbedingungen (sh. Kapitel 4.1, Seite 35) und Datengrundlagen (sh. Kapitel 4.2.1, Seite 37) werden durch das Grasshopper Plug-In Honeybee in Energy Plus Simulationsdateien (Input Data Files, idf) überführt. Deren Ausführung und Auswertung wird anschließend mithilfe des Python Pakets Eppy [178] parallelisiert, um die hohe Zahl notwendiger Energiesimulationen zeitlich abzubilden.

Um sicherzustellen, dass die Gebäudesimulationen realistische und belastbare Ergebnisse liefern, werden diese anhand von Vergleichswerten validiert. Hierfür dienen die Energiebedarfswerte der TABULA Gebäudetypologie [150]. Diese sind je Baualtersklasse und Gebäudetyp aufgeschlüsselt. Dabei handelt es sich um berechnete Bedarfe, welche anhand von Korrekturfaktoren an die realen Verbrauchswerte angenähert wurden. Aufgrund der klimatisch bedingten Schwankungen zwischen mehreren Jahren ist ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den realen Verbrauchswerten verschiedener Standorte wenig aussagekräftig. Statt dessen werden die normierten Energiebedarfe der TABULA Studie zur Validierung herangezogen. Diese beziehen sich auf das deutsche Referenzklima (Standort Potsdam) nach DIN V 18599 Teil 10 [176]. Dafür wird die Energiesimulation für das generische Fallstudiengebäude mit einem Wetterdatensatz für Potsdam durchgeführt und mit der auf Verbrauchswerte korrigierten TABULA Kategorie „Mehrfamilienhäuser“ verglichen. Ziel der Validierung ist keine vollständige Übereinstimmung, da dies aufgrund der unterschiedlichen Annahmen für das Nutzer:innenverhalten und die Gebäudegeometrien kaum möglich ist. Vielmehr steht die korrekte Abbildung von Tendenzen im Mittelpunkt. Durch die unterschiedlichen energetischen Qualitäten der Baualtersklassen kann überprüft werden, ob die Ergebnisse der Simulation und der TABULA in gleichem Maß auf die Änderung von Randbedingungen reagieren. Die TABULA Werte beziehen sich auf die beheizte Wohnfläche. Da für das Simulationsmodell nur mit Annahmen und Kennzahlen für die Grundrissgestaltung gearbeitet werden kann, wird ein Umrechnungsfaktor von $0,89 \text{ m}^2 \text{ NGF pro m}^2 \text{ BGF}$ nach Bogenstätter herangezogen [158]. Andere Arbeiten geben hier auch niedrigere Werte an, z. B. $0,8$ [179]. Da diese Unsicherheit erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat, wird ein Ausgangswert von $0,8$ mit einer möglichen Abweichung von $\pm 0,09$ einbezogen. Abbildung 4.4 zeigt die daraus resultierende Gegenüberstellung.

Die Simulation bildet die verschiedenen Baualtersklassen unterschiedlich gut ab. Die Abweichungen bleiben jedoch mit Ausnahme der Baualtersklassen zwei und neun innerhalb des beschriebenen Unsicherheitsbereichs. Da im Rahmen des TABULA Projekts Bedarfswerte anhand einer Vielzahl von Gebäuden ermittelt wurden, besteht auch bei diesen eine Unsicherheitsspanne [150]. Die Gebäudesimulation wird daher als ausreichend valide zur Abbildung der energetischen Standards je Baualtersklasse bewertet.

Ökologische Lebenszyklusanalyse

Die Ökobilanzierung wird in dieser Dissertation bauteilbasiert durchgeführt. Dies bedeutet, dass zur Ermittlung der Umweltwirkungen eines Gebäudes die Konstruktionsaufbauten definiert, deren Ergebnisse je funktioneller Einheit (z. B. ein m^2 Bauteilfläche) ermittelt und schließlich mit der im Bauwerk

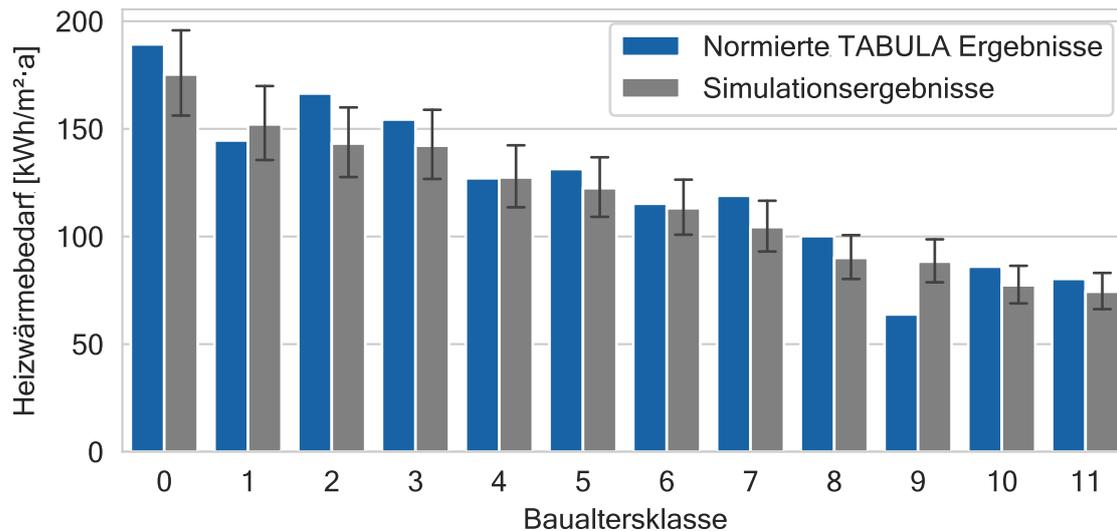


Abbildung 4.4 Gegenüberstellung der Heizwärmebedarfswerte für Mehrfamilienhäuser gemäß TABULA und der simulierten Heizwärmebedarfe mit Unsicherheit bei der Umrechnung von BGF auf NGF.

vorhandenen Bauteilmenge multipliziert werden. Der Aufbau des verwendeten Bauteilkataloges und die Ermittlung der Umweltwirkungen für die einzelnen Bauteile wurden in Kapitel 4.2.1 beschrieben (sh. Seite 37). Die Bauteilmengen werden direkt aus dem Simulationsmodell extrahiert. Hierfür kommen sowohl geometrische Basisoperationen, als auch Funktionen aus dem Grasshopper Plug-In Honeybee zum Einsatz. Dadurch sind die Dachflächen, die Außenwände, die Fenster, die Zwischendecken, die Bodenplatte, sowie die Geschossflächen getrennt nach dem Basisgebäude, der Aufstockung und dem Anbau ermittelbar. Diese Flächen werden in eine programmierte Umsetzung der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Methodik zur Ökobilanzierung von Gebäudeerweiterungen exportiert (sh. Seite 42). Die simulierten Energiebedarfe werden ebenfalls exportiert und fließen gemeinsam mit den Bauteilmengen in die Berechnung der Ökobilanz ein. Zudem wird die Heizlast aus der Energiesimulation entnommen und für neue Gebäudeflächen zur Berechnung der Umweltwirkung aus zusätzlichen Heizwärmeerzeugern nach Harter verwendet [159].

Die Ökobilanz umfasst die Lebenszyklusphasen der Herstellung (Phasen A1 bis A3), der Nutzung (Phasen B4 und B6) sowie des End-of-Life (Phasen C3 bis C4). Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Phase D) werden gesondert aufgeführt. Der Betrachtungszeitraum wird auf 50 Jahre festgelegt, was sowohl den Kriterien deutscher Bewertungssysteme als auch zahlreichen Forschungsarbeiten entspricht [179–182]. Die Ergebnisse werden je m² NGF angegeben.

Nach Abschluss der Ökobilanzierung liegen für jede Maßnahmenkombination Ergebnisse für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen sowie die zugrundeliegenden Energiebedarfe und die grauen THG-Emissionen vor.

4.2.4 Ergebnisse unikriterielle Synergie auf Gebäudeebene

Nachdem die Ergebnisse aller Maßnahmenkombinationen für die auf Gebäudeebene betrachteten KPIs vorliegen (THG-Emissionen, Heizwärmebedarf, potentieller Kühlenergiebedarf, graue THG-Emissionen), erfolgt die Berechnung der unikriteriellen Synergiekennzahl (S_{uni}) nach Formel 3.1 (sh. Kapitel 3.1.1, Seite 26). Dazu wird zunächst der unveränderte Basisfall je Baualtersklasse aus der Ergebnistabelle extrahiert. Dieser dient als Bezugswert für alle Maßnahmen, die darauf angewendet werden. Ebenso werden Datensätze mit nur einer Modifikation aus dem Gesamtdatensatz abgespalten. Diese sind im nächsten Schritt zur Aufsummierung der Auswirkung von Einzelmaßnahmen notwendig. Anschließend wird die Veränderung der Ergebnisse für jeden der vier KPIs im Vergleich zum Basisfall berechnet. Gleiches erfolgt für jede Variante mit zwei oder mehr angewendeten Maßnahmen. Für diese Varianten werden zudem die jeweils ermittelten Veränderungen der enthaltenen Einzelmaßnahmen aufsummiert und im Datensatz abgespeichert. Schließlich können die dadurch generierten Werte in Formel 3.1 eingesetzt und somit die unikriterielle Synergiekennzahl berechnet werden.

Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisverteilung der unikriteriellen Synergie auf Gebäudeebene für die vier Zielgrößen in Abhängigkeit von der Baualtersklasse des Bestandes. Dabei ist ersichtlich, dass die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen und der Heizwärmebedarf sich hinsichtlich der unikriteriellen Synergie vergleichbar verhalten. Für diese beiden Kenngrößen sind nur wenige positive Werte erkennbar, die nicht über 5% hinausgehen (sh. Abbildung 4.5, oben). Die unikriterielle Synergie spielt für diese Bewertungsaspekte unter den betrachteten Rahmenbedingungen und Maßnahmen entsprechend eine untergeordnete Rolle. Chidiac et al. ziehen in Ihrer Studie zu Sanierungskombinationen ein vergleichbares Fazit. Die Autor:innen zeigen auch, dass diese Art der Synergiebewertung auf der Ebene einzelner Bauteile durchaus relevant sein kann, da dann physikalische Prozesse wie etwa der Wärmedurchgang stark von Unregelmäßigkeiten (z. B. eine einzelne nicht gedämmte Wandfläche) beeinflusst werden [40]. Die Ergebnisse der unikriteriellen Synergie von THG-Emissionen sind über die Baualtersklassen hinweg ungleichmäßig verteilt. Jüngere Baujahre liegen tendenziell in einem höheren Bereich und weisen entsprechend höheres Potential für synergetische Gewinne auf.

Für den potentiellen Kühlenergiebedarf können dagegen Ergebnisse von bis zu 16,7% erreicht werden (sh. Abbildung 4.5, unten). Dies ist darauf zurückzuführen, dass insbesondere bei der Gebäudekühlung einzelne Maßnahmen zu einer Verschlechterung führen können. Beispielsweise kann sich der potentielle Kühlenergiebedarf durch zusätzliche Dämmung und die damit einhergehende Verbesserung der Luftdichte erhöhen [183]. Derartige Verschlechterungen können durch den gleichzeitigen Einbau von Verschattungsmaßnahmen am Gebäude teils ausgeglichen werden. Die dann feststellbare Verbesserung geht über den ungedämmten Zustand des Gebäudes hinaus, da dieser ein geringeres Verbesserungspotential aufweist. Die aus Materialien resultierenden grauen THG-Emissionen liegen fast ausnahmslos im positiven Wertebereich. Hier kommt insbesondere die Einsparung von Material bei der Kombination einer Erweiterungsmaßnahme (Aufstockung, Anbau) mit einer Sanierung der thermischen Hülle zum Tragen. Zudem wurden in der vorliegenden Fallstudie ausschließlich Bestandsgebäude betrachtet, weshalb im Vergleich zum Neubau nur wenige zusätzliche Materialien zu bilanzieren sind.

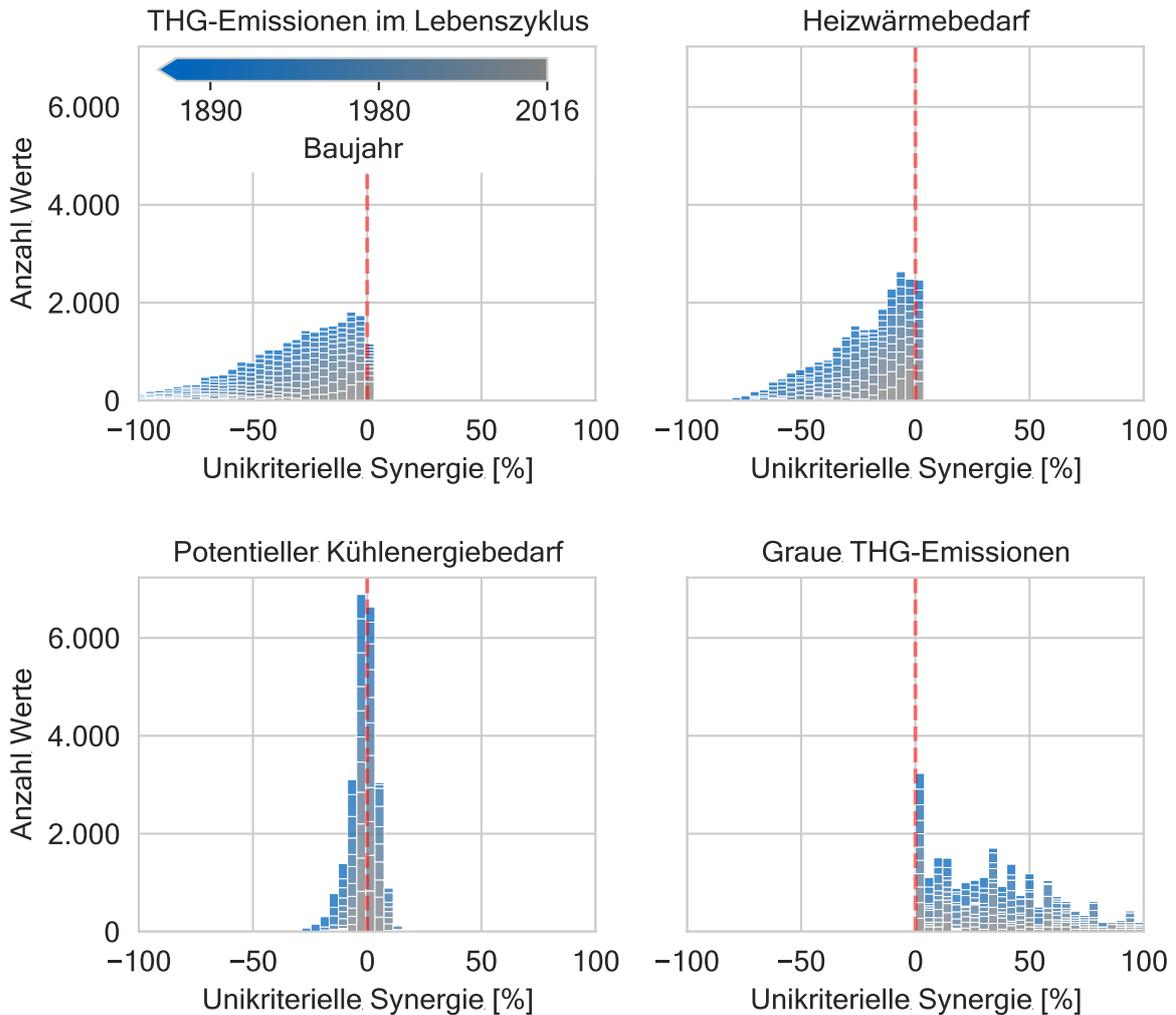


Abbildung 4.5 Ergebnisverteilung der unikriteriellen Synergie auf Gebäudeebene nach Baujahren. Insgesamt wurden hierfür 23.416 Kombinationen simuliert.

Abbildung 4.6 zeigt die positiven Ergebnisse für die unikriterielle Synergie hinsichtlich der lebenszyklusbasierten THG-Emissionen (681 von 23.416 Kombinationen), aufgeteilt nach Energiestandard und Energieträger. Dabei ist ein Anstieg der unikriteriellen Synergie für den gesetzlichen Sanierungsstandard im Vergleich zum unsanierten Zustand zu beobachten. Für den höheren Passivhausstandard fällt das Ergebnis geringer aus. Außerdem sinkt S_{uni} mit umweltfreundlicheren Energieträgern ab. Die Überlagerung beider Effekte führt dazu, dass für den Passivhausstandard kaum noch positive Ergebnisse erzielt werden.

Ein wesentlicher Grund für die geringen unikriteriellen Synergiepotentiale bei lebenszyklusbasierten THG-Emissionen und Heizwärmebedarfen liegt im hohen Einspareffekt durch Einzelmaßnahmen. Um dies zu veranschaulichen, wird beispielhaft die Sanierung des Fallstudiengebäudes in Baualterklasse fünf auf den Passivhausstandard sowie die Umstellung der Wärmeversorgung auf eine Holzpelletheizung erläutert. Das Gebäude weist im unveränderten Zustand THG-Emissionen in Höhe von $26,76 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\cdot\text{a}$ auf. Durch die Sanierung reduziert sich dieser Wert um $10,43 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\cdot\text{a}$, die Umstellung auf Holzpellet führt zu einer Reduktion um $20,75 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\cdot\text{a}$. Bei einer kombinierten Anwendung der Sanierung und der Umstellung auf Holzpellet ergeben sich hingegen Einsparungen von $19,67 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\cdot\text{a}$. Dies ist auf die deutliche Reduktion des Energiebedarfs durch die Sanie-

rung zurückzuführen. Die Einsparungen, die durch den Wechsel des Energieträgers erzielt werden können, fallen dadurch geringer aus als in der Ausgangssituation. Gleichzeitig steigen jedoch die grauen THG-Emissionen aufgrund des Einbaus zusätzlicher Dämmstoffe. Dieses Beispiel veranschaulicht die bereits bekannte Problematik, dass bei sehr hohen Dämmstandards eine Grenze erreicht wird, die weitere Anstrengungen in diese Richtung nicht rechtfertigt, insbesondere wenn bereits Primärenergiequellen mit sehr niedrigen THG-Emissionen verwendet werden [30, 31]. In diesem Fall können zusätzliche Kriterien bei der Wahl einer geeigneten Maßnahmenkombination unterstützen. Beispielsweise könnte die Feinstaubbelastung oder der Verbrauch erneuerbarer Rohstoffe dem Einsatz einer Holzpelletheizung entgegenstehen. Die dabei zugrunde liegende Methode der multikriteriellen Entscheidungsfindung wird in Kapitel 4.4 behandelt. Mit Blick auf die erarbeitete Bewertungsmethodik wird deutlich, dass bei hohen Einsparungen durch einzelne Maßnahmen ein positives Ergebnis für die unikriterielle Synergie kaum noch möglich ist. Im gewählten Beispiel ergibt sich als Summe der Einzeleinsparungen ein Wert von $31,18 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\text{-a}$, welcher den Basiswert bereits übersteigt. Entsprechend müsste für ein positives Abschneiden der unikriteriellen Synergie ein negativer Gesamtwert der THG-Emissionen durch die Maßnahmenkombination erreicht werden. Dies ist im Rahmen der für die Gebäudebetrachtung gesetzten Systemgrenzen nicht erzielbar, da beispielsweise keine erneuerbare Stromgewinnung berücksichtigt wurde. Die durch den Einbezug einer PV-Anlage erzielbaren Gutschriften werden im Zuge der Quartiersbetrachtung (sh. Kapitel 4.3.3) in die Bewertung einbezogen und detailliert untersucht.

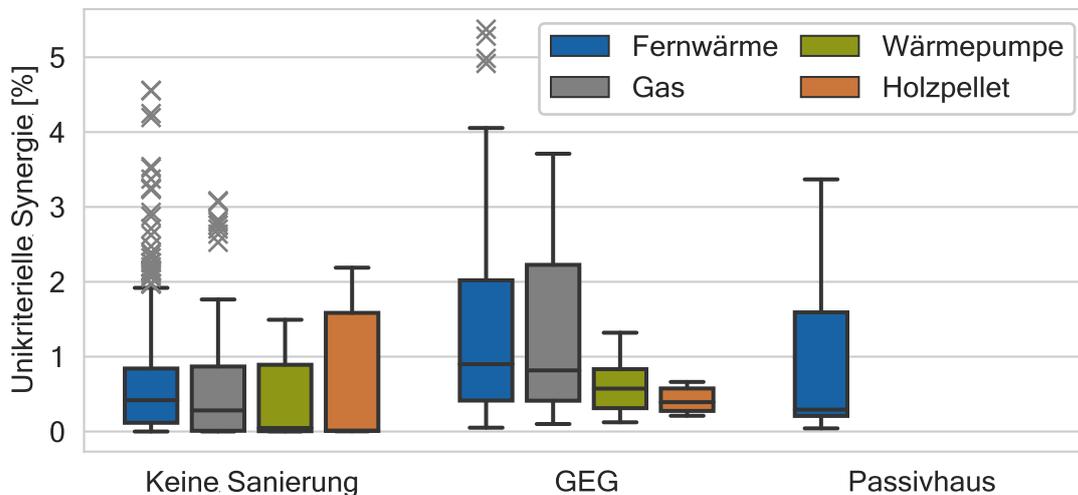


Abbildung 4.6 Verteilung der hinsichtlich unikriterieller Synergie bei lebenszyklusbasierten THG-Emissionen positiv abschneidenden Ergebnisse nach Energiestandard und Energieträger.

4.2.5 Ergebnisse multikriterielle Synergie auf Gebäudeebene

Nachdem für das Fallbeispiel nur ein begrenztes Auftreten der unikriteriellen Synergie für die Aspekte THG-Emissionen und Heizwärmebedarf festgestellt wurde, erfolgt in diesem Kapitel die Untersuchung der parallelen Verbesserung mehrerer Aspekte (multikriterielle Synergie, S_{multi}). Dazu wird das Vorgehen wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben zusammen mit Formel 3.2 schrittweise angewandt. Es werden die drei Aspekte THG-Emissionen, potentieller Kühlenergiebedarf sowie Heizwärmebedarf herangezogen. Das Ziel besteht darin, Szenarien zu identifizieren, die zu einer umfassenden Verbesserung in allen

genannten Bereichen führen. Dazu werden zunächst die Differenzen zum unveränderten Ausgangsfall (sh. Kapitel 4.2.1, Seite 37) berechnet. Basierend darauf werden Szenarien mit einer negativen Auswirkung auf einen der drei Zielindikatoren ausgeschlossen. Dadurch verbleiben 1.431 von 23.416 Kombinationen. Die anschließende Normierung der Differenzen je Aspekt und deren Aufsummierung gemäß Formel 3.2 führt schließlich zur Bewertung der multikriteriellen Synergie.

Die 50 am besten abschneidenden Szenarien, sowie deren normierte Ergebnisse, sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Dabei zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung über alle drei Aspekte hinweg. Ungleichgewichte treten nur vereinzelt auf, was die Möglichkeit zur Erzielung paralleler Verbesserungen in allen betrachteten Zielgrößen unterstreicht. Zudem wird ersichtlich, dass kein Szenario die maximal mögliche Bewertung von 3,0 (drei mal 1,0) erreicht. In der Gebäudefallstudie ist kein Szenario enthalten, welches diese Eigenschaft erfüllt. Dies deutet auf das Vorliegen von Trade-offs zwischen mindestens zwei der betrachteten Zielgrößen hin.

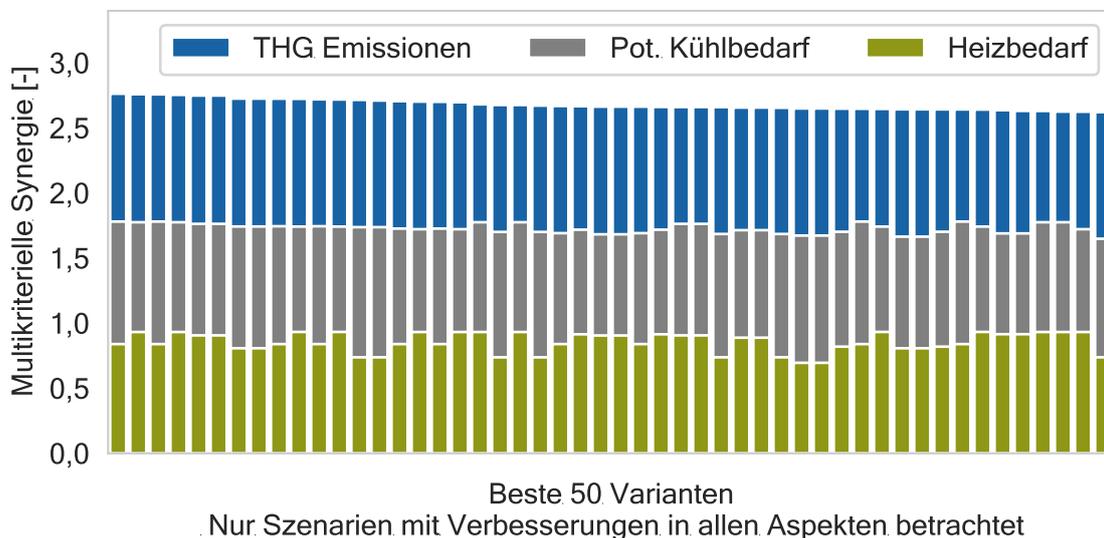


Abbildung 4.7 Beste 50 Varianten der multikriteriellen Synergie für das Fallstudiengebäude. Es zeigt sich eine gleichmäßige Verbesserung der drei Zielaspekte.

Abbildung 4.8 gibt einen Eindruck zu den absoluten Veränderungen der hinsichtlich multikriterieller Synergie am besten abschneidenden Variante. Diese weist deutliche Verbesserungen bei den THG-Emissionen und dem Heizwärmebedarf auf (74% bzw. 78%), was unter anderem am unmittelbaren Einfluss des Heizwärmebedarfes auf die THG-Emissionen liegt. Letztere werden dagegen auch durch andere Faktoren wie etwa den grauen THG-Emissionen durch zusätzliche Dämmstoffe beeinflusst. Daneben zeigt der potentielle Kühlenergiebedarf nur eine geringe Verbesserung von 14%, die aber im Vergleich zu den weiteren Szenarien in einem guten Bereich liegt und daher bei der Normierung überdurchschnittlich abschneidet. Bei der einzelnen Betrachtung der Aspekte liegt die in Summe am besten abschneidende Variante bei den THG-Emissionen, dem Heizwärmebedarf und dem potentiellen Kühlenergiebedarf auf Rang 26, 117 bzw. 37. Auch hier wird deutlich, dass für jeden der Aspekte im einzelnen bessere Szenarien gefunden werden können, diese aber bei der gewählten Bewertung nicht zu einer gleichmäßigen parallelen Verbesserung aller drei Aspekte führen.

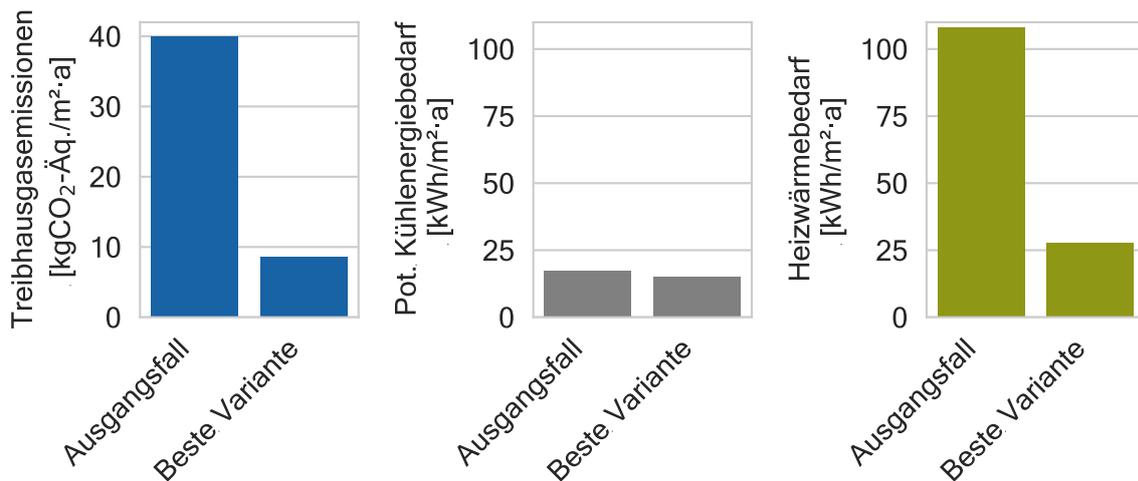


Abbildung 4.8 Veränderungen der besten Gebäudevariante der multikriteriellen Synergiebewertung in den Aspekten THG-Emissionen, potentieller Kühlenergiebedarf und Heizwärmebedarf.

Abbildung 4.9 zeigt die Gegenüberstellung von THG-Emissionen und potentiellm Kühlenergiebedarf. Darin sind die Szenarien mit positiver Wirkung in allen drei Aspekten markiert. Auffallend ist, dass die besten 50 Varianten nur einen kleinen Bereich des möglichen Lösungsraumes abdecken. Hinsichtlich der THG-Emissionen und des potentiellen Kühlenergiebedarfs sind dabei keine Pareto-optimalen Lösungen in diesen 50 besten Varianten enthalten. Die besten Varianten können zwar Pareto-optimale Lösungen im dreidimensionalen Raum zusammen mit dem Aspekt Heizwärmebedarf darstellen, eine breite Abdeckung aller Möglichkeiten für optimale Lösungen geht aus der multikriteriellen Synergie allerdings nicht hervor. Die Ermittlung einer vollständigen PF im Zuge multikriterieller Fragestellungen wird in Kapitel 4.3.4 behandelt. Die Auswertung der Ergebnisverteilung zeigt zudem, dass der Großteil der Szenarien (dunkel schattierter Bereich in Abbildung 4.9) weit von der PF entfernt ist. Die Wahrscheinlichkeit, Pareto-optimale Lösungen durch die Anwendung von Full Factorial Design zu identifizieren, ist demnach gering. MOO Ansätze können dabei helfen, optimale Lösungen mit deutlich weniger Simulationsdurchläufen zu finden. Die hier vorgestellte multikriterielle Synergiebewertung ist demnach nicht zur Suche nach Pareto-Optima geeignet. Sie bietet jedoch Unterstützung bei der Identifikation von ausgewogenen Ansätzen zwischen mehreren Zielgrößen. Die damit herausgearbeiteten Lösungen sollten auf weiteres Optimierungspotential hin untersucht und ihre Pareto Eigenschaft sichergestellt werden. Dies garantiert, dass keine weiteren Verbesserungen an einer Zielgröße möglich sind, ohne die anderen zu verschlechtern.

Um die Voraussetzung für überdurchschnittliches Abschneiden bei der multikriteriellen Synergie zu identifizieren und dadurch allgemeine Empfehlungen abzuleiten, werden die Ergebnisse mittels einer Regressionsanalyse untersucht. Abbildung 4.10 zeigt den Zusammenhang zwischen multikriterieller Synergie und den betrachteten Konfigurationsmöglichkeiten. Dieser Zusammenhang wird durch den Pearson-Korrelationskoeffizienten (KK) quantifiziert. Dabei kann ein positiver Einfluss des Energieträgers auf das Ergebnis der multikriteriellen Synergie festgestellt werden (KK = 0,226). Je geringer die Umweltwirkungen zur Erzeugung einer Kilowattstunde Heizenergie, desto wahrscheinlicher wird ein gutes multikriterielles Abschneiden. Dies erscheint zunächst widersprüchlich, da sowohl der Heiz- als auch der potentielle Kühlenergiebedarf nicht unmittelbar vom Energieträger beeinflusst werden.

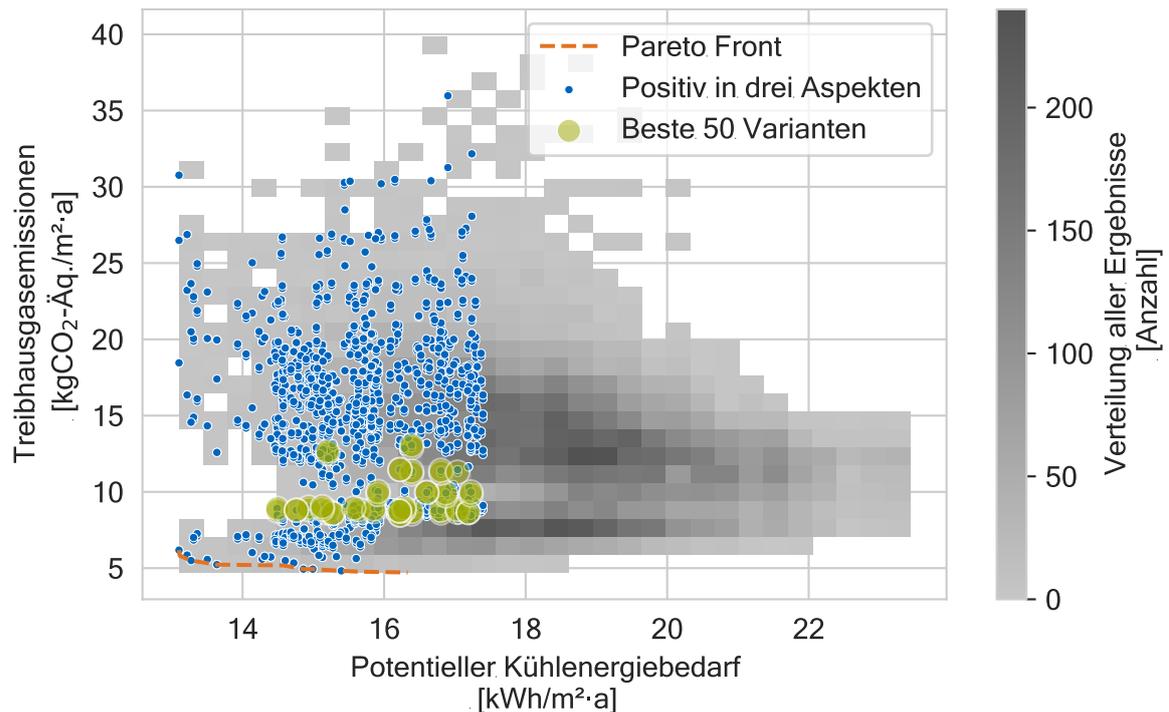


Abbildung 4.9 Gegenüberstellung von THG-Emissionen und potentiellen Kühlenergiebedarf auf Gebäudeebene mit gekennzeichneten Kombinationen, die eine positive Verbesserung in allen drei betrachteten Zielgrößen bewirken.

Allerdings stellt dieser für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen einen entscheidenden Hebel dar [169]. Verbesserungen des multikriteriellen Abschneidens zeigen sich zudem bei höheren Sanierungsstandards ($KK = 0,103$), besseren Luftdichten ($KK = 0,087$) sowie dem Einbau eines außenliegenden Sonnenschutzes ($KK = 0,078$). Alle drei Maßnahmen zielen auf einzelne Aspekte ab, nehmen aber auch Einfluss auf das Verhalten des Gebäudes in den anderen Aspekten und bieten entsprechend Möglichkeiten für multikriterielle Synergien. Dagegen zeigt die Bauweise des Gebäudes (Leicht- bzw. Massivbau) keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse ($p\text{-Wert} = 0,851$). Aufstockungen wirken sich leicht negativ auf das Abschneiden aus ($KK = -0,093$). Dies ist unter anderem auf die zusätzlich anfallenden grauen THG-Emissionen sowie den höheren potentiellen Kühlenergiebedarfen durch eine stärkere Solarexposition zurückzuführen. Bei Anbauten sind die Ergebnisse je nach gewählter Himmelsrichtung unterschiedlich. Da es sich hierbei um keine ansteigende Skala handelt, wird keine Korrelation angegeben. Aus Abbildung 4.10 (oben rechts) ist ersichtlich, dass Anbauten auf der West- oder Ostseite werden besser bewertet als auf der Nord- oder Südseite. Dies ist zum einen durch den Grundriss des Gebäudes bedingt. Anbauten nach Osten oder Westen ermöglichen den Zubau von mehr Nutzfläche und dadurch geringere flächenbezogene Kennzahlen. Zum anderen fallen die Heizwärmebedarfe von Gebäudenutzflächen an der Nordseite meist schlechter aus als im Durchschnitt des Gebäudes, da dort weniger solare Gewinne auftreten. Auf der Südseite liegt hingegen eine hohe Solarexposition vor, was den potentiellen Kühlenergiebedarf erhöht. Ost- und Westseiten bieten hier ein ausgewogeneres Verhältnis, welches sich in einem besseren Abschneiden bei der multikriteriellen Synergie niederschlägt.

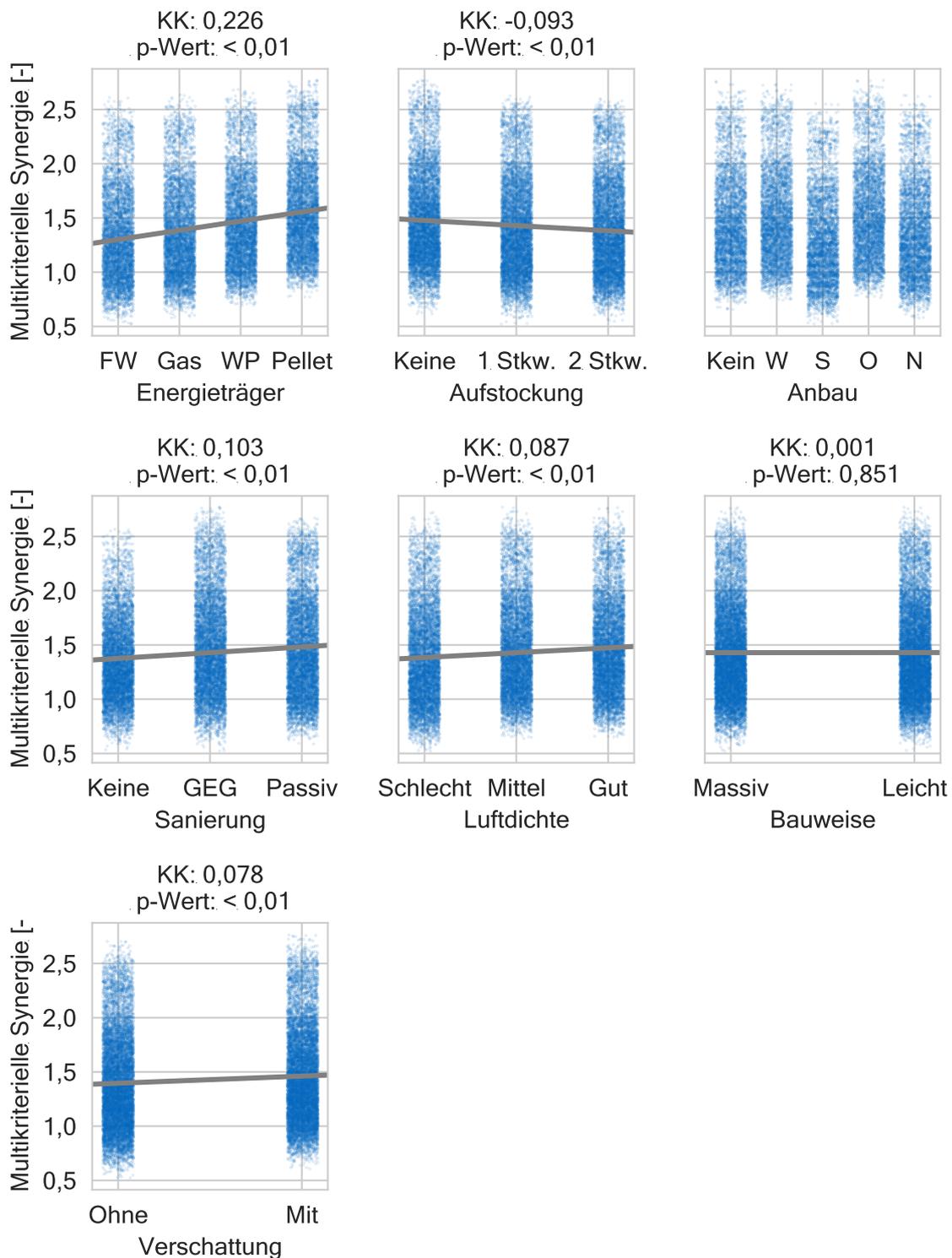


Abbildung 4.10 Pearson Korrelationskoeffizient (KK) der multikriteriellen Synergie bezogen auf die betrachteten Eingangswerte der Gebäudeebene. FW=Fernwärme, WP=Wärmepumpe, Stkw.=Stockwerk, W=West, S=Süd, O=Ost, N=Nord.

4.3 Bewertung von Synergien auf Quartiersebene

Dieses Kapitel erweitert die bisherige Bewertung von Synergien bei Einzelgebäuden auf die Quartiersebene. Dadurch gewinnen der Einbezug des Außenraums sowie die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und Vegetation an Bedeutung. Es entsteht ein räumliches Quartiersmodell, in dem Gebäudeeigenschaften und grüne Infrastruktur wie beispielsweise Bäume oder Dachbegrünung parametrisierbar sind. Dafür notwendige Daten und die untersuchten Szenarien werden in Kapitel 4.3.1 dargelegt. Anschließend beschreibt Kapitel 4.3.2 das Zusammenwirken der einzelnen Simulationsbausteine. Die Entwicklung des Simulationsmodells erfolgt anhand der in Kapitel 3.2 (sh. Seite 29) beschriebenen Schritte (1) bis (2) zur Ziel- und Variablendefinition. Dem Modellaufbau liegen die Schritte (3) bis (6) der *Urban Systems Exploration* zugrunde. Das resultierende Simulationsmodell kommt auch im Zuge der multikriteriellen Optimierung (sh. Kapitel 4.4) zum Einsatz. Da in Kapitel 4.2.3 bereits die Validität der Energiesimulation gezeigt wurde, wird in Kapitel 4.3.2 die neu hinzukommende Außenraumsimulation mithilfe von Messwerten am Standort München validiert. Die Ergebnisse werden schließlich für ausgewählte Freiheitsgrade (z. B. Baumanteil, PV Anteil, Sanierungszustand) simuliert und die Kennzahlen anhand der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren für unikriterielle (sh. Kapitel 4.3.3) sowie multikriterielle (sh. Kapitel 4.3.4) Synergie auf Quartiersebene berechnet.

4.3.1 Betrachtete Szenarien und Datengrundlage

Im Rahmen der Quartiersbewertung wird neben den auf Gebäudeebene einbezogenen Aspekten auch der thermische Außenraumkomfort berücksichtigt. Dadurch steigt die Simulationszeit im Vergleich zum Einzelgebäude deutlich an. Die Dauer eines Simulationsdurchlaufs im Quartiersmodell beträgt je nach Vegetationsdichte 15 bis 25 Minuten. Im Gebäudemodell liegt sie bei unter einer Minute. Dies schränkt die Anwendbarkeit parametrischer Methoden auf der Quartiersebene stark ein [74]. Aus diesem Grund wird die Betrachtung eines Fallstudiengebiets und die Diskussion der Übertragbarkeit als Ansatz gewählt. Das ausgewählte Quartier befindet sich in der Bayrischzeller Straße in München und stellt einen typischen Zeilenbau mit begrünten Freiflächen und angrenzender Erschließung dar (sh. Abbildung 4.11). Die zugrunde liegenden Randbedingungen sind in Tabelle A.5 im Anhang zusammengestellt (sh. Seite 151). Zur Bildung eines simulationsfähigen Quartiersmodells wird das in Kapitel 4.2 beschriebene Gebäudemodell auf die Abmessungen der Fallstudie angepasst und um die Parameter des Außenraums erweitert. Dazu zählen etwa Bäume im Freiraum, Straßenflächen sowie Dachbegrünungen. Außerdem werden PV-Anlagen auf Dächern und Fassaden in die Betrachtung integriert. Diese können durch die berücksichtigte Nachbarbebauung und Bäume verschattet werden. Die Datenaufbereitung sowie die Erstellung des Simulationsmodells folgen den Schritten (1) bis (6) der in Kapitel 3.2 entwickelten Prozesskette (sh. Abbildung 3.2, Seite 30). Die Durchführung der einzelnen Schritte wird im Folgenden detailliert erläutert.

Schritt 1: Zieldefinition

Als KPIs dienen die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, die Lebenszykluskosten und der thermische Außenraumkomfort. Deren Ermittlung und Bezugsgrößen werden im Folgenden dargelegt. Eine detaillierte Darstellung der Berechnungsrandbedingungen erfolgt gemeinsam mit den Planungsvariablen in Schritt (2).

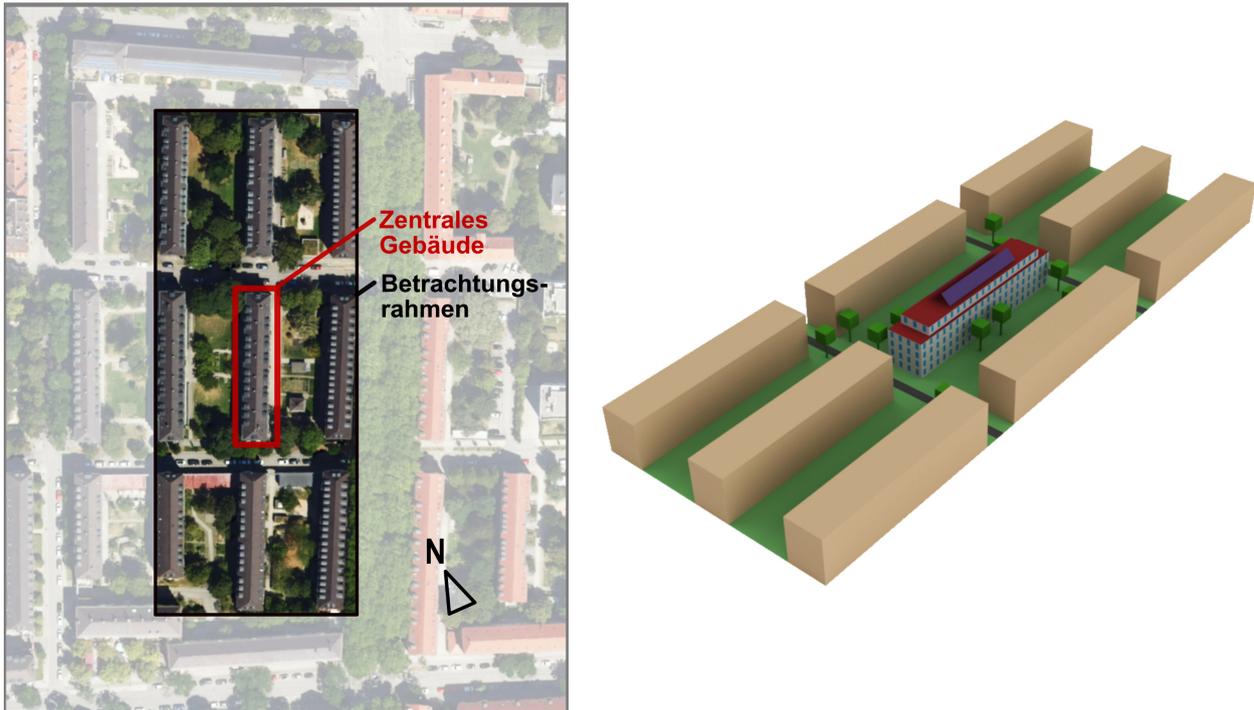


Abbildung 4.11 Fallstudiengbiet für die Quartiersuntersuchung in der Bayrischzeller Straße, München (links, Quelle: Bayern Atlas [184]). Vereinfachte Darstellung im Simulationsmodell (rechts).

Die Berechnung der THG-Emissionen über den 50-jährigen Gebäudelebenszyklus basiert auf flächenbezogenen Bauteilwerten und Emissionsfaktoren für die Betriebsphase. Zudem fließt der Austausch bestehender Bauteile abhängig vom jeweiligen Alter der Gebäude ein. Dieser Bestandserhalt kann für die Lebenszyklusbewertung von Sanierungen relevant sein [185]. Der lebenszyklusbasierte Ansatz ist besonders für die Bewertung von intensiven Sanierungsszenarien wie dem Passivhausstandard wichtig, da dabei die mit den Dämmstoffen verbundenen grauen Emissionen aus der Produktion und dem End-of-Life einen großen Anteil an der gesamten Umweltwirkung eines Bauvorhabens einnehmen können [31]. Der resultierende KPI des CO₂-Äquivalents pro m² NGF stellt den ökologischen Zielwert des Modells dar.

Zur Ermittlung der Lebenszykluskosten werden den zu sanierenden Bauteilen, den Energiebedarfen, der Vegetation und den PV Flächen Kostenkennwerte zugewiesen. Ebenso erfolgt die Ermittlung des Barwerts und die Integration der Preissteigerung, um eine möglichst ganzheitliche Kostenbewertung zu erreichen. Die Lebenszykluskosten pro m² NGF stellen den ökonomischen KPI dar. Die konkreten Berechnungsschritte werden im Zuge von Schritt (2) erläutert.

Um die Hitzebelastung im Außenraum zu quantifizieren, wird aus dem zugrunde liegenden stündlichen Wetterdatensatz die hitzeintensivste Stunde ermittelt. Hitzestress wird nicht nur von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit bestimmt, sondern beispielsweise auch von der Oberflächentemperatur, der solaren Einstrahlung und den lokalen Windgeschwindigkeiten. Der UTCI ist für diese Bewertung geeignet, da er die genannten Einflüsse mit einbezieht [139]. Dieser stellt somit den sozialen KPI der Untersuchung dar.

Schritt 2: Variablendefinition

Nachdem die KPIs des Modells festgelegt sind, werden im nächsten Schritt die Designvariablen eingeführt und erläutert. Insgesamt wurden dabei 14 Inputs identifiziert, deren Relevanz in der Quartiersplanung im Zuge von Expert:inneninterviews verifiziert werden konnte (sh. Kapitel 5). Die Designparameter sind in Tabelle 4.4 zusammengestellt. Tabelle 4.4 zeigt ebenfalls die zur parametrischen Untersuchung der Synergiekennzahlen verwendeten Optionen. Die als fixiert gekennzeichneten Inputs werden im Rahmen der Synergiebewertung nicht variiert. Für variable Parameter sind die verwendeten Optionen angegeben. In der späteren multikriteriellen Optimierung (sh. Kapitel 4.4) werden diese Fixierungen aufgehoben und alle Parameter stellen kontinuierliche Größen dar. Neben den Inputs in Tabelle 4.4 wird im Zuge der Synergieberechnung der Sanierungszustand als Variable mit den Varianten GEG und PH definiert. In der späteren Trade-off Untersuchung wird ausschließlich der PH Standard verwendet.

Tabelle 4.4 Inputs für die parametrische Quartiersimulation zur Berechnung der Synergiekennzahlen.

Simulationsparameter	Einheit	Art	Optionen
Baumanteil	[%]	Parametrisch	0; 25; 50; 75; 100
Baumkronendurchmesser	[m]	Fixiert	5
Baumhöhe	[m]	Fixiert	5
Baumkronentransparenz Sommer	[%]	Fixiert	10
Baumkronentransparenz Winter	[%]	Fixiert	70
PV Anteil Dach	[%]	Parametrisch	0; 50; 100
PV Anteil Südfassade	[%]	Fixiert	0
PV Anteil Ost-West Fassaden	[%]	Parametrisch	0; 50; 100
PV Batteriekapazität	[kWh]	Fixiert	25
Gründachdicke	[m]	Parametrisch	0,00; 0,15
Fensterflächenanteil	[%]	Fixiert	24
Energiedurchlassgrad Fenster	[-]	Fixiert	0,70
Albedo Fassade	[-]	Fixiert	0,40
Straßenbreite	[m]	Parametrisch	3,0; 5,5

Der Baumanteil gibt den Prozentsatz der möglichen Baumstandorte des Quartiers an, die tatsächlich mit Bäumen belegt sind. Dabei stellt die Straßenbreite zwischen den Gebäuden einen wichtigen Einflussfaktor dar, da breitere Straßen die Anzahl der möglichen Baumstandorte verringern. Die Transparenz der Baumkronen zeigt den Zustand der Belaubung im Laufe des Jahres an, wobei eine geringe Transparenz für eine dichte Belaubung steht [186]. Diese Berücksichtigung der Saisonalität ist insbesondere für die Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen wichtig [11]. Der Transparenzwert für den Sommer wird dabei im Zeitraum 1. Mai bis 31. Oktober angesetzt. Die Simulation der verbleibenden

Monate erfolgt mit dem Transparenzwert für den Winter. Es werden zwei Sanierungsszenarien für das Gebiet untersucht. Der gesetzliche Standard (GEG, [172]) stellt das Basisniveau für die Sanierungen dar, das Passivhaus (PH, [157]) einen verbesserten Standard. Für beide Szenarien wird eine Wärmepumpe (Jahresarbeitszahl = 3,0) als primäre Wärmeversorgung angenommen. Bedarfsseitig werden die Energiebedarfe für Heizung, Beleuchtung und Warmwasser berücksichtigt. Eine aktive Kühlung wird, wie in der Erstellung des Gebäudemodells erläutert (sh. Kapitel 4.2.1, Seite 37), nicht in den Gesamtenergiebedarf einbezogen. Der Prozentsatz von PV Variablen bezieht sich auf den entsprechenden Anteil der jeweils belegten Gebäudeflächen. Für die THG-Gutschrift aus exportiertem Strom erfolgt eine lineare Reduktion auf Null bis zum Bewertungsjahr 25. Dies bedeutet, dass vom Jahr 25 bis zum Jahr 50 der Lebenszyklusbewertung keine Gutschrift für Stromexporte in die Berechnung einfließt, da bis dahin von einer überwiegend regenerativen Energieversorgung im deutschen Strommix ausgegangen wird [187]. PV Flächen werden mit einem Wirkungsgrad von 22 % modelliert, was beispielsweise kristallinen Siliziumzellen oder Dünnschichttechnologien entspricht [188]. Die Neigung der PV Module auf den Dächern beträgt 30°. Es wird zudem ein Austausch der PV Module sowie zwei Austausche der Batteriespeicher über den Bilanzierungszeitraum von 50 Jahren angesetzt. Die Ökobilanzdatensätze zur Bewertung der PV-Anlagen stammen aus der Ökobaudat (Version 2020-II) [21].

Da diese LCA Datenbank nur wenige Angaben zu grüner Infrastruktur enthält, werden die im Rahmen des Forschungsprojekts *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* gebildeten Werte für Stadtbäume sowie Dachbegrünungen herangezogen [168]. Für beide Elemente werden keine CO₂ Bindungskapazitäten berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass einzelne Stadtbäume nach ihrer Fällung einer thermischen Verwertung zugeführt werden [189]. Tabelle A.6 im Anhang gibt die Ergebnisse je m² extensiver Dachbegrünung wieder, die in das Modell einfließen (sh. Seite 151). Für Stadtbäume hängen die Aufwendungen für die Pflege und die Fällung dagegen stark von der Baumgröße ab. Zur Vereinfachung wird in dieser Dissertation stets die Winterlinde (lat. *Tilia cordata*) als Stadtbaum herangezogen, da diese eine der in Städten am häufigsten vorkommenden Arten darstellt [190]. Zur Ermittlung der aus Herstellung, Pflege und Fällung einer Winterlinde resultierenden THG-Emissionen werden die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* [168] mithilfe der von Nowak et al. [191] ermittelten THG-Emissionswerte abhängig von der Baumgröße pro Jahr ermittelt und über 50 Jahre aufsummiert. Die Umrechnung von Baumgeometrien wie beispielsweise Brusthöhendurchmesser und Kronendurchmesser sowie die Gleichungen zum Baumwachstum beruhen dabei auf Rötzer et al. [192]. Die aus den Ergebnissen ermittelte Regressionsgleichung ($R^2 = 0,876$) lautet:

$$y = 0,1003x^3 + 0,2218x^2 - 6,473x + 85,19 \quad (4.1)$$

mit y THG-Emissionen für Herstellung, Pflege und Fällung einer Winterlinde
bis 50 Jahre (ohne CO₂-Bindung) [kgCO₂-Äq.]
 x Kronendurchmesser bei Fällung [m]

Neben der ökologischen Bilanzierung erfolgt auch eine Berechnung der Lebenszykluskosten des Quartiers. Als Grundlage für das Life Cycle Costing (LCC) Verfahren wird in dieser Dissertation der internationale Standard ISO 15686-5:2017 herangezogen [193]. Die Wahl der betrachteten Kostenanteile über den Lebenszyklus von Gebäuden ist dabei dem Untersuchungsrahmen anzupassen. Da diese

Dissertation die Veränderungen durch Eingriffe im Gebäudebestand untersucht, werden nur dafür relevante und im Simulationsmodell beeinflusste Kostenanteile verwendet. Zur Auswahl wird die im ISO Standard hinterlegte Übersicht herangezogen [193, S. 8]. Die gewählten Systemgrenzen sowie deren Erläuterungen und Quellen sind in Tabelle A.7 des Anhangs wiedergegeben (sh. Seite 152). Für die Berechnung der baukonstruktiven Kosten werden die zur Ökobilanzierung herangezogenen Konstruktionen mit den Kostenkennwerten des *Baupreislexikons* bzw. des *Baukostenindex* [194, 195] versehen. Die Berücksichtigung der Austauschzyklen erfolgt nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) [196]. Weiterhin wird der Rückbau von Gebäuden nach 50 Jahren Nutzungszeit berücksichtigt. Eine Berücksichtigung von Restwerten findet nicht statt. Die Lebenszykluskostenberechnung umfasst ausschließlich die Herstellung, die Wartung und die Energieversorgung der Gebäude. Die Reinigungskosten werden nicht berücksichtigt, da sie im Quartiersmodell unbeeinflusst bleiben. Die Kosten für den Strombezug werden auf den durchschnittlichen Haushaltspreis des ersten Halbjahres 2023 von 0,4229 € je kWh gesetzt [197]. Exportierter PV Strom wird gemäß Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) je nach Anlagengröße mit 0,082 bis 0,058 € je kWh gutgeschrieben [198]. Zudem werden eine Preissteigerung von 5 % pro Jahr für die Energiepreise, 2 % pro Jahr für die Bauleistungen und ein Diskontierungszinssatz von 1,5 % gemäß dem Steckbrief *Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus* nach dem BNB angesetzt [199]. Neben den baukonstruktiven Elementen fließen die Kosten für die Herstellung und die Pflege der grünen Infrastruktur in die Berechnung ein. Dafür verwendete Kostenwerte sowie dazugehörige Quellen sind in Tabelle A.8 im Anhang zusammengestellt (sh. Seite 153). Weitere Randbedingungen für die Quartiersimulation sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.5 Randbedingungen für das Simulationsmodell auf Quartiersebene.

Simulationsparameter	Input	Quelle
U-Werte [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]	Ausgangsfall: 1,60; 1,00; 1,00; 2,60	[150]
Wand; Dach; Boden; Fenster	Szenario 1 (GEG): 0,24; 0,20; 0,30; 1,30 Szenario 2 (PH): 0,15; 0,15; 0,15; 0,70	[172] [157]
Solltemperatur Heizen	20 °C	[176]
Wärmelasten [Personen / m^2]	0,025	[176]
Beleuchtung [W/m^2]	2,0 bei 300 LUX Setpoint	-
Warmwasser [$\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$]	0,07	[200]
Belegung	Wochentags: 17 bis 7 Uhr Wochenende: ganztags	-
Infiltration [h^{-1} bei 50 Pascal]	Bestand: 4,5; GEG: 1,5; PH: 0,6	[157, 201]
Luftwechselrate [h^{-1}]	Bestand und GEG: 0,5; PH: 0,3	[157, 176]
PV Effizienz [%]	Anlage: 22; Batteriespeicher: 70	[188]
LCA Dämmmaterial [-]	Eco Standard	[168]
Belaubungszustände	Sommer: Mai bis Oktober Winter: November bis April	-
Anthropogene Abwärme $Q_{f, \max}$ [W/m^2]	Sommer: 30,58; Winter: 39,95 40 % davon auf Verkehr zurückzuführen	[202]

4.3.2 Simulationsmodell und Validierung auf Quartiersebene

Nachdem Zielgrößen und Eingriffsmöglichkeiten definiert sind, wird anhand der Prozessschritte (3) bis (6) das Vorgehen bis zum vernetzten und simulierbaren Quartiersmodell beschrieben.

Schritt 3: Identifikation der Simulationskomponenten

Zur Auswahl konkreter Simulationskomponenten muss zunächst die jeweils geeignete Bewertungsebene der betrachteten Zielgrößen festgelegt werden. Insbesondere für die Ökobilanzierung von Quartieren eignet sich ein typologiebasierter Ansatz, mit dem auf vergleichbare Gebäude des Quartiers geschlossen werden kann [24]. Die Energiesimulation, die LCA- und die LCC-Berechnungen werden daher nur für das zentrale Gebäude, allerdings unter Berücksichtigung der Umgebung, durchgeführt. Die jeweiligen Ergebnisse können stellvertretend für die untersuchte Quartierstypologie herangezogen werden. Die Simulation des Außenraumkomforts erfolgt für das gesamte Fallstudiengebiet. Die Zielgröße ist der UTCI, welcher als Mittelwert über mehrere Standorte im Außenraum gebildet wird. Das detaillierte Vorgehen wird im Zuge der Identifikation von Interaktionen im Schritt (4) näher erläutert. Nachdem die relevanten Betrachtungsebenen identifiziert wurden, erfolgt die Auswahl von Simulationskomponenten. Diese müssen für die jeweiligen Ebenen sowie die zugehörigen KPIs anwendbar sein.

Für Energiesimulationen auf Quartiersebene wird meist ein Einzonenmodell verwendet, wofür Energy Plus gute Rechenzeiten bietet und bereits in anderen Arbeiten auf der Quartiersebene eingesetzt wurde [76]. Die Rahmenbedingungen werden dabei analog zur Gebäudefallstudie (sh. Kapitel 4.2.3, Seite 43) angesetzt. Zusätzlich wird eine PV-Anlage berücksichtigt, deren Simulation mithilfe des Climate Studio Plug-Ins erfolgt [143]. Der stündliche Abgleich von Strombedarfen für die Wärmepumpe, die Beleuchtung sowie die Erzeugung von Warmwasser mit dem generierten PV Strom ermöglicht eine detaillierte Ermittlung von im Gebäude genutzter und an das öffentliche Stromnetz abgegebener Energie.

Die Integration von Bäumen erfolgt in Simulationsmodellen häufig in Form vereinfachter statischer Geometrien. Dabei stellt beispielsweise Sharifi fest, dass die Wahl der Baumart die durch grüne Infrastruktur hervorgerufenen Wechselwirkungen und Trade-offs maßgeblich beeinflussen kann [10]. Im Rahmen dieser Dissertation werden Bäume in unterschiedlichen Repräsentationsstufen für die eingesetzten Simulationsbausteine berücksichtigt. In der Energiesimulation werden Bäume über geometrische Ausschnitte dargestellt, da die detaillierte Berücksichtigung von Bäumen in Strahlungssimulationen aufgrund vorherrschender Reflexionen und kleinteiliger Strukturen zu enorm hohen Rechenzeiten führen würde [203]. Den vereinfachten Baumgeometrien werden oft saisonale Transparenzwerte zugewiesen, die den Strahlungsdurchlass je nach Belaubungszustand abbilden. Das dafür notwendige Strahlungsmodell ist allerdings bei einer hohen Anzahl an Bäumen mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden, weshalb für die Quartiersfallstudie eine alternative Baumdarstellung verwendet wird. Dabei werden Baumkronen mittels mehrerer Teilflächen integriert, deren Abstände je nach Belaubungszustand variieren. Für diese Art der Darstellung wurde in einem durch den Autor dieser Dissertation verfassten Konferenzbeitrag gezeigt, dass eine gute Übereinstimmung bei gleichzeitig deutlicher Reduktion der Simulationszeiten möglich ist ($R^2 = 0,998$ für die Bewertung von Heizwärmebedarfen) [204]. Der gerin-

ge Anteil indirekter im Verhältnis zu direkter Strahlung bei der Verschattung durch Bäume zählt zu den Hauptgründen für die Anwendbarkeit dieser Vereinfachung [203].

Das Baumwachstum und damit die Verschattungs- und Verdunstungsleistung wird zudem erheblich durch die Verfügbarkeit von Wasser und damit dem Grad der Versiegelung im Quartier beeinflusst. Dieser Effekt wird in Form eines Korrekturfaktors für den Kronendurchmesser nach 50 Jahren Wachstum berücksichtigt. Der Faktor wurde mithilfe des CityTree Modells nach Rötzer et al. [192] ermittelt und wird dem theoretischen Kronendurchmesser bei optimalen Wuchsbedingungen (keine Versiegelung) aufgeschlagen. Dadurch können Versiegelungsverhältnisse im Quartier und damit der unmittelbare Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf das Baumwachstum berücksichtigt werden. Zur Implementierung im Simulationsmodell wurde für den Korrekturfaktor folgende Regressionsgleichung ($R^2 = 0,997$) ermittelt:

$$y = 0,9692x^3 - 1,6793x^2 + 0,2472x + 0,9954 \quad (4.2)$$

mit y Korrekturfaktor Kronendurchmesser nach 50 Jahren Wachstum [-]
 x Grad der Versiegelung [%]

Zur Integration des UHI Effekts wird der Urban Weather Generator (UWG) eingesetzt. Da für Energiesimulationen meist Wetterdatensätze von Standorten außerhalb des urbanen Raums (häufig Flughafen-daten aufgrund qualitativ hochwertiger Messinstrumente) herangezogen werden, ist dieser Schritt notwendig, um die Wärmespeicherung innerhalb des Stadtgebietes zu berücksichtigen. Der UWG bietet für frühe Planungsstadien mit geringem Informationsgehalt eine ausreichend detaillierte Möglichkeit, Wetterdateien mit dem urbanen Wärmeinseleffekt zu beaufschlagen [205]. Dabei werden beispielsweise Parameter wie bauliche Dichte, grüne Infrastruktur und die Wärmeabgabe durch Gebäude und Verkehr in ein Energiemodell des urbanen Raums einbezogen und damit resultierende Abweichungen zwischen Stadt und Land ermittelt [142]. Der UWG spielt dementsprechend eine entscheidende Rolle für die Kopplung von Gebäude- und Außenraumsimulation. Die daraus resultierenden Wetterdaten nehmen Einfluss auf die Bewertung des thermischen Außenraumkomforts sowie auf den Gebäudeenergiebedarf. Um die Validität dieses Simulationsbausteins zu sichern, wurde im Rahmen einer unter anderem durch den Autor dieser Dissertation betreuten Masterarbeit ein Vergleich zwischen mittels UWG simulierten und gemessenen Temperaturwerten durchgeführt [206]. Die verwendeten Messdaten stammen aus dem Projekt *100Places:M* des Zentrums für Stadtnatur und Klimaanpassung [207]. Für die Validierung im Zuge dieser Dissertation wurden die Daten am Standort Bordeauxplatz in München verwendet. Die urbanen Parameter (z. B. bauliche Dichte, Gebäudehöhen, Vegetation) wurden in einem Radius von 500 m um den Messstandort ermittelt und anschließend mithilfe des UWG simuliert. Den Ergebnissen kann eine, um den UHI korrigierte, Lufttemperatur entnommen werden. Diese wird den Messdaten am urbanen Standort, sowie den Messdaten am Standort des als Grundlage verwendeten Wetterdatensatzes (Flughafen München) gegenübergestellt. Abbildung 4.12 (links) zeigt die Übereinstimmung für den unveränderten Wetterdatensatz des Flughafens mit den gemessenen Werten am Bordeauxplatz. Der R^2 Wert liegt bei 0,66. Dagegen steigt die Übereinstimmung durch die Anwendung des UWG auf $R^2 = 0,91$ an (sh. Abbildung 4.12, rechts). Obwohl die Simulation den UHI Effekt in zahlreichen Datenpunkten als zu gering bewertet, verbessert sich die Übereinstimmung der simulierten Daten im Vergleich zu den Flughafendaten deutlich. Eine Überschätzung des UHI Effekts tritt

nach der UWG Simulation hingegen kaum noch auf. Es konnte zudem gezeigt werden, dass bereits ab Betrachtungsradien von weniger als 100 m eine ausreichend genaue Erfassung der urbanen Strukturen für die Verwendung des UWG gegeben ist [206]. Dementsprechend werden die in dieser Dissertation definierten Abmessungen des Quartiersmodells als ausreichend angesehen. Eine valide Verwendung des UWG im Rahmen der Quartiersfallstudie ist damit nachgewiesen.

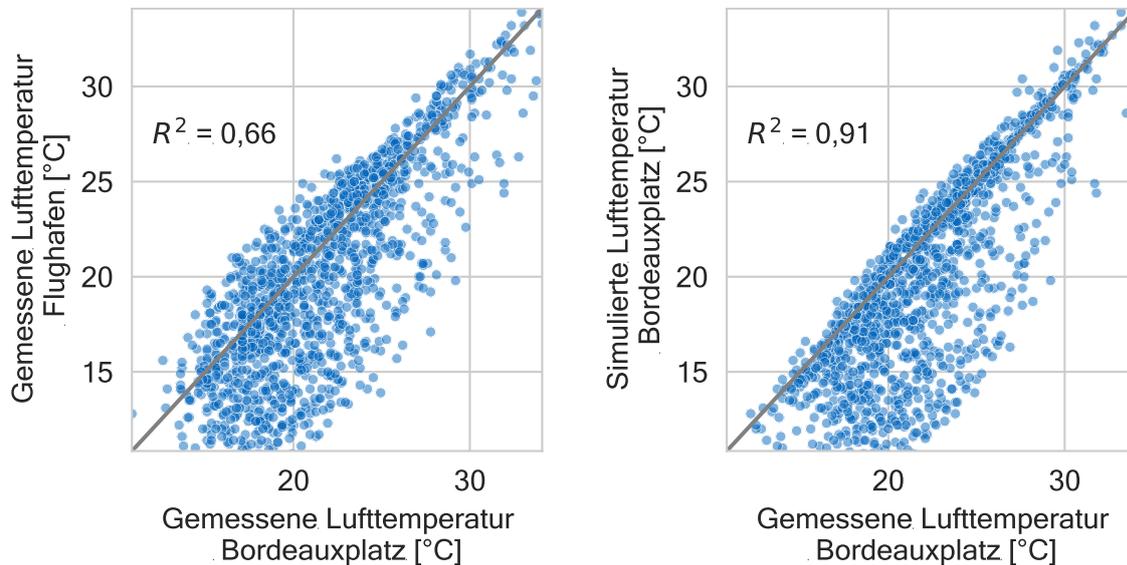


Abbildung 4.12 Validierung der UWG Simulationen zur Bewertung des UHI Effekts. Eigene Darstellung basierend auf den Ergebnissen der Masterarbeit von Bezha [206].

Zur Ermittlung des thermischen Außenraumkomforts sind die durch den UWG generierten Daten alleine nicht ausreichend. Für diesen Bewertungsschritt wird die Kennzahl UTCI verwendet. Diese gibt die empfundene Temperatur im Außenraum an und berücksichtigt dabei neben Lufttemperatur und Luftfeuchte auch lokale Windverhältnisse und Bekleidungszustände. Für die Berechnung des UTCI wird die von Ladybug Tools bereitgestellte Grasshopper Komponente verwendet [141]. So kann eine realitätsnahe Quantifizierung von sommerlichem Hitzestress umgesetzt werden. Die Simulation der einfließenden Windgeschwindigkeiten erfordert allerdings große Rechenkapazitäten, was einer hohen Anzahl an Simulationsdurchläufen entgegensteht. Daher muss ein Ansatz gewählt werden, der einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand darstellt. Hierfür wird die FFD Methode eingesetzt, da diese für wenig komplexe Geometrien hinreichend exakte Ergebnisse liefert [75]. Um darin die Ansätze von Turbulenz zu berücksichtigen, werden zudem die Werte der Luftviskosität erhöht, was realitätsnähere Ergebnissen erwarten lässt, obwohl die Methode selbst im Gegensatz zu Computational Fluid Dynamics (CFD) über kein Turbulenzmodell verfügt [144]. Eine Validierung liegt außerhalb des Rahmens dieser Dissertation, zumal diese nur selten über Feldmessdaten erfolgen kann. Hierfür werden in der Regel Windkanalexperimente herangezogen [75]. Da Wind im Quartiersmodell nur in den Außenraumkomfort einfließt, wird sein Einfluss als gering bewertet, da der UTCI eine geringe Sensitivität gegenüber niedrigen Windgeschwindigkeiten bei hohen Lufttemperaturen aufweist [208, 209]. Die Verwendung von FFD im Rahmen des beschriebenen Simulationsmodells wird daher als angemessen eingeschätzt.

Schritt 4: Identifikation von Interaktionen

Da mehrere Simulationskerne bzw. Plug-Ins zur Berechnung des vernetzten Quartiersmodells genutzt werden, ist ein Kopplungsansatz innerhalb der Grasshopper-Umgebung notwendig. Die drei KPIs (THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischer Außenraumkomfort) sind dabei nicht unabhängig voneinander, sondern tauschen sich dynamisch aus und basieren teilweise auf identischen Inputs. Eine Literaturrecherche zu Wechselwirkungen zwischen den Simulationskomponenten ergab unter anderem einen starken Zusammenhang von städtischer Vegetation, ihrem potentiellen Kühleffekt bei lokalen Hitzeinseln und dem Energiebedarf von Gebäuden [162, 204]. Um diese Interaktionen im Modell zu berücksichtigen, wurde bereits der UWG als hilfreiches Tool eingeführt und für die Fallstudie validiert. Weitere identifizierte Interaktionen zwischen den genannten Simulationsbestandteilen sind in Tabelle 4.6 beschrieben. Diese dienen im Folgenden als konzeptionelle Grundlage für die Herstellung von Datenschnittstellen im Modell.

Tabelle 4.6 Interaktionen zur Berücksichtigung im vernetzten Quartiersmodell.

Interaktion	Erläuterung	Quellen
Geometrie – Energiebedarf	Erhöhung der Kompaktheit von Gebäuden bzw. Quartieren hat einen positiven Einfluss auf den Energiebedarf	[43, 44, 77]
Mikroklima – Energiebedarf	Änderung von Heiz- und Kühlenergiebedarfen bei Berücksichtigung von mikroklimatischen Verhältnissen	[51, 77, 210]
Dichte – Solarertrag	Eingeschränktes Potential für Solarnutzung in dicht besiedelten Quartieren	[42]
Dichte – Energie	Gegenseitige Verschattung von Gebäuden beeinflusst Energiebedarf	[53, 54, 77]
Grün – Energie	Schattenwürfe durch grüne Infrastruktur verringern Solar- und PV Erträge	[10, 204]
Grün – Straßen	Mehr Straßenflächen reduzieren die für Begrünung verfügbaren Flächen	[10]
Grün – Wärmeinseln	Abminderung des urbanen Wärmeinseleffekts durch Grüne Infrastruktur	[57]

Schritt 5: Informationsaustausch prüfen

Da alle in Schritt (3) beschriebenen Komponenten innerhalb der Grasshopper Umgebung gewählt wurden, ist ein Datenaustausch weitestgehend problemlos möglich. Die Verknüpfung einiger Simulationskomponenten erfordert eigens dafür programmierte Python Implementierungen, welche die Outputs in die geforderten Datenformate von nachfolgenden Komponenten überführen. Dieser Datentransfer kann innerhalb des Gesamtmodells erfolgen und benötigt keine externe Schnittstelle. Daher ist in diesem Schritt keine Änderung an den in Schritt (3) dargelegten Simulationskomponenten notwendig.

Schritt 6: Informationsaustausch implementieren

Die Grasshopper-Umgebung bietet zahlreiche gebrauchsfertige Lösungen für den Austausch von Informationen zwischen Simulationskomponenten. Durch die zusätzliche Implementierung von Python Schnittstellen ist es möglich, Daten aus einer Simulationsausgabe in das richtige Format für nachfolgende Komponenten zu transformieren. Abbildung 4.13 veranschaulicht den vereinfachten Informationsfluss im finalen Simulationsmodell.

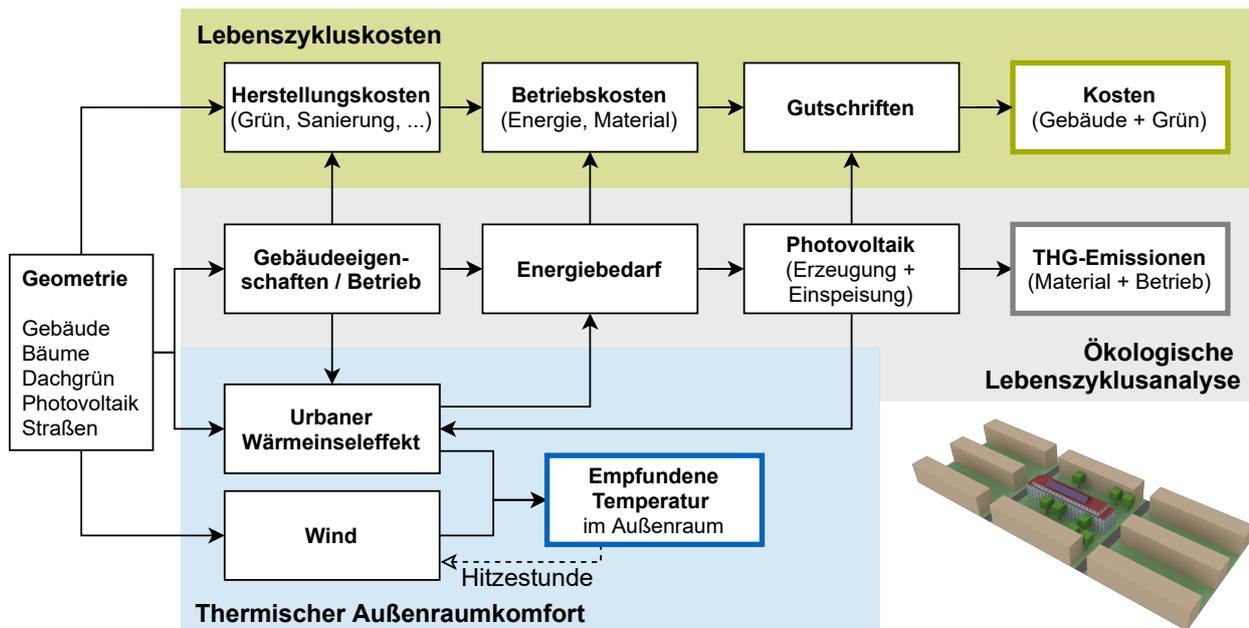


Abbildung 4.13 Vereinfachte Darstellung der Informationsflüsse im vernetzten Quartiersmodell.

Zunächst werden die Geometrien innerhalb des Quartiers erstellt. Dies schließt Gebäude, Straßen, Rasenflächen, PV Flächen und Bäume ein. Nach der Erzeugung von Basisgeometrien werden die Daten zum Einbezug des UHI Effekts extrahiert. Dazu zählen etwa die bauliche Dichte, die energetische Qualität der Gebäude oder die Grünflächenanteile. Der UWG generiert daraus eine lokal angepasste Wetterdatei, die den UHI im simulierten Gebiet erfasst. Diese lokale Wetterdatei dient als Grundlage für die anschließende Energiesimulation des zentralen Gebäudes in Energy Plus. Dabei werden unter anderem die festgelegten Materialien, die Sanierungsstandards und die Nutzungsprofile berücksichtigt. Die Nachbargebäude stellen in der Energiesimulation vollständig opake Elemente dar, während den Bäumen je nach ihrem Belaubungszustand über das Jahr hinweg unterschiedliche Transparenzen zugewiesen werden. Der daraus resultierende Energiebedarf der Gebäude wird stündlich als Lastprofil in die PV Komponente von Climate Studio übertragen, wobei die Anteile selbst verbrauchter und exportierter Energie bestimmt werden. Gebäude und Bäume fließen in der PV Simulation ebenfalls als Verschattungsobjekte ein. Die Zusammenführung mit den in Kapitel 4.3.1 erläuterten LCA Datensätzen für die Bauteile und den Gebäudebetrieb sowie die dynamische Berücksichtigung der Gutschriften für exportierten PV Strom erfolgt über eigens dafür programmierte Python Implementierungen direkt im Modell. Als Ergebnis können die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen je m² NGF und Jahr exportiert werden.

Der Informationsaustausch für die LCC gleicht in weiten Teilen der LCA und beruht ebenso auf den Ergebnissen der Energiesimulation. Neben den Energiebedarfen werden die Bauteile mit den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Kostenkennwerten versehen und direkt im Modell mit den Bauteilflächen multipliziert (sh. Seite 53). Die Vergütung für exportierten Strom ist dabei abhängig von der Anlagengröße und basiert auf den Vorgaben des EEG. Es resultiert der KPI Lebenszykluskosten in € je m² NGF.

Aufgrund der rechenintensiven Windsimulation ist die Auswertung mehrerer Stunden für die detaillierte Ermittlung des thermischen Außenraumkomforts nicht umsetzbar. Um den Einfluss von Bäumen und Gebäuden auf die Windverhältnisse trotzdem zu integrieren, wird aus dem gesamten Wetterdatensatz eine Vorauswahl getroffen, um die Stunde mit der höchsten thermischen Belastung für die weitere Windanalyse zu identifizieren. Dabei besteht das Problem, dass die thermische Behaglichkeit im Außenraum in der Regel für einzelne Positionen im Modell ermittelt wird und daher anfällig für lokale Extremwerte ist. Diese treten etwa dann auf, wenn die betrachtete Position zur relevanten Stunde im Schatten eines Gebäudes liegt. Um die Auswirkungen dieser dynamischen Schattenwürfe während der gewählten Stunde zu minimieren, werden 15 Rasterpunkte regelmäßig um das zentrale Gebäude in einer Höhe von 1,2 m verteilt. Für diese Rasterpunkte werden die geometrisch relevanten Parameter, wie z. B. der Sky-View-Faktor, ermittelt. Anschließend wird die mittlere Strahlungstemperatur (Mean Radiant Temperature, MRT) an jedem dieser Punkte berechnet. Schließlich wird der UTCI für jeden Gitterpunkt zu jeder Tagesstunde zwischen Mai und August bestimmt. Die Ergebnisse der Rasterpunkte werden im Anschluss gemittelt, was zu einem UTCI Wert für jede Stunde führt. Daraus wird der Zeitpunkt mit dem höchsten durchschnittlichen UTCI im Betrachtungszeitraum ausgewählt. Dieser stellt im Hinblick auf sommerlichen Hitzestress den kritischsten Fall für das betrachtete Quartier dar und wird daher mithilfe der Windsimulation näher analysiert. Die Windgeschwindigkeit und -richtung der ermittelten Stunde werden dafür aus den Wetterdaten extrahiert. Sie dienen als Eingaben für die FFD basierte Windsimulation [144]. Die dabei simulierten Windgeschwindigkeiten für jeden der 15 Rasterpunkte werden mit den anderen lokalen Berechnungsparametern (Lufttemperatur, Strahlungstemperaturen, relative Luftfeuchtigkeit) kombiniert. Dies führt zu den endgültigen UTCI Ergebnissen der Rasterpunkte im Quartier. Die Durchschnittsbildung über diese Ergebnisse liefert den KPI für den thermischen Außenraumkomfort in Grad Celsius.

Damit ist das gekoppelte Simulationsmodell fertiggestellt und kann sowohl zur Untersuchung der Synergien in diesem Kapitel als auch in der MOO Werkzeugkette (sh. Kapitel 4.4) verwendet werden. Da die Untersuchung der Synergiepotentiale einem parametrischen Ansatz folgt, ist an dieser Stelle kein weiterer Austausch von Informationen zwischen Simulations- und Optimierungsumgebung erforderlich. Die Ergebnisse werden innerhalb der Grasshopper Umgebung simuliert und ausgelesen. Die definierten KPIs können mithilfe des Colibri Plug-Ins [145] in ein übertragbares Dateiformat exportiert und abgespeichert werden. Die Beschreibung des Datenaustauschs mit einer Optimierungsumgebung erfolgt in Kapitel 4.4. Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Simulationsmodell steht frei zur Verfügung. Nähere Informationen hierzu können Anhang C entnommen werden.

4.3.3 Ergebnisse unikriterielle Synergie auf Quartiersebene

Die Ergebnisverteilungen der unikriteriellen Synergieberechnung nach Gleichung 3.1 (sh. Seite 26) sind für das Fallstudienquartier in Abbildung 4.14 dargestellt. Es werden die vier Aspekte THG-Emissionen, Heizwärmebedarf, Lebenszykluskosten und thermischer Innenraumkomfort betrachtet. Der thermische Außenraumkomfort wird nicht dargestellt, da sich für die gewählten Parametervariationen nur Ergebnisse der unikriteriellen Synergie im Bereich von $\pm 1\%$ ergaben. Analog zum potentiellen Kühlenergiebedarf auf Gebäudeebene (sh. Kapitel 4.2.4, Seite 46) zeigt sich auf Quartiersebene nur beim thermischen Innenraumkomfort ein wesentlicher unikriterieller Synergieeffekt. Die Ursache hierfür liegt erneut in der Verschlechterung dieses Aspekts durch einige der einbezogenen Maßnahmen. Für die verbleibenden drei Aspekte spielt die Synergie aus Maßnahmenkombinationen nur eine untergeordnete Rolle, auch wenn die maximalen Ausschläge für beispielsweise den Heizwärmebedarf mit 7,2% höher ausfallen als auf Gebäudeebene (1,3%). Es liegt daher nahe, dass auf Quartiersebene eine stärkere Interaktion zwischen den betrachteten Maßnahmen stattfindet. Dies ist unter anderem auf den Einbezug des Außenraums sowie der Nachbarbebauung zurückzuführen, wodurch dadurch hervorgerufene Wechselwirkungen im betrachteten Quartier Berücksichtigung finden und zu Positiveffekten führen können [125, 211]. Daher wird die Verwendung der Quartiersebene und darüber hinausgehender Skalen bei der Betrachtung von Wechselwirkungen in der gebauten Umwelt in der Literatur zunehmend gefordert [37]. Die Ergebnisse der Fallstudie dieser Dissertation unterstreichen diese Forderung und legen den Grundstein für eine Bewertung von unikriterieller Synergie in weiteren Zielaspekten.

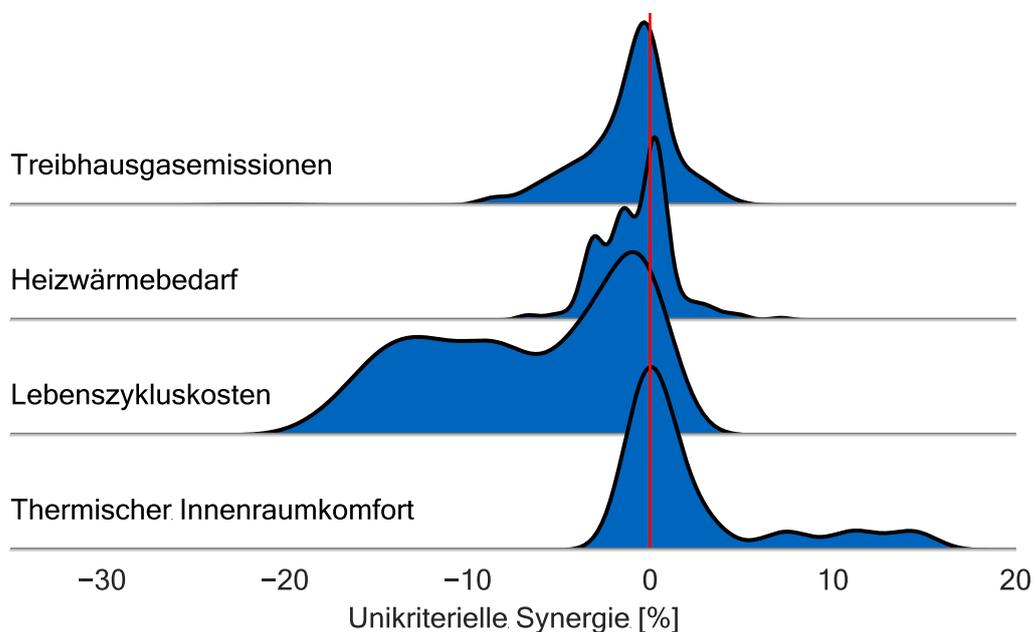


Abbildung 4.14 Verteilung der Ergebnisse für die unikriterielle Synergie der Zielaspekte auf Quartiersebene. Die rechts der Nulllinie liegende Werte erzielen einen positiven unikriteriellen Synergieeffekt.

In Bezug auf die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen ist festzustellen, dass 142 von 539 Kombinationen ein positives Ergebnis bei der unikriteriellen Synergie erreichen. Das Maximum liegt bei 4,7% und der Durchschnitt aller positiv abschneidenden Szenarien bei 1,3%. Die prozentualen Angaben sind jeweils auf den Ausgangsfall bezogen und entsprechen einer absoluten Wirkung der unikriteriellen

len Synergie auf Quartiersebene von maximal 0,56 kgCO₂-Äq./m²·a bzw. durchschnittlich 0,15 kgCO₂-Äq./m²·a. Tabelle 4.7 stellt den Anteil der Szenarien, die ein positives Ergebnis für die unikriterielle Synergie aufweisen, dem entsprechenden Anteil auf der Gebäudeebene gegenüber. Die Ergebnisse zeigen, dass ein positiver Effekt innerhalb der betrachteten Fallstudien zwar vorhanden ist, allerdings in mehr als 99 % der untersuchten Fälle nur einen geringfügigen Einfluss auf das Gesamtergebnis der THG-Emissionen nimmt ($S_{uni} < 5\%$).

Tabelle 4.7 Anteil der Szenarien mit einem positiven Ergebnis der unikriteriellen Synergie je Betrachtungsebene.

Betrachtungsebene	Anteil $S_{uni} > 0\%$	Anteil $S_{uni} > 5\%$
Gebäudeebene	2,90 %	0,01 %
Quartierebene	26,35 %	0,56 %

Für den thermischen Innenraumkomfort bestehen dagegen vielfältige Möglichkeiten, negative Nebenwirkungen durch das synergetische Wirken von Zusatzmaßnahmen zu reduzieren. Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass insbesondere bei hohen Sanierungsstandards große Potentiale zur Erzielung von unikriterieller Synergie vorliegen (sh. Abbildung 4.15). Dies ist unter anderem auf die negativen Auswirkungen der erhöhten Luftdichtigkeit des Gebäudes bei Sanierungen zurückzuführen. Dadurch liegt ein verringerter Luftwechsel zwischen Innen- und Außenraum vor, was zu einer Erhöhung der Innenraumtemperaturen und damit einer Verschlechterung des thermischen Innenraumkomforts führen kann. Basierend auf den Ergebnissen bietet sich die Kombination von Sanierung mit anderen Maßnahmen wie beispielsweise der Begrünung von Außenräumen an, um diese negativen Folgen abzumildern. Abbildung 4.15 zeigt zudem einen leicht positiven Effekt geringerer Straßenbreiten auf das unikriterielle Synergiepotential hinsichtlich des thermischen Innenraumkomforts. Bei einer Straßenbreite von drei Metern werden 134 positive Ergebnisse erzielt, bei 5,5 Metern 124. Dies kann auf die Wechselwirkung zwischen der versiegelten Fläche und der Verschattung durch Bäume zurückgeführt werden. Je mehr Flächenversiegelung in einem Quartier vorherrscht, desto weniger mögliche Baumstandorte stehen zur Verfügung. Zusätzlich verringert sich die Wasserverfügbarkeit für die Bäume. Dies hemmt deren Kronenwachstum. Dementsprechend reduziert sich die verschattende Wirkung auf das Gebäude, was das unikriterielle Synergiepotential mit Blick auf den thermischen Innenraumkomfort negativ beeinflusst.

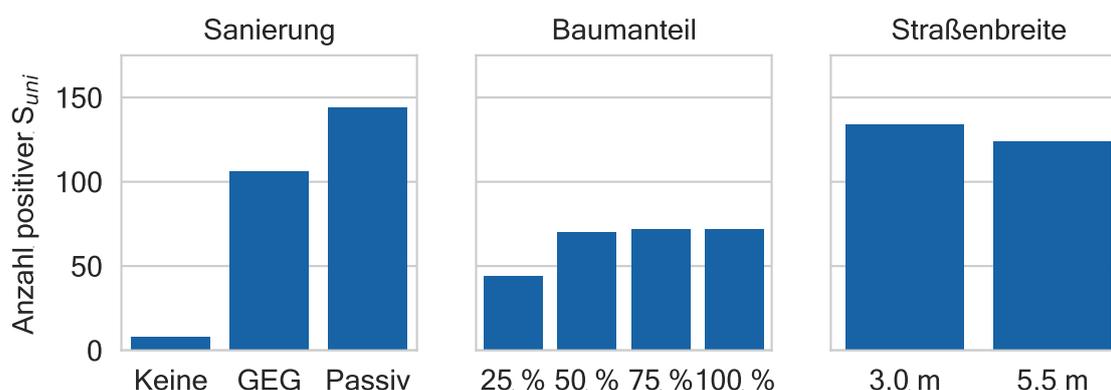


Abbildung 4.15 Anzahl positiver Ergebnisse für S_{uni} bezogen auf den thermischen Innenraumkomfort.

4.3.4 Ergebnisse multikriterielle Synergie auf Quartiersebene

Die Anwendung der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Methode zur multikriteriellen Synergiebewertung (sh. Seite 27) auf die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, die Lebenszykluskosten und den thermischen Außenraumkomfort zeigt parallele Verbesserungsmöglichkeiten dieser drei Zielgrößen. Wie bereits auf Gebäudeebene (sh. Kapitel 4.2.5, Seite 48) werden dazu die Differenzen zum unveränderten Ausgangsfall der Quartiersfallstudie berechnet. Basierend darauf werden Szenarien mit einer negativen Auswirkung auf einen der drei Zielindikatoren herausgefiltert. Dadurch verbleiben 471 von 539 betrachteten Szenarien. Die anschließende Normierung der Differenzen je Aspekt und deren Aufsummierung führt zu einer Rangfolge im Hinblick auf die multikriterielle Synergiekennzahl.

Abbildung 4.16 zeigt die 50 am besten abschneidenden Varianten sowie deren normierte Ergebnisse für die drei Aspekte. Im Vergleich zu den Resultaten auf der Gebäudeebene zeigt sich auf der Quartiersebene eine ungleichmäßigere Verteilung zwischen den Zielgrößen. Diese sind weniger aneinander gekoppelt, als es beispielsweise beim Heizwärmebedarf und den THG-Emissionen auf Gebäudeebene der Fall ist. Es besteht daher mehr Spielraum für die Entwicklung ausbalancierter Lösungen und quartiersindividueller Vorschläge. Insgesamt ist festzustellen, dass für das Fallstudienquartier eine Vielzahl von Kombinationen verbleibt, die zu Verbesserungen in allen drei Aspekten führen. Somit ist im betrachteten Fallbeispiel die Forderung nach Lösungen, die mehrere Dimensionen der Nachhaltigkeit parallel adressieren, gerechtfertigt und auch umsetzbar.

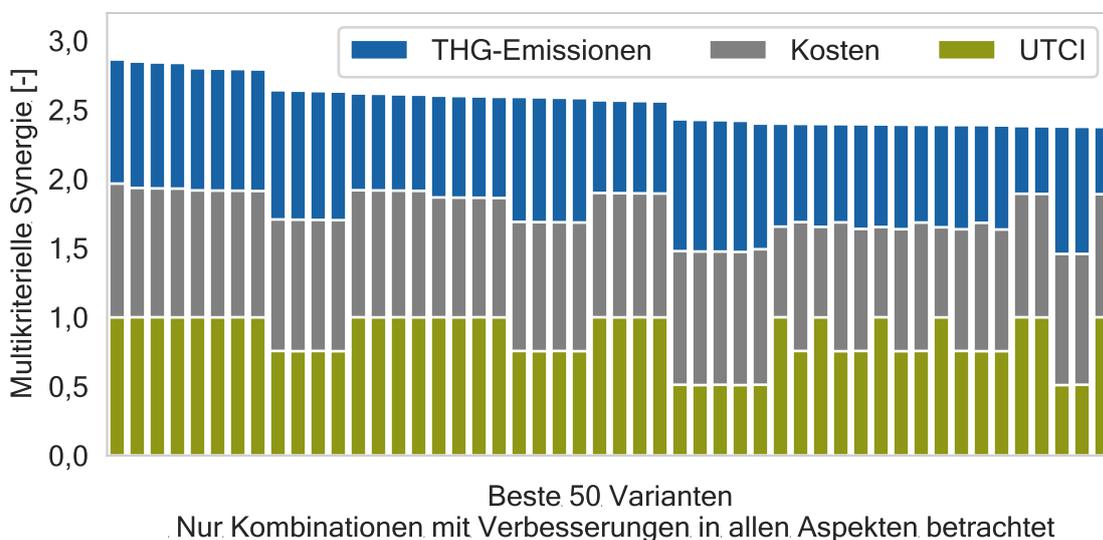


Abbildung 4.16 Ergebnisse für multikriterielle Synergie auf Quartiersebene. Kein Szenario erreicht dabei das Optimum von 3,0.

Abbildung 4.17 gibt einen Eindruck zu den absoluten Veränderungen durch die hinsichtlich multikriterieller Synergie am besten bewertete Quartiersvariante. Diese Variante schneidet bei den THG-Emissionen im Lebenszyklus und den Lebenszykluskosten mit am besten ab (normierte Verbesserung der jeweiligen Aspekte nahe 1,0). Dahingegen existieren Varianten, die beim thermischen Außenraumkomfort etwas bessere Ergebnisse erzielen, dafür aber Defizite bei den zuvor genannten Aspekten aufweisen. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Quartiersimulationen liegen die Resultate insbesondere beim thermischen Außenraumkomfort in einer kleinen Spannweite von 5,5°C. Hinsichtlich dieses

Zielaspekts treten mehrere Normierungsergebnisse nahe 1,0 auf, da Quartiersvarianten mit der maximal möglichen Baumanzahl in Kombination mit mehreren Maßnahmen vorliegen, die nur geringfügigen Einfluss auf die THG-Emissionen bzw. die Lebenszykluskosten nehmen. Hierzu zählen etwa die Gebäudesanierung oder PV Dachflächen.

Wie bereits auf Gebäudeebene erreicht die beste Quartiersvariante bei keinem der drei Aspekte ein Optimum. Bei den THG-Emissionen liegt sie auf Rang 33, bei den Lebenszykluskosten auf Rang 12 und beim thermischen Außenraumkomfort auf Rang 72. Demnach stellt die Bewertung multikriterieller Synergie auch auf Quartiersebene ein hilfreiches Mittel dar, um ausgewogene und ausschließlich positiv wirkende Szenarien zu identifizieren. Um den vollständigen Handlungsspielraum für Planende aufzudecken sind aber darüber hinausgehende Untersuchungen mithilfe von Optimierungsverfahren erforderlich, welche im folgenden Kapitel 4.4 behandelt werden.

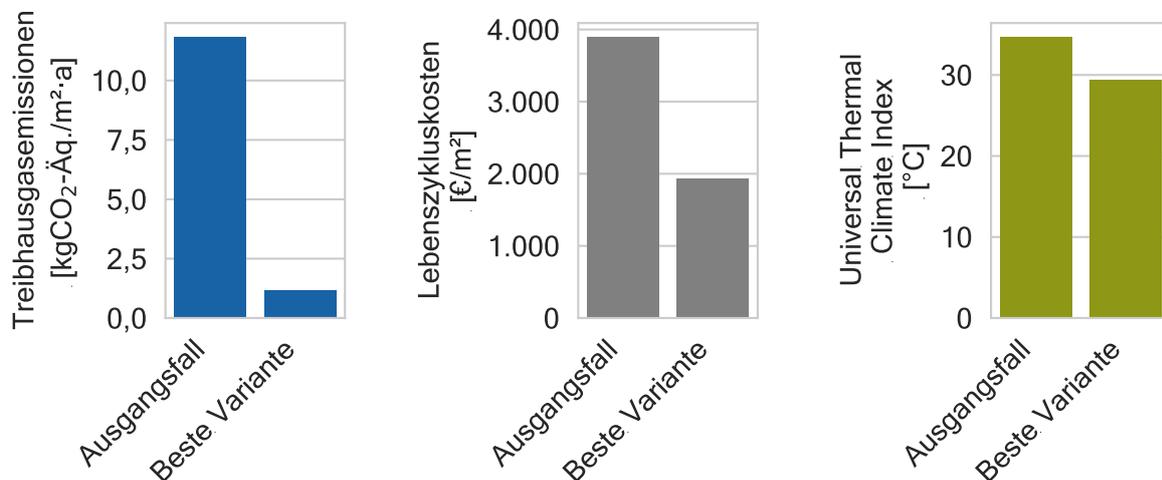


Abbildung 4.17 Ergebnisse für die beste Variante der multikriteriellen Synergie auf Quartiersebene.

Abbildung 4.18 zeigt die Gegenüberstellung von THG-Emissionen und Lebenszykluskosten. Darin sind die gefilterten Szenarien mit positiver Wirkung in allen drei Aspekten markiert. Das bedeutet, dass entsprechend der Definition von multikriterieller Synergie nur Szenarien einbezogen werden, in denen sich keiner der drei Aspekte verschlechtert (sh. Kapitel 2.2.3, Seite 22). Die besten 50 Varianten liegen großteils im minimalen Bereich der THG-Emissionen und der Lebenszykluskosten, erreichen jedoch das Optimum aus diesen nicht. Dieses Optimum schneidet unterdurchschnittlich beim thermischen Außenraumkomfort ab, weshalb es nicht unter den besten 50 Varianten für die multikriterielle Synergie geführt wird. Dennoch stellt es im Hinblick auf den möglichen Lösungsraum eine wichtige Information für Stadtplaner:innen dar, da nur damit das gesamte Ausmaß optimaler Alternativen erfassbar wird.

Die lineare Regressionsanalyse hinsichtlich multikriterieller Synergie zeigt einen positiven Einfluss der Planungsvariablen Sanierungsstandard (KK = 0,661), Baumanteil (KK = 0,570), PV Anteil Dach (KK = 0,198) und PV Anteil Ost-West Fassaden (KK = 0,417). Abbildung 4.19 veranschaulicht diese Zusammenhänge für die untersuchten Kombinationen. Im Vergleich mit der Gebäudeebene weist die Quartiersebene stärkere Korrelationen auf, unter anderem für die Variablen der Begrünung. Diese intensivere Ausprägung von Synergien zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung auf Quartiers- im Vergleich zur

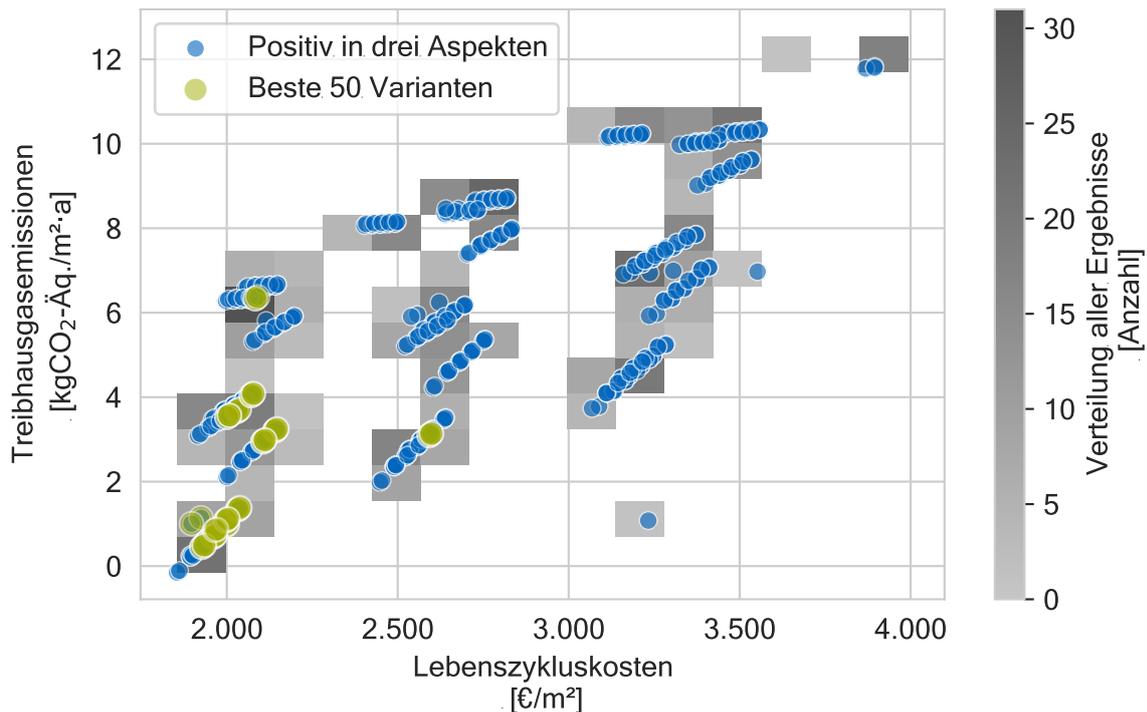


Abbildung 4.18 Gegenüberstellung von THG-Emissionen und Lebenszykluskosten zur Bewertung multikriterieller Synergie auf Quartiersebene.

Gebäudeebene beschreiben auch Daniel et al. in qualitativer Form [11]. Die Ergebnisse dieser Dissertation zeigen zudem, dass hohe Energiestandards zu einem guten multikriteriellen Abschneiden beitragen. Dies ist auf eine starke Reduktion von THG-Emissionen und Lebenszykluskosten zurückzuführen. Höhere Dämmstandards können auch Einfluss auf den UHI Effekt nehmen, indem weniger Wärme an die unmittelbare Umgebung abgegeben wird. Dieser Effekt ist in der vorliegenden Betrachtung als gering einzuschätzen, da die Bewertung des thermischen Außenraumkomforts für die Sommermonate erfolgt. In diesem Zeitraum liegen in der Regel keine Wärmeemissionen durch Heizungsanlagen vor. Für den thermischen Außenraumkomfort können hohe Baumanteile als vorteilhaft identifiziert werden. Diese weisen nach dem Sanierungsstandard die zweithöchste Korrelation auf. Die vorliegende Auswertung erlaubt jedoch keine unmittelbaren Rückschlüsse auf das Zusammenspiel dieser beiden Variablen. Die Wechselwirkung zwischen Grün und Sanierungsstandard wird im Zuge der multikriteriellen Optimierung (sh. Kapitel 4.4) erneut aufgegriffen.

Die weiteren einbezogenen Parameter haben keinen signifikanten Einfluss auf die multikriterielle Synergie. Das bedeutet nicht zwangsläufig, dass sie in diesem Zusammenhang irrelevant sind. Üben Parameter beispielsweise nur auf einzelne Zielaspekte einen Einfluss aus, kann dieser Positivbeitrag unter Umständen nicht ausreichen, um unter der Gleichgewichtung aller Aspekte als relevant eingestuft zu werden. Für die Dachbegrünung zeigen Forschungsarbeiten beispielsweise einen im Vergleich zu Bäumen geringen Einfluss auf den Außenraumkomfort [212]. Ihre Wirkung auf die Energiebilanz des betroffenen Gebäudes ist dagegen, je nach Klimazone, als vorteilhaft zu bewerten [213]. Da im Zuge der Berechnung von multikriterieller Synergie in dieser Arbeit alle Aspekte gleich gewichtet werden, kann der geringe Einfluss auf den thermischen Außenraumkomfort bereits dazu führen, dass leichte Verbesserungen der THG-Emissionen und der Lebenszykluskosten für die Gesamtbewertung von Gründächern kaum mehr ausschlaggebend sind.

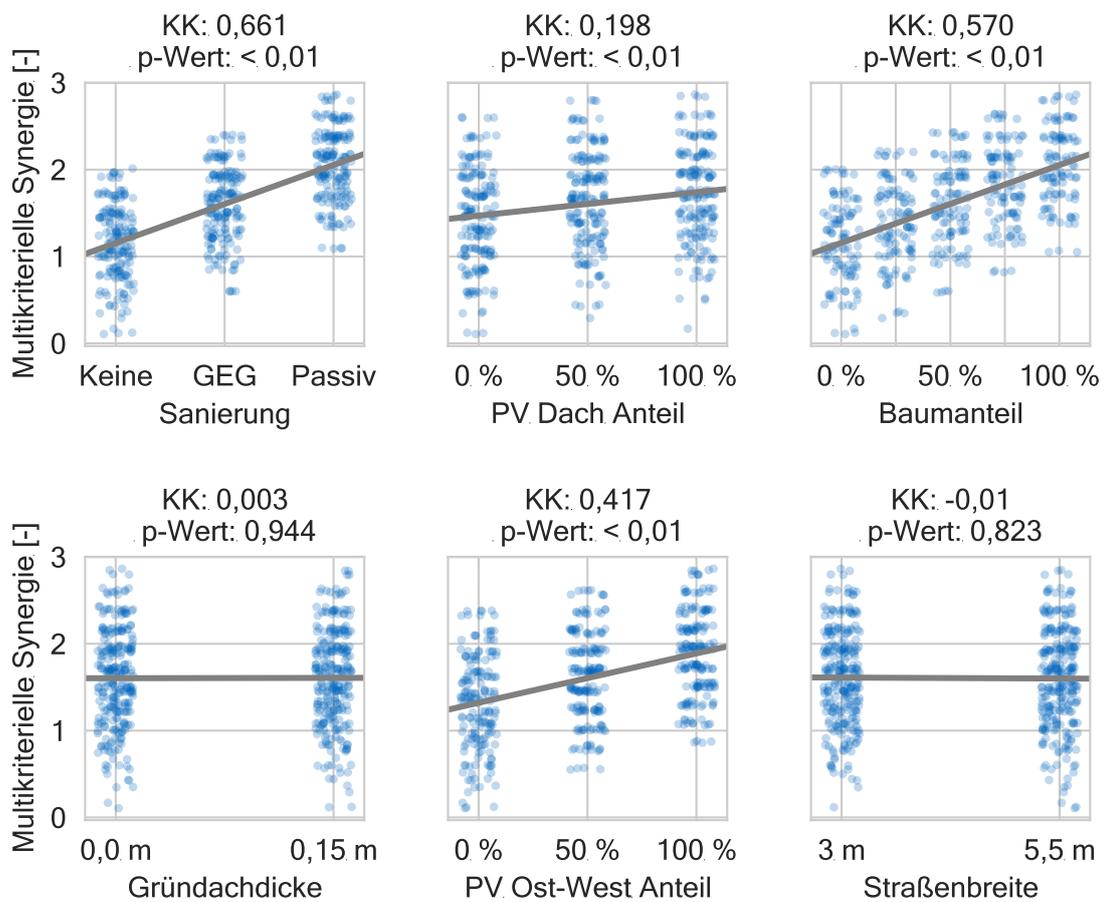


Abbildung 4.19 Pearson Korrelationskoeffizient zwischen normierter Summe aus multikriterieller Synergie auf Quartiersebene und den Planungsvariablen.

4.4 Multikriterielle Optimierung von Trade-offs auf Quartiersebene

Im Folgenden wird der in Kapitel 3.2 eingeführte Prozess zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersplanung (*Urban Systems Exploration*) exemplarisch auf die in Kapitel 4.3.1 eingeführte Quartiersfallstudie im Passivhausstandard angewandt (sh. Seiten 29 bzw. 53). Dazu wird im Rahmen dieser Dissertation eine Werkzeugkette entwickelt, die es erlaubt, Pareto-optimale Lösungen für den Trade-off zwischen den lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, den Lebenszykluskosten und dem thermischen Außenraumkomfort zu identifizieren und für die Entscheidungsunterstützung zu nutzen. Die KPIs zur Bewertung dieses Trade-offs und der Aufbau des zugehörigen Simulationsmodells gemäß der Prozessschritte (1) bis (6) wurden in Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.2 beschrieben (sh. Seite 53 bzw. 58). Lediglich die Planungsvariablen müssen von einem diskreten in einen kontinuierlichen Wertebereich überführt werden. Die hierfür festgelegten Minima und Maxima sind in Tabelle 4.8 zusammengestellt. Dieses Kapitel konzentriert sich entsprechend auf die Einbindung des Simulationsmodells in die MOO Werkzeugkette sowie die anschließende Ableitung einer Entscheidungsunterstützung anhand der Schritte (7) bis (10). Die beispielhafte Anwendung der *Urban Systems Exploration* im zweidimensionalen Raum wurde bereits im Rahmen eines Peer-Review Journal Artikels veröffentlicht [134]. Die in dieser Dissertation untersuchte Fallstudie zeigt die Anwendung der *Urban Systems Exploration* mit drei Zielgrößen.

Tabelle 4.8 Input Parameter und ihre Wertebereiche (Design Space) für die multikriterielle Optimierung des Quartiersmodells.

Input Parameter	Einheit	Kontinuierlicher Wertebereich
Baumanteil	[%]	[0; 100]
Baumkronendurchmesser	[m]	[2; 10]
Baumhöhe vom Boden	[m]	[6; 10]
Transparenz Baumkrone Sommer	[%]	[10; 30]
Transparenz Baumkrone Winter	[%]	[45; 80]
PV Anteil Dach	[%]	[0; 100]
PV Anteil Südfassade	[%]	[0; 100]
PV Anteil Ost-West Fassaden	[%]	[0; 100]
PV Batteriekapazität	[kWh]	[0; 80]
Gründachdicke	[m]	[0; 0,25]
Fensterflächenanteil	[%]	[10; 50]
Energiedurchlassgrad Fenster (g-Wert)	[-]	[0,40; 0,85]
Albedo Fassaden	[-]	[0,1; 0,7]
Straßenbreite	[m]	[3; 9]

4.4.1 Werkzeugkette zur Umsetzung des Optimierungsprozesses

Zur Umsetzung der multikriteriellen Optimierung müssen das Simulationsmodell und die Optimierungsumgebung über eine Datenschnittstelle verbunden werden. Ein Datenspeicher hält nach Abschluss des Optimierungsprozesses die Ergebnisse zur weiteren Auswertung im Comma-separated values (csv) Format bereit. Abbildung 4.20 zeigt den entsprechenden Informationsfluss. Eine direkte Integration von Optimierungsalgorithmen in Grasshopper Modelle ist bis Rhinoceros 7 oft nicht möglich, da diese Versionen nur IronPython 2 (Version 2.7) unterstützen. Zahlreiche Algorithmen basieren jedoch auf Python 3. Es sind zwar mehrere Plug-Ins vorhanden, die einzelne Optimierungsverfahren in diesen Programmversionen verfügbar machen [86, 214], die Einbindung neuer Methoden ist allerdings mit erheblichem Programmieraufwand verbunden. Da in dieser Dissertation ein in der Grasshopper Umgebung bislang noch nicht verfügbarer Optimierungsalgorithmus zum Einsatz kommen soll, wird der Datenaustausch über Textdateien und Checkpoints implementiert. Dabei erfolgt die kontinuierliche Überwachung der Inhalte eines Netzlaufwerks sowohl durch die Simulations- als auch durch die Optimierungsumgebung. Nach Abschluss einer Simulation oder einer Optimierungsiteration erzeugt die jeweilige Umgebung eine csv-Datei mit den Eingabedaten für die Simulation bzw. mit den Ergebnissen des Simulationslaufs. Dadurch wird der nächste Iterationsschritt ausgelöst. Die Auswahl des verwendeten MOO Algorithmus sowie dessen Implementierung werden im folgenden Schritt (7) erläutert.

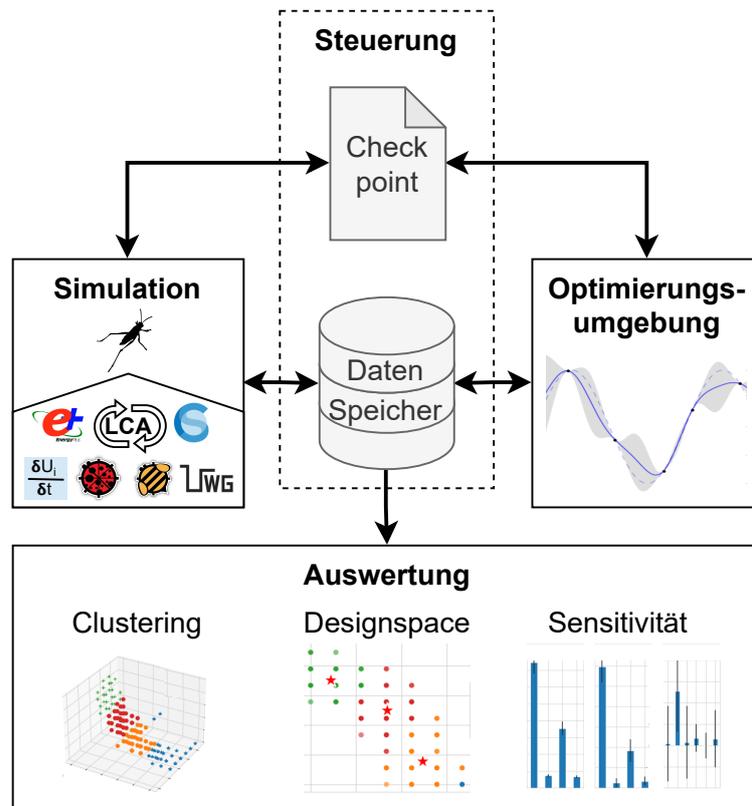


Abbildung 4.20 Werkzeugkette und Datenschnittstellen zur Umsetzung des multikriteriellen Optimierungsprozesses.

Schritt 7: Trade-offs ermitteln

Nach der Konfiguration des Quartiersmodells anhand der Schritte (3) bis (6) (sh. Kapitel 4.3.2, Seite 58) umfasst die Trade-off Analyse die Wahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus, dessen Anwendung auf das Simulationsmodell sowie den Export der Ergebnisse für die folgenden Schritte. Ziel dieses Schrittes ist die Ermittlung von möglichst gleichmäßig über die komplette Spannweite der PF verteilten Lösungen, um einen umfassenden Eindruck des optimalen Handlungsspielraums zu erlangen. Da das Simulationsmodell mit einer Laufzeit von etwa 15 bis 25 Minuten je Evaluierung als rechenintensiv einzuordnen ist, sind nur wenige Auswertungen möglich. Aus diesem Grund wird das Konzept der ersatzmodellbasierten MOO gewählt (sh. Kapitel 2.1.3, Seite 13).

Für die Quartiersfallstudie kommt die Ersatzmodellbildung mittels GPR im Zusammenspiel mit dem von Palm und Palm entwickelten Konzept der „Pareto Reflexion“ zum Einsatz [215]. Pareto Reflexion bezeichnet einen Ansatz, der durch Anwendung eines MOO Algorithmus auf die mit einer Pareto Reflektierenden (d. h. die multikriteriell optimierte Eigenschaft erhaltenden) Funktion verknüpften Black-Box Funktion erlaubt, definierte Eigenschaften identifizierter MOO Lösungen zu garantieren. Es existieren zahlreiche Pareto Reflexionen, welche die Pareto Eigenschaft der identifizierten Lösungen mathematisch erhalten und unterschiedliche Eigenschaften implizieren. Im Gegensatz zu konventionellen und meist empirisch geprüften MOO Algorithmen, besteht bei der Anwendung dieses Konzepts eine mathematische Garantie im Hinblick auf die Pareto Eigenschaft der identifizierten Lösungen. Dadurch kann die Anzahl notwendiger Simulationen zur Suche nach gleichmäßig verteilten Pareto Lösungen deutlich reduziert werden [134, 215]. Ziel dabei ist deren effektive und effiziente Ermittlung. Die MOO Methode ist als Python Implementierung mit der Bezeichnung *Paref* frei zugänglich [216].

Durch die Kopplung von *Paref* mit dem Quartiersmodell ist es möglich, Pareto Punkte zu identifizieren und zusätzlich bestimmte Eigenschaften dieser Punkte in der Suche zu berücksichtigen. Zu diesen Eigenschaften zählen unter anderem die Lage an den Rändern der PF, die kürzeste Distanz zum Utopia Punkt oder die Lage in einem bestimmten Zielkorridor. Dadurch können beispielsweise gezielt Eckpunkte oder gleichmäßig verteilte Pareto Punkte ermittelt werden [215]. *Paref* bietet dazu gebrauchsfertige Algorithmen, um explizit nach diesen Eigenschaften zu suchen. Es enthält zudem eine Toolbox, welche die Erstellung eigener Suchsequenzen erlaubt [216]. Dadurch ist *Paref* in der Lage, Pareto Lösungen in bestimmten Bereichen der PF mit einer möglichst geringen Anzahl von Modellauswertungen zu identifizieren. Damit erfüllt es die definierte Anforderung einer effektiven und effizienten Bestimmung von gleichmäßig verteilten Pareto Punkten in komplexen Simulationsumgebungen.

In der vorliegenden Anwendung von *Paref* wird, ausgehend von einer Ausgangsstichprobe für jede Zielgröße, ein GPR Ersatzmodell gebildet. Während des Optimierungsprozesses werden verschiedene Pareto Reflexionen verwendet, um im Zusammenspiel mit den Ersatzmodellen Pareto Lösungen zu finden, welche die definierten Bedingungen erfüllen. Die entsprechenden Inputs werden in das Quartiersmodell zurückgespielt und simuliert. Das Ergebnis reduziert dabei jeweils die Unsicherheit der Ersatzmodelle für den nächsten Suchlauf. Diese Iterationsschleife wird fortgesetzt, bis eine ausreichende Anzahl von Pareto Punkten mit der gewünschten Eigenschaft identifiziert wurde oder keine weiteren Pareto Punkte mehr gefunden werden können. Die Qualität der Ermittlung gleichmäßiger Verteilungen entlang der PF mittels *Paref* wurde in einem vom Autor dieser Dissertation verfassten Journal Paper un-

tersucht und mit anderen MOO Algorithmen verglichen. Dadurch konnte die Wirksamkeit dieses MOO Ansatzes im urbanen Kontext nachgewiesen werden [134].

Für die Anwendung in der Fallstudie dieser Dissertation werden 45 initiale Stichproben mittels Latin Hypercube Sampling [217] erzeugt und mithilfe des Quartiersmodells in Grasshopper simuliert. Diese ersten Auswertungen dienen zur Erstellung der GPR Ersatzmodelle. Zunächst werden die Eckpunkte der PF ermittelt, um deren maximale Ausdehnung einzuschätzen. Der dafür vorgesehene Baustein des *Paref* Algorithmus gewichtet dazu jeweils zwei der drei konkurrierenden KPIs stärker. Dadurch wird der Pareto-optimale Eckpunkt des jeweils dritten KPIs ermittelt. Beispielsweise wird ein Eckpunkt für den in dieser Dissertation untersuchten Trade-off durch ein Szenario repräsentiert, welches minimale THG-Emissionen und minimale Lebenszykluskosten aufweist. Der thermische Außenraumkomfort erreicht dagegen in dieser Konstellation kein Minimum. Er bildet somit einen Eckpunkt der dreidimensionalen PF. Zur Ermittlung der weiteren Eckpunkte werden die THG-Emissionen und der thermische Außenraumkomfort bzw. die Lebenszykluskosten und der thermische Außenraumkomfort minimiert. Die Unsicherheit in diesen Randbereichen der PF ist anfangs hoch, da nur wenige Stichproben für das Training der Ersatzmodelle zur Verfügung stehen. Daher werden drei Suchdurchläufe je Eckpunkt zugelassen. Die Suche wird abgebrochen, wenn der Algorithmus einen Punkt identifiziert, der nahe an einem bereits evaluierten Punkt liegt. Zusätzlich zu den Eckpunkten wird der Kniepunkt der PF mittels des dafür im *Paref* Paket vorhandenen Suchalgorithmus ermittelt. Der Kniepunkt bezeichnet einen Pareto Punkt, der dem Minimum aller drei Zielkomponenten unter Anwendung der L2-Norm (Euklidischer Norm) am nächsten kommt. Das Minimum der Zielkomponenten wird als „Utopia Punkt“ bezeichnet, da dieser in der Regel nicht erreichbar ist. In der Fallstudie wird der Utopia Punkt auf (0,0,0) im normierten Zielraum gesetzt. Der Kniepunkt liegt in der Regel zwischen den Eckpunkten und bietet in Kombination mit diesen eine erste Einschätzung zur Ausdehnung sowie der groben Form der PF.

Nachdem die drei Eckpunkte sowie der Kniepunkt der PF identifiziert sind, wird eine Suchsequenz zur Ermittlung von gleichmäßig verteilten Pareto Punkten angewendet. Damit kann die präzisere Form einer möglichst gleichmäßig abgerasterten PF bestimmt werden. Zudem bildet dies die Grundlage für die Ableitung von Spannweiten der Designvariablen, welche in der späteren Entscheidungsunterstützung Anwendung finden. Die genannte Suchform war zum Bearbeitungszeitpunkt dieser Dissertation nur im zweidimensionalen Zielraum in *Paref* implementiert. Daher wurde durch den Autor dieser Dissertation eine vorhandene Suchsequenz des *Paref* Pakets adaptiert und dadurch eine eigene Suchsequenz erstellt. Diese ermöglicht eine Suche nach gleichmäßig verteilten Pareto Punkten innerhalb der vom identifizierten Kniepunkt und den Eckpunkten aufgespannten Dreiecken im dreidimensionalen Raum. Dafür wurde ein iterativer Algorithmus entwickelt, der ein gleichmäßig verteiltes Referenzpunkteraster zwischen den Dreiecken bildet. Dieses Referenzpunkteraster wird entlang der Normalen durch den Schwerpunkt der Dreiecke in Richtung eines utopischen Minimums verschoben.

Dadurch entsteht ein Raster an Führungslinien, entlang derer neue Pareto Punkte identifiziert werden sollen. Dazu wird die p-unendlich-Norm (d. h. die Maximum-Norm als Limes der p-Norm) in Bezug auf das oben gewählte utopische Minimum minimiert. Da jede p-unendlich-Norm einer Pareto Reflexion entspricht, stellt die so definierte Suche ebenfalls eine Pareto Reflexion dar. Abbildung 4.21 visualisiert die einzelnen Schritte der entwickelten Suchsequenz, welche im Folgenden erläutert werden.

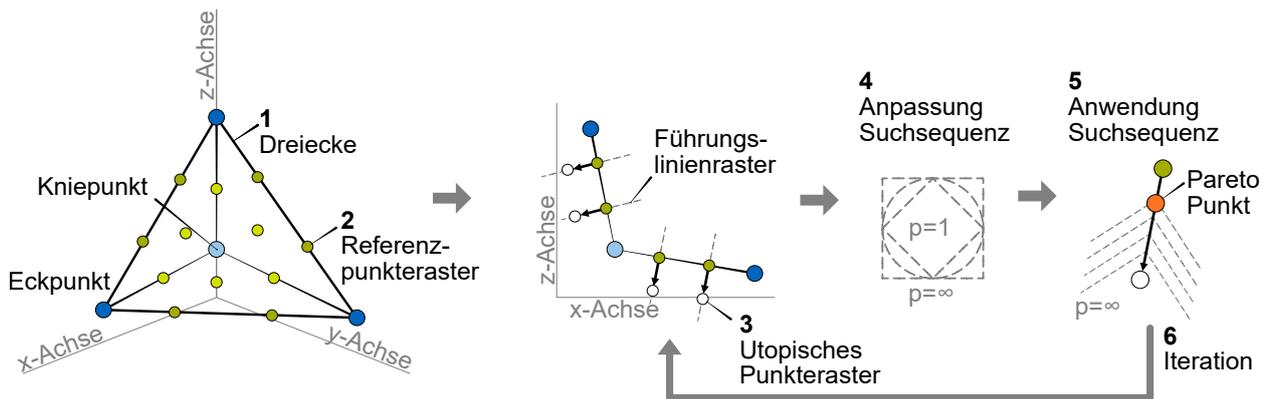


Abbildung 4.21 Angepasste „WeightedNormToUtopia“ Suchsequenz des *Paref* Pakets zur Identifikation gleichmäßig verteilter Pareto Punkte im dreidimensionalen Raum.

1. Bildung von Dreiecken zwischen jeweils zwei Eckpunkten und dem Kniepunkt. Diese Dreiecksbildung könnte alternativ ausschließlich über die drei Eckpunkte (ohne Berücksichtigung des Kniepunktes) durchgeführt werden. Die zusätzliche Ermittlung des Kniepunktes erlaubt bereits vor der Rastersuche eine erste Einschätzung zur Form der PF. Da der Kniepunkt an anderer Stelle ebenfalls benötigt wird, wird er im Folgenden mit in die Dreiecksbildung einbezogen. Es resultieren drei Dreiecke (sh. Abbildung 4.21, links).
2. Erzeugung von jeweils einem gleichmäßigen Referenzpunkteraster innerhalb der drei gebildeten Dreiecke. Bei unterschiedlich großen Dreiecken kann deren Fläche zur Gewichtung der Punkteanzahl je Dreieck herangezogen werden.
3. Verschiebung der drei Referenzpunkteraster entlang des Normalenvektors des jeweils zugrunde liegenden Dreiecks in Richtung des utopischen Minimums. Dieses wird aus den ermittelten Eckpunkten der PF bestimmt. Dadurch entsteht zusätzlich zum Referenzpunkteraster ein Raster an Führungslinien.
4. Anpassung der in *Paref* vorhandenen und auf der L2-Norm basierenden „WeightedNormToUtopia“ Suchsequenz auf die Verwendung der p-unendlich-Norm. Dies gewährleistet eine geradlinige Suche zwischen dem in Schritt drei gebildeten „utopischen Punkteraster“ und dem Referenzpunkteraster entlang des Führungslinienrasters. Ohne diese Anpassung kann eine Anhäufung identifizierter Pareto Punkte in unregelmäßigen Bereichen der PF auftreten. Dies widerspräche dem eingangs formulierten Ziel einer möglichst gleichmäßigen Punkteverteilung.
5. Anwendung der angepassten Suchsequenz aus Schritt vier zur Identifikation des Pareto Punktes zwischen einem Punkt des Referenzpunkterasters und dem zugehörigen Punkt des Führungslinienrasters.
6. Iteration von Schritt fünf über alle erzeugten Rasterpunkte innerhalb eines Dreiecks sowie anschließende Iteration über alle erzeugten Dreiecke.

Nach Abschluss dieses Vorgangs stehen gleichmäßig verteilte, diskrete Pareto Punkte zur Ersatzmodellbildung und zur Ableitung von Entscheidungsunterstützung zur Verfügung.

4.4.2 Ersatzmodelle zur Entscheidungsunterstützung

Nach Abschluss der Optimierung folgen die Ergebnisauswertung, eine Sensitivitätsanalyse sowie die Ableitung von multikriterieller Entscheidungsunterstützung in den Schritten (8) bis (10).

Schritt 8: Ergebnisse auswerten

Aus Schritt (7) resultiert eine auf einzelnen Evaluationen basierende (diskrete) Darstellung der PF. Um diese in einen durchgängigen Lösungsraum zu transferieren, werden aus den Optimierungsergebnissen finale Ersatzmodelle für die weitere Analyse generiert. Dafür kommt erneut die GPR zur Anwendung, da sie eine geeignete Methode für die Erzeugung von Ersatzmodellen mit wenigen Trainingspunkten darstellt und gleichzeitig Unsicherheiten in den Vorhersagen erfasst. Die iterative Suche im Schritt (7) identifiziert häufig Punkte, die der tatsächlichen PF nahe kommen, selbst aber keine Pareto Eigenschaft aufweisen. Da diese Lösungen dennoch nutzbare Trainingspunkte für die Ersatzmodelle darstellen, werden in der Fallstudie 70 % aller verfügbarer Punkte (inkl. Pareto Punkten), die den tatsächlichen Pareto Punkten am nächsten sind, berücksichtigt. Diese Punkte erhöhen die Vorhersagegenauigkeit der GPR Modelle in Bereichen, für die keine Pareto Lösung identifiziert werden konnte. Außerdem sind weit von der tatsächlichen PF entfernte Punkte durch dieses Verfahren von der Ersatzmodellbildung ausgeschlossen. Die ausgeschlossenen Punkte stammen aus dem ursprünglichen Latin Hypercube Sampling und sind über eine große, nicht Pareto-optimale Spanne der Zielwerte verstreut. Ihr Einbezug würde zu einer hohen Unsicherheit bei Vorhersagen führen. Da für die multikriterielle Entscheidungsunterstützung ausschließlich Pareto-optimale Lösungen Berücksichtigung finden, ist eine gute Vorhersagequalität von Punkten nahe der PF wichtig. Nicht Pareto-optimale Lösungen sollten dementsprechend nicht weiter verfolgt werden. In diesen Fällen sind Konfigurationen möglich, die in mindestens einer der Zielgrößen besser abschneiden, ohne eine Verschlechterung der weiteren Zielgrößen zu verursachen.

Schritt 9: Variableneinfluss untersuchen

In diesem Schritt werden besonders sensitive Variablen identifiziert. Sie sind in der Regel gut als Stellhebel und zur weiteren Auswertung der Ergebnisse geeignet. Im Rahmen der Fallstudie wird dafür eine Sensitivitätsanalyse nach Sobol auf die Ersatzmodelle angewandt. Diese wurde mithilfe der Python Applikation SALib implementiert [218]. Mit der varianzbasierten Sobolanalyse kann der Zusammenhang zwischen der Streuung eines Outputs und der Unsicherheit in den Inputs untersucht werden. Die Methode bildet einen Gesamteffekt ab, der sich aus direkten und interaktiven Effekten zusammensetzt. Wie im Stand der Forschung (sh. Kapitel 2.1.2, Seite 9) hervorgehoben, sind Wechselwirkungen auf Quartiersebene in den meisten Fällen durch ihr nichtlineares Verhalten charakterisiert. Die Sensitivitätsanalyse nach Sobol ermöglicht es, auftretende Effekte aus der Interaktion von Variablen in die Analyse mit einzubeziehen. Sie stellt daher eine gängige Methode für die Identifikation einflussreicher Parameter im Umfeld komplexer Systeme dar [219]. Die resultierenden Total-Sobol-Indizes geben Hinweise darauf, welche Inputs festgelegt werden können, ohne die Outputs wesentlich zu beeinflussen. Zudem zeigen sie, welche Inputs als einflussreiche Stellhebel innerhalb des Modells agieren [220]. Je höher dieser Wert, desto größer fallen durch Unsicherheiten in den Inputs hervorgerufene Schwan-

kungen der Outputs aus. Die entsprechenden Variablen sollten daher mit möglichst hoher Genauigkeit festgelegt und umgesetzt werden.

Schritt 10: Multikriterielle Entscheidungsunterstützung ableiten

Im letzten Schritt wird mittels linearer Interpolation auf Basis des Ersatzmodells ein dichtes und regelmäßig verteiltes Netz aus Pareto Lösungen generiert. Dieses ist notwendig, um die Ausprägung der Eingangsvariablen für bestimmte Bereiche der PF vergleichbar aufzuzeigen und ihre Streuung zu bewerten. Ein differentieller Evolutionsalgorithmus [221, 222] bestimmt für jeden der gleichverteilten Punkte die zugehörigen Eingabewerte im Design Space unter Verwendung der GPR Ersatzmodelle. Das Ergebnis ist eine gleichmäßige PF, in der zu jeder Pareto Lösung die zugehörigen Inputs bekannt sind. Mithilfe von K-Means Clustering können anschließend Bereiche der PF gruppiert werden, welche eine ähnliche Ausprägung der Zielaspekte aufweisen. Dadurch erhalten Planer:innen und Entscheider:innen die Möglichkeit, sich vereinfacht für Lösungen mit einer bestimmten Trade-off Abwägung zu entscheiden. Schließlich können die einzelnen Clustergruppen im Design Space visualisiert werden. Anhand dessen lassen sich die erforderlichen Randbedingungen für die Umsetzung eines Clusters und damit eine bewusste Steuerung des vorliegenden Trade-offs erreichen. Außerdem können Eingabeparameter identifiziert werden, die zur Umsetzung des angestrebten Trade-offs lediglich geringfügig eingegrenzt werden müssen. Dies trägt unter anderem dazu bei, Entwurfsoptionen zu eröffnen und damit produktive Planungswettbewerbe mit vielfältigen Designmöglichkeiten bei gleichzeitiger Umsetzung des angestrebten Trade-offs zu gewährleisten. Zugleich wird ersichtlich, welche Variablen zur Erzielung eines bestimmten Trade-offs sehr engen Vorgaben unterworfen werden sollten.

4.4.3 Ergebnisse der multikriteriellen Quartiersoptimierung

Die Anwendung der multikriteriellen Quartiersoptimierung anhand des beschriebenen Vorgehens führte zu insgesamt 102 Lösungen. Wie in Schritt (8) beschrieben, wurden davon 70 % (71 Lösungen) zur Erstellung der GPR Ersatzmodelle verwendet. Darin sind 28 Pareto-optimale Lösungen enthalten. Zunächst werden die unmittelbar aus dem Optimierungsprozess gewonnenen Ergebnisse einer ersten Bewertung und Plausibilitätsprüfung unterzogen. Abbildung 4.22 veranschaulicht die ermittelten Punkte unter Berücksichtigung des Baumanteils und des PV Anteils der Ost-West Fassaden.

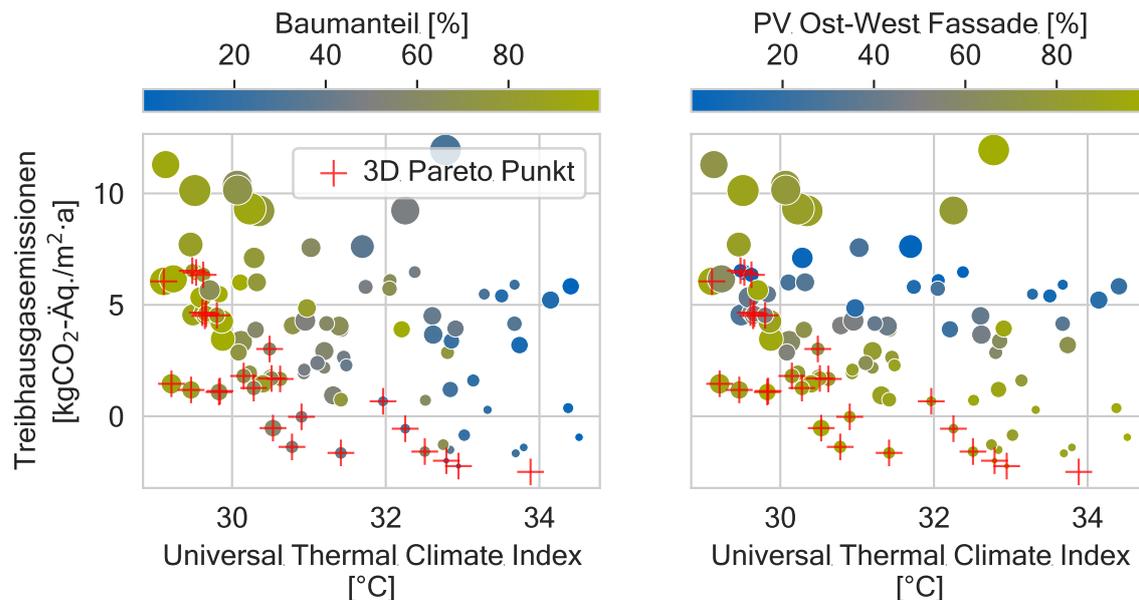


Abbildung 4.22 Eigenschaften der mittels multikriterieller Quartiersoptimierung ermittelten Punkte für Bauman teil (links) und PV Anteil der Ost-West Fassaden (rechts). Die Punktgröße spiegelt die dritte Zieldimension der Lebenszykluskosten wider, ● (Mittelwert) = 2.069 €/m².

Aus diesen Darstellungen lassen sich bereits erste Beziehungen zwischen den Variablen und dem Trade-off Verhalten ableiten. Es wird ersichtlich, dass der Bauman teil ein wichtiger Kontrollhebel für die Positionierung auf der PF ist. In der hier untersuchten Fallstudie verbessert sich der Indikator für den thermischen Außenraumkomfort mit einem Anstieg des Baumanteils, d. h. der UTCI sinkt (grüne Punkte in Abbildung 4.22, links). Im Gegensatz dazu steigen die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen mit einem höheren Bauman teil, da der Energiebedarf für die Beheizung und die Beleuchtung der Gebäude zunimmt sowie positiv beitragende PV Flächen verschattet werden. Dies unterstützt die Erkenntnis von Daniel et al., die in ihrer Studie ebenfalls feststellen, dass Maßnahmen im Außenraum häufig einen größeren Einfluss auf Klimaschutz und Klimaanpassung gleichzeitig haben, als Maßnahmen auf Gebäudeebene [11]. Für den Entwurfsparameter PV Anteil der Ost-West Fassaden weisen 25 von 28 Pareto Punkten Werte über 50 % auf. Dies ist unter anderem auf den Einsatz einer Wärmepumpe im Rahmen der vorliegenden Fallstudie zurückzuführen. Die Wärmepumpe erhöht den Anteil des verbrauchten PV Stroms, da neben der Beleuchtung und der Warmwassererwärmung auch der Energiebedarf für die Gebäudebeheizung zum Teil gedeckt werden kann. Dies trägt in der Gesamtbilanz zur Reduktion der THG-Emissionen bei. Alternative Heizsysteme können hinsichtlich dieses Zielwerts ein anderes Verhalten zeigen und dadurch abweichende Ergebnisse hervorrufen.

Bei den bisher betrachteten Punkten handelt es sich um die unmittelbaren Outputs der multikriteriellen Optimierung, welche teils ungleichmäßig über die PF verteilt sind. Dies würde bei der Rückübertragung in den Design Space zu Verzerrungen bei der Bewertung von Streuungen führen. Daher wurden gemäß der beschriebenen Methodik GPR Ersatzmodelle gebildet, welche zur gleichmäßigen Verdichtung der PF eingesetzt werden. Im Folgenden wird zunächst die Vorhersagequalität dieser Ersatzmodelle untersucht. Diese Ergebnisse sind besonders für die Anwendung der Werkzeugkette in anderem Kontext wichtig, in denen die Rechenressourcen begrenzt sind und nur eine minimale Anzahl an Modellevaluierungen durchgeführt werden soll. Im Zusammenhang mit der Vorhersagequalität ist der Root Mean Squared Error (RMSE) ein Maß für die Unterschiede zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten, welches üblicherweise zur Bewertung der Genauigkeit von Ersatzmodellen verwendet wird und möglichst minimal werden soll. R^2 ist ein statistisches Bestimmtheitsmaß, das den Anteil der Varianz für einen Output darstellt, der durch die Variablen in einem Regressionsmodell erklärt wird. Es misst, wie gut das Modell an die Daten angepasst ist, wobei höhere Werte auf eine bessere Anpassung hindeuten. Abbildung 4.23 zeigt die Abhängigkeit dieser Metriken von der Größe des Trainingsdatensatzes. Dabei wurden 25 % der Datenpunkte als Testdatensatz abgespalten und zehn Variationen der Trainingsdaten getestet, um die Konfidenzintervalle der Metriken zu bestimmen. Bei einem Minimum von etwa 60 Trainingspunkten erreichen beide Kennzahlen Konvergenz für die drei Zielaspekte. Diese Erkenntnis ist für die Bestimmung der notwendigen Modellauswertungen bei der multikriteriellen Optimierung von Bedeutung. Dadurch kann der Optimierungsprozess effizienter gestaltet und unnötige Durchläufe vermieden werden.

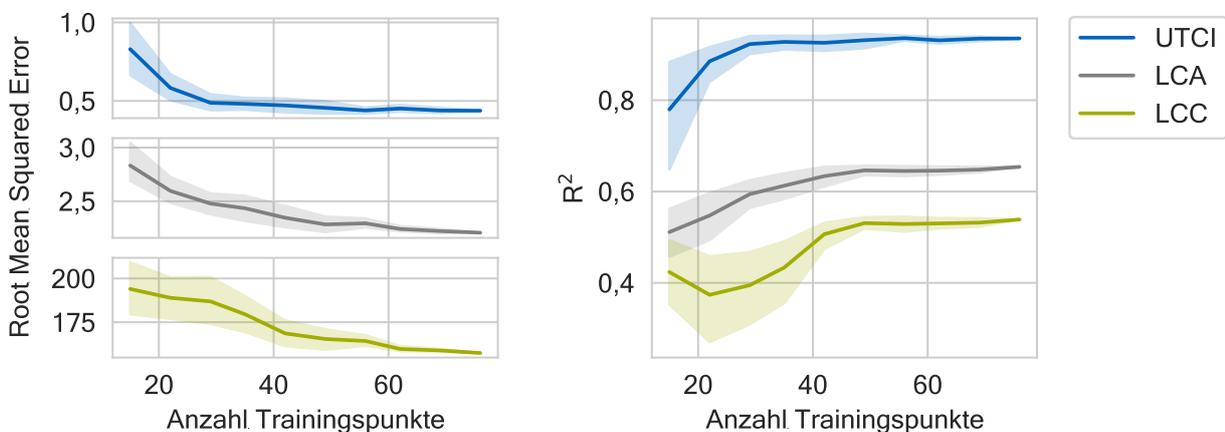


Abbildung 4.23 Qualität der Ersatzmodelle in Abhängigkeit der Trainingspunktezahl. Die schattierten Bereiche geben die Konfidenzintervalle der Metriken wieder. UTCl: Universal Thermal Climate Index (thermischer Außenraumkomfort); LCA: Lifecycle Assessment (THG-Emissionen); LCC: Lifecycle Cost (Lebenszykluskosten)

Abbildung 4.24 zeigt die mithilfe der finalen Ersatzmodelle ermittelte PF im dreidimensionalen Target Space. Die Ergebnisauswertung erfolgt zunächst für die einzelnen Zielgrößen der Fallstudie. Anschließend werden die Eigenschaften der Pareto Lösungen näher beleuchtet. Abschließend werden beispielhafte Steuerungsmöglichkeiten für den Trade-off, der in Abbildung 4.24 durch den als Cluster 4 bezeichneten Bereich repräsentiert wird, vorgestellt.

Der thermische Außenraumkomfort liegt innerhalb einer Spanne von 29,2°C bis 33,9°C. Demnach können im Bereich der optimalen Lösungen Konstellationen umgesetzt werden, welche die Hitzebe-

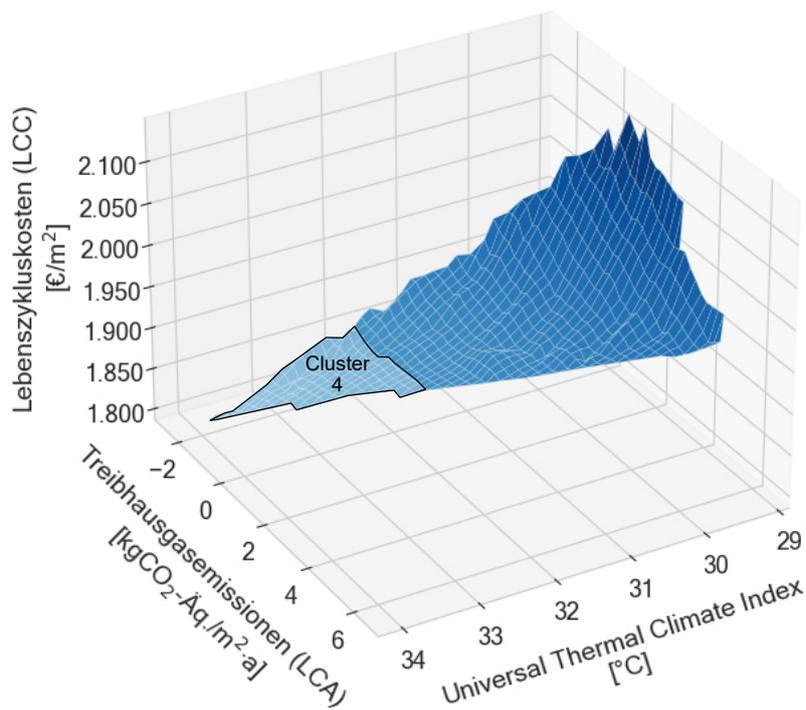


Abbildung 4.24 Pareto Front des Quartiersmodells über die drei Zieldimensionen THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort. Cluster 4 bezeichnet den im Folgenden beispielhaft näher erläuterten Teilbereich der PF.

lastung von starkem Hitzestress auf moderaten Hitzestress an besonders ungünstigen Sommertagen reduzieren. Der Grenzwert hierfür liegt bei $32,0^{\circ}\text{C}$ [139]. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den simulierten Ergebnissen um Durchschnittswerte über das betrachtete Quartier handelt. Die UTCI Skala bewertet hingegen punktuelle Konstellationen, weshalb die Durchschnittsbildung eine derartige Einstufung abmildert. Dieses Vorgehen wird in Literatur und Praxis dennoch häufig eingesetzt, um Szenarien zu vergleichen [212]. Die durchschnittlichen UTCI Ergebnisse ändern sich in der hier untersuchten Fallstudie um maximal $4,7^{\circ}\text{C}$. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von Geletič et al. überein, welche ebenfalls Mittelwerte auf urbaner Ebene bilden und deren Änderungen durch den UHI Effekt den punktuell auftretenden Veränderungen gegenüberstellen. Abhängig vom Betrachtungsradius stellen sie einen Einfluss der im Rahmen dieser Dissertation ermittelten Größenordnung fest [212].

Für die THG-Emissionen im Lebenszyklus ergeben sich entlang der PF Werte zwischen $-2,4$ und $6,1 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\text{-a}$. Da Benchmarks für lebenszyklusbasierte THG-Emissionen in der Gebäudesanierung erst entwickelt werden, sind die absoluten Ergebnisse nur bedingt vergleichbar [179]. Aufgrund der Gutschrift von überschüssig generierten Strom aus der PV-Anlage während der Dekarbonisierung des Stromnetzes erzielt das hier betrachtete Passivhauszenario in einigen Konstellationen negative Ergebnisse. Dies würde eine Reduktion von Treibhausgasen in der Atmosphäre über den Lebenszyklus des betrachteten Quartiers bedeuten. Derartige Ergebnisse wurden auch in anderen Studien erreicht, insbesondere wenn PV-Anlagen Teil der Betrachtung sind [223]. Es existieren dagegen auch Untersuchungen die zeigen, dass selbst mit PV-Anlagen die Umsetzung von Null-Energie- bzw. Null-Emissions-Gebäuden auf stündlicher Basis nicht realisierbar ist. Dies hängt von den in der jeweiligen Untersuchung getroffenen Annahmen ab [224] und ist ohne eine Verbesserung im Strommix nicht

umsetzbar [42]. Beispielsweise zeigt die Studie von Passer et al. keine negativen Werte für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen von Gebäudesanierungen im österreichischen Kontext. Diese Unterschiede können auf abweichende Bewertungsgrenzen und Rahmenbedingungen zurückgeführt werden. Beispielsweise wurde im Rahmen dieser Dissertation der deutsche Strommix unter Annahme einer Umstellung auf erneuerbare Energiequellen innerhalb der ersten 25 Jahre des Betrachtungszeitraums verwendet, während Passer et al. in ihrer Studie auch längerfristig einen Anteil fossiler Brennstoffe berücksichtigen. Aufgrund der dargelegten widersprüchlichen Studienlage werden die LCA Ergebnisse dieser Dissertation nicht als das Erreichen eines ganzheitlich klimaneutralen Gebäudes bewertet. Sie deuten jedoch darauf hin, dass es in der Pareto-optimalen Menge eine Bandbreite von Ökobilanzergebnissen gibt und nicht eine einzige Lösung, die unter allen betrachteten Aspekten am besten abschneidet. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit für Planer:innen, sich mit derartigen Zielkonflikten auseinanderzusetzen.

Unter den hier angesetzten Rahmenbedingungen erweist sich die PV Integration auf Dächern und Fassaden in Kombination mit intensiven Sanierungsmaßnahmen als relevante Option, um lebenszyklusbasierte THG-Emissionen von Gebäuden und Quartieren deutlich zu reduzieren. Bei geringeren CO₂-Gutschriften für exportierten Strom könnte der hohe Energiestandard allerdings zu erhöhten THG-Emissionen aufgrund großer Mengen an Dämmstoffen führen, welche die betrieblichen Einsparungen aufwiegen [30]. Dies wurde bei der Untersuchung auf Gebäudeebene in Kapitel 4.3.3 bereits dargelegt (sh. Seite 64).

Die Lebenszykluskosten weisen eine Spanne von 1.789 bis 2.126 €/m² auf. Wie für die Ökobilanz existieren auch für Lebenszykluskosten im Rahmen von Sanierungen nur wenige Benchmarks und selten vergleichbare Systemgrenzen. Ein Beispiel hierfür stellt der Kriterienkatalog zur Gebäudesanierung der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen dar [226]. Darin werden die Lebenszykluskosten nach der ISO 15686-5:2008 [193] ermittelt und um zusätzliche Festlegungen des Zertifizierungssystems ergänzt. Dazu zählen unter anderem die Ermittlung des Energiebedarfs nach dem GEG, die Berücksichtigung pauschalierter Reinigungs- und Instandsetzungskosten oder die zu berücksichtigenden Kostengruppen. Aufgrund dieser abweichenden Rahmenbedingungen ist eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen dieser Dissertation nicht gegeben. Der variierende Einfluss der Lebenszyklusphasen je nach Anwendungsfall ist ein weiterer Grund für die geringe Vergleichbarkeit von LCC Ergebnissen. Oregi et al. zeigen, dass für kühlere Klimazonen der Einfluss der Betriebsphase gegenüber der Herstellungsphase meist überwiegt und daher der Gebäudebetrieb im Fokus stehen sollte [185]. Die Autor:innen der Studie argumentieren allerdings auch, dass bei Gebäuden mit einer verkürzten Restlebensdauer, wie dies bei Sanierungen der Fall sein kann, ein vielschichtiges lebenszyklusbasiertes Verhalten vorherrscht und daher tendenziell mehr Phasen zu berücksichtigen sind. Kosten zählen dabei neben Energieverbräuchen zu den am häufigsten betrachteten Aspekten bei Nullenergiegebäuden [26]. Hochgedämmte Gebäude sind nicht immer kostenoptimal [227]. Dies zeigt sich in der Quartiersfallstudie dieser Dissertation durch die Ausbildung einer breiten PF zwischen den stark vom Energiebedarf abhängigen THG-Emissionen und den berechneten Lebenszykluskosten im Bereich eines moderaten thermischen Außenraumkomforts von unter 32 °C (sh. Abbildung 4.24).

Zu Beginn dieses Kapitels wurde die Sicherung der Vorhersagequalität durch die gängigen Kennzahlen R² und RMSE dargelegt. Daneben bieten GPR basierte Ersatzmodelle die Möglichkeit, die Modellunsi-

cherheiten für jede Vorhersage einzeln auszugeben. Dies geschieht in Form der Standardabweichung des Modells am jeweils vorhergesagten Punkt. Dadurch lassen sich Bereiche der PF erkennen, bei denen die Modelle größere Unsicherheiten aufweisen und unter Umständen weniger robust bei der Umsetzung des entsprechenden Trade-offs sind. Dies ist in der Entscheidungsunterstützung besonders relevant, wenn dadurch die Pareto Eigenschaft von Lösungen gefährdet wird. In einem solchen Fall kann es von Vorteil sein, einen anderen Trade-off Bereich anzustreben [224]. Zudem spielen Unsicherheiten bei der Verwendung von Verfahren zur stochastischen multikriteriellen Optimierung eine Rolle [228]. Im Rahmen des hier beschriebenen Vorgehens zur *Urban Systems Exploration* werden die ermittelten Unsicherheiten dazu eingesetzt, die Qualität der Ersatzmodelle in verschiedenen Bereichen der PF einzuschätzen.

Abbildung 4.25 zeigt die ermittelten Standardabweichungen für jede der drei Zielgrößen. Dabei ist zu erwarten, dass die Reihenfolge der größten relativen Standardabweichungen für alle drei GPR Modelle identisch ausfällt, da diese mit den identischen Eingangsgrößen trainiert wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kovarianzfunktion der GPR ausschließlich mit den Werten des Design Space bestimmt wird. Die absoluten Werte der Standardabweichung unterscheiden sich jedoch. Dabei liegen die maximalen Ergebnisse bei 69,40 €/m² (Lebenszykluskosten), 1,14 kgCO₂-Äq./m²·a (THG-Emissionen) und 0,94 °C (thermischer Außenraumkomfort, UTCI). Für die meisten der ermittelten Pareto Punkte zeigen sich jedoch niedrige Werte, was eine hohe Vorhersagequalität in den überwiegenden Bereichen der PF erwarten lässt. Ausreißer treten nur im Bereich hoher Lebenszykluskosten auf. Bei der Umsetzung von dort verorteten Lösung (niedrige THG-Emissionen, guter thermischer Außenraumkomfort, hohe Lebenszykluskosten) sollte daher eine nähere Untersuchung von deren Robustheit durch detailliertere Simulationen spezifischer Szenarien erfolgen.

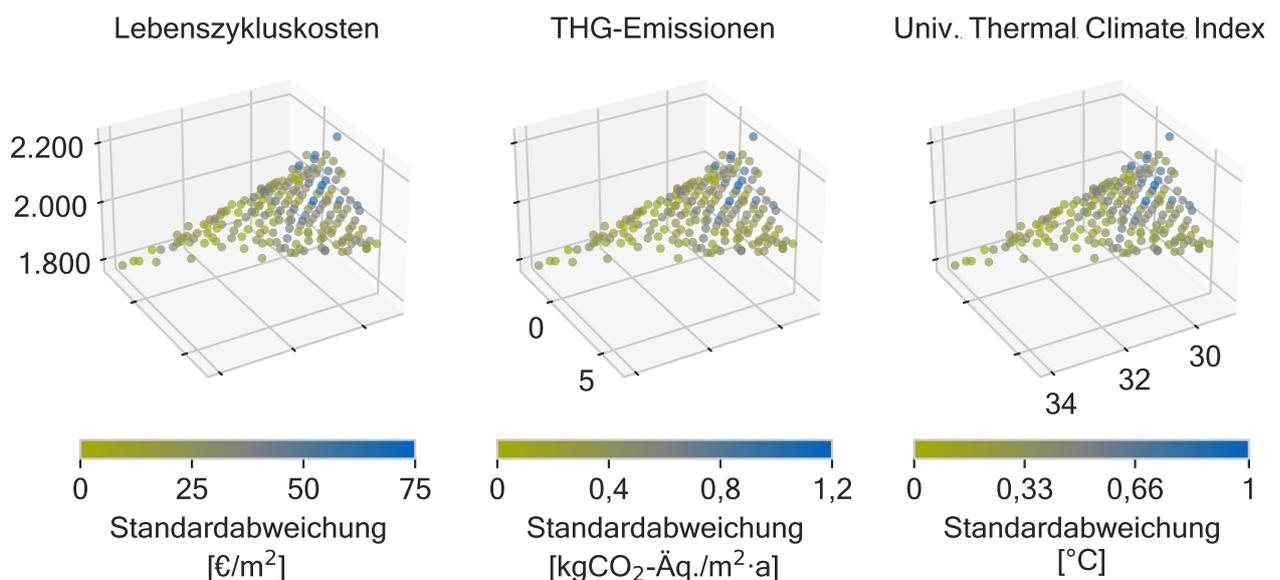


Abbildung 4.25 Mittels der GPR Ersatzmodelle ermittelte relative Standardabweichungen entlang der PF. Die höchsten Werte treten im Bereich hoher Lebenszykluskosten auf.

Zur Auswahl der einflussreichsten Inputs für die weitere Analyse wurde eine Sobol-Sensitivitätsanalyse mit den Ersatzmodellen der drei Zielaspekte durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere der Baumanteil, der Baumkronendurchmesser und der PV Anteil der Ost-West Fassaden als Kontrollparameter verwendbar sind. Die genannten Inputs weisen bei der Sensitivitätsanalyse nach Sobol den höchsten Gesamteffekt auf. Dieser inkludiert die direkten Effekte und die Effekte, die sich aus den Wechselwirkungen mit den weiteren Parametern ergeben (sh. Abbildung 4.26).

Daniel et al. zeigen ebenfalls, dass grüne Maßnahmen oft stärker auf klimaanpassungsrelevante Kennzahlen wie den thermischen Außenraumkomfort ausgerichtet sind. Energetische bzw. gebäudetechnische Komponenten wie die PV-Anlage sind hingegen meist für Klimaschutzaspekte relevant [11]. Dies ist ebenso an den Ergebnissen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse erkennbar. Der Baumanteil weist dabei den höchsten Ausschlag beim thermischen Außenraumkomfort auf, während die PV Anteile der Ost-West Fassaden bei den THG-Emissionen den höchsten Wert aufweisen. Diese beiden Parameter sind auch für die anderen KPIs relevant, was die Notwendigkeit des Einbezugs der auftretenden Wechselwirkungen aufzeigt. Beispielsweise nimmt der Baumanteil ebenso für die Lebenszykluskosten eine wichtige Rolle ein. Dies ist auf den sinkenden Stromertrag bei einer Verschattung von PV Flächen und die hohen Kosten für die Herstellung und den Unterhalt von Stadtbäumen zurückzuführen. Daneben zeigen die weiteren Parameter für einzelne Aspekte ebenfalls Ausschläge der Sensitivitäten und sollten nicht vernachlässigt werden. Ein Beispiel für einen Parameter mit geringer Sensitivität ist der PV Anteil der Südfassade. Dies ist unter anderem auf die vergleichsweise geringe Fläche der Nord-Süd ausgerichteten Längsachse des betrachteten Zeilenbaus zurückzuführen. Aus den Ergebnissen lässt sich eine optimale Spanne für den PV Anteil der Südfassade ablesen, welche als Planungshilfe einsetzbar ist. Dadurch kann der Wertebereich zur Erzielung optimaler Lösungen stark eingegrenzt werden. Nach dieser Methode festgelegte Parameter sind für den untersuchten Trade-off nach wie vor von hoher Relevanz, da Änderungen dazu führen können, dass die Pareto Eigenschaft einzelner Lösungen verloren geht.

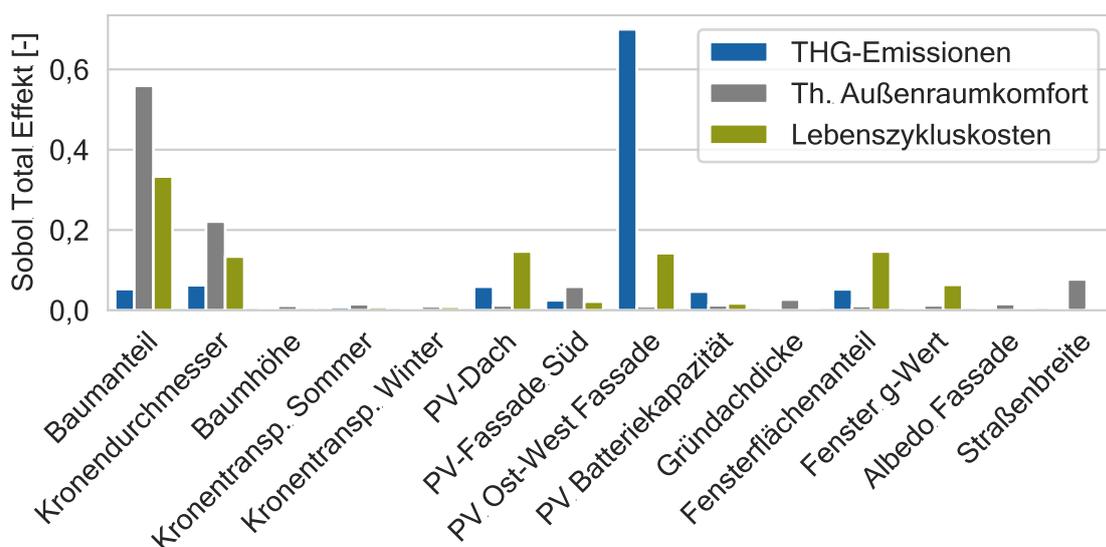


Abbildung 4.26 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse nach Sobol für die Zeilenbau Fallstudie anhand der GPR Ersatzmodelle.

Die in dieser Dissertation angewandte Sobol Sensitivitätsanalyse wurde über den gesamten Raum der möglichen Modellergebnisse durchgeführt und ist nicht nur auf Pareto-optimale Lösungen beschränkt. Daher sollten Entscheidungen überprüft und weniger sensitive Parameter nur unter Zugrundelegung einer Auswertung der Einzelevaluationen ausgeschlossen werden (sh. Schritt (8), Abbildung 4.22, Seite 77).

Um einen besseren Überblick und eine qualitative Beschreibung der vorliegenden Trade-offs zu ermöglichen, wird das weit verbreitete Clusteringverfahren K-Means angewendet [229]. Mithilfe der Gap-Statistik [230] wurde sieben als angemessene Clusteranzahl in diesem Fallbeispiel ermittelt. Das bedeutet, dass die PF in sieben Teilbereiche mit unterschiedlichen Charakteristika eingeteilt wird. Abbildung 4.24 zeigt beispielhaft Cluster vier im dreidimensionalen Target Space. Dieses Cluster zeichnet sich durch ein überdurchschnittliches Abschneiden bei den Aspekten THG-Emissionen sowie Lebenszykluskosten aus. Dagegen weist es die höchsten (d. h. schlechtesten) Ergebnisse beim thermischen Außenraumkomfort auf. Die Charakterisierung der weiteren Cluster ist in Abbildung 4.27 auf einer qualitativen Skala dargestellt. Dabei wurden die absoluten Ergebnisse auf einen Wertebereich von null (gut) bis eins (schlecht) normiert, um sie in der Darstellung vergleichbar zu machen und eine bessere Interpretierbarkeit zu gewährleisten. Die Visualisierungsarten werden im nachfolgenden Kapitel 5 näher behandelt. Die Ergebnisse lassen sich in ausgeglichene Gruppen (z. B. Cluster zwei und fünf) oder in Gruppen mit der Priorisierung von einem der Aspekte unterteilen (z. B. Cluster eins). Planer:innen und Entscheider:innen wird damit die Möglichkeit zur Priorisierung von einem oder mehreren Aspekten gegeben, wodurch auf spezifische Anforderungen eines Quartiers eingegangen werden kann.

Nachdem planungsseitig ein Cluster zur Umsetzung festgelegt wurde, werden dessen zugehörige Eingangsvariablen im Design Space ermittelt. Die Pareto Punkte des gewählten Trade-off Clusters werden dazu in den Variablenraum zurückübertragen. Dadurch lassen sich Randbedingungen zur Realisierung eines bestimmten Clusters ableiten. Abbildung 4.28 zeigt den Bereich aller zu Cluster vier zugeordneten Eingaben für Pareto-optimale Lösungen und die entsprechenden Mediane. Die Inputs wurden dafür auf Wertebereiche zwischen null und eins normiert, um sie auf einer gemeinsamen qualitativen Skala von niedrig bis hoch darzustellen. Dies ermöglicht es Stadtplaner:innen auf der Grundlage dieser qualitativen Aussagen Randbedingungen für die weitere Gestaltung festzulegen. Auf die Verwendung quantitativer Werte wird ebenfalls in Kapitel 5 näher eingegangen.

Abbildung 4.28 veranschaulicht, dass durch einen niedrigen bis mittleren Baumanteil mit niedrigen bis mittleren Kronendurchmessern der in Cluster vier repräsentierte Pareto-optimale Trade-off erreicht werden kann. PV Anteile auf Fassaden und Dächern sollten zudem ein hohes Niveau erreichen und mit einem lokalen Batteriespeicher kombiniert werden, um den Eigenverbrauch zu erhöhen. Die absoluten Mediane liegen für den Baumanteil und den Kronendurchmesser bei 20,73 % bzw. 4,56 m. Für die PV bezogenen Variablen liegen die optimalen Anteile auf Ost-West Fassaden und Dach bei 96,68 % bzw. 87,33 %. Die ermittelte Batteriekapazität bewegt sich in einer Spanne von 20,30 kWh bis 35,13 kWh. Diese Konstellation der Planungsvariablen führt zu Pareto-optimalen THG-Emissions- und Kostenwerten, lässt allerdings den thermischen Außenraumkomfort unterdurchschnittlich abschneiden. Das bedeutet, dass eine Verbesserung des letzteren nur durch die Verschlechterung von THG-Emissionen oder Lebenszykluskosten erreichbar ist.

Darüber hinaus erlaubt es diese Art der Darstellung, Eingaben zu identifizieren, die für das Fallstudiengebiet nicht zwangsläufig eingeschränkt werden müssen. Beispiele für solche vergleichsweise freier wählbaren Parameter in Cluster vier sind die Kronentransparenzen in Sommer und Winter, die große Spannweiten aufweisen. Dadurch lassen sich für den durch Cluster vier repräsentierten Trade-off geeignete Eigenschaften der einzusetzenden Baumarten ableiten. Im vorliegenden Fall wäre vorwiegend auf einen niedrigen bis mittleren Kronendurchmesser (Interquartilsabstand: 3,91 m bis 5,24 m) bei mittlerer Baumhöhe (Interquartilsabstand Baumhöhe bis Unterkante Krone: 7,94 m bis 8,66 m; Interquartilsabstand Baumhöhe gesamt: 12,50 m bis 13,22 m) zu achten. Zur Auswahl kann beispielsweise die laufend aktualisierte Straßenbaumliste der Gartenamtsleiterkonferenz verwendet werden [231]. Für die genannten Anforderungen ist demnach unter anderem Kegel-Feldahorn (lat. *Acer campestre* *Elsrijk*) eine geeignete Wahl [232].

Zu den Planungsvariablen mit besonders engen Grenzen zählen die PV Anteile der Ost-West Fassaden, die Gründachdicke sowie der Energiedurchlassgrad der Fenster (g-Wert). Wie im Vorangegangenen festgestellt, bieten PV Flächen hohe Potentiale zur Einsparung von THG-Emissionen, weshalb diese für die Umsetzung von Trade-off Cluster vier essenziell sind. Dies spiegelt sich in der engen Spanne dieses Parameters in den Pareto-optimalen Ergebnissen für Cluster vier wider. Die Vorgabe einer geringen Gründachdicke resultiert aus der Priorisierung von Lebenszykluskosten und THG-Emissionen. Beide Aspekte erfahren eine Erhöhung, wenn intensivere Gründachaufbauten eingebracht werden. Gleichzeitig sinkt durch verringerte Aufbauhöhen die leicht positive Wirkung des Gründachs auf den thermischen Außenraumkomfort, was zur festgestellten Trade-off Charakterisierung von Cluster vier beiträgt (gutes Abschneiden bei THG-Emissionen und Lebenszykluskosten, schlechtes Abschneiden bei thermischem Außenraumkomfort). Der Energiedurchlassgrad von Fenstern sollte in Cluster vier dagegen hoch angesetzt werden, da dies zur Steigerung von solaren Gewinnen und damit zur Reduktion des Heizwärmebedarfs der Gebäude führt. Die damit einhergehende Absenkung von THG-Emissionen und der nur leichte Anstieg der Lebenszykluskosten tragen zum genannten Trade-off bei. Auf den thermischen Außenraumkomfort hat der Energiedurchlassgrad nur eine geringe Wirkung.

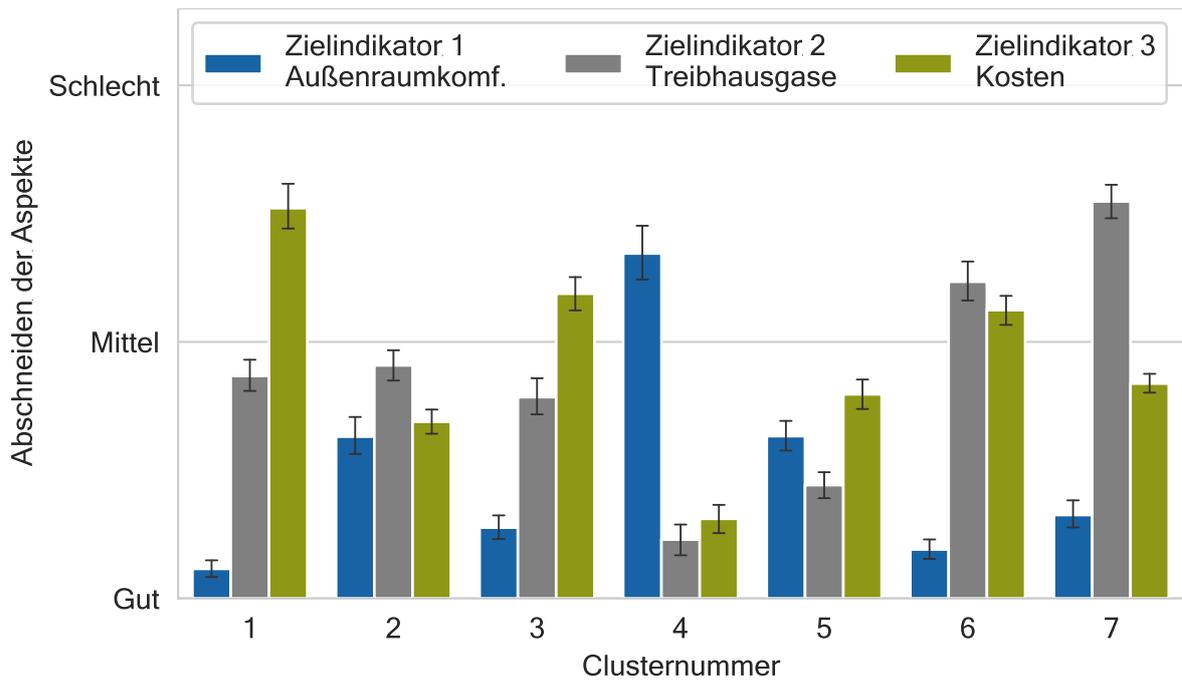


Abbildung 4.27 Charakterisierung der Cluster der Quartiersfallstudie.

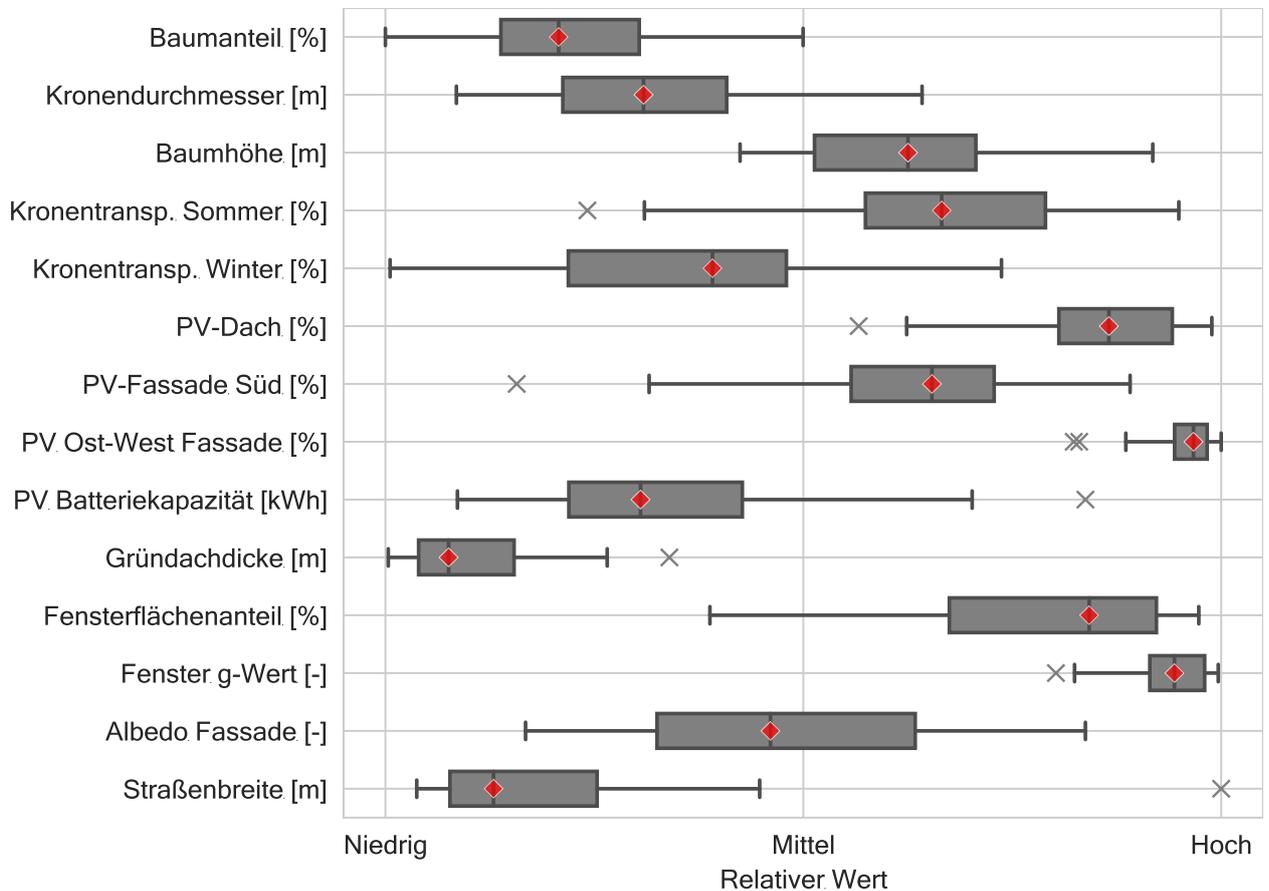


Abbildung 4.28 Streuung der Input Parameter von Cluster vier und zugehörige Mediane (♦).

4.5 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus der Synergiebewertung auf Gebäudeebene:

- Auf der Gebäudeebene ist der Effekt „1 + 1 > 2“ (unikriterielle Synergie) für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen nur in geringem Maße (< 5%) erreichbar. Bei jüngeren Gebäuden bestehen dazu die größten Potentiale.
- Unikriterielle Synergie ist für den Ausgleich von Verschlechterungen der einzelnen Zielaspekte relevant. Dies ist beispielsweise beim potentiellm Kühlenergiebedarf der Fall.
- Für die multikriterielle Synergie zwischen THG-Emissionen, potentiellm Kühlenergiebedarf und Heizwärmebedarf können auf Gebäudeebene zahlreiche Maßnahmenkombinationen identifiziert werden, die alle drei Zielaspekte gleichzeitig verbessern.
- Emissionsarme Energieträger und hohe Energiestandards tragen zu einem positiven multikriteriellen Abschneiden bei. Für die Identifikation Pareto-optimaler Lösungen ist die Anwendung multikriterieller Optimierungsverfahren notwendig.

Kernpunkte aus der Synergiebewertung auf Quartiersebene:

- Die Wirksamkeit unikriterieller Synergie ist auf Quartiersebene ausgeprägter als auf Gebäudeebene. Dies ist auf intensivere Wechselwirkungen mit dem Außenraum zurückzuführen.
- Für die parallele Verbesserung von THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort können auf Quartiersebene zahlreiche Maßnahmenkombinationen identifiziert werden.
- Hohe Energiestandards, Außenraumbegrünung mit Bäumen und PV Flächen tragen zu einem guten Abschneiden hinsichtlich multikriterieller Synergie bei.

Kernpunkte aus dem Kapitel zur multikriteriell optimierten Quartiersplanung:

- Mit den getroffenen Modellkonfigurationen stellt sich ein dreidimensionaler Trade-off zwischen den Aspekten THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort ein. Dies bedeutet, dass keine einzelne optimale Lösung gefunden werden kann. Es existiert ein Raum an optimalen Lösungen, innerhalb dessen Planende abwägen müssen.
- Der Prozess zur *Urban Systems Exploration* ermöglicht es Anwender:innen, diesen optimalen Lösungsraum aufzuzeigen und Entwürfe gezielt in einen bestimmten Bereich zu steuern. Die GPR ist dabei ein geeignetes Ersatzmodellverfahren, um den Lösungs- und Variablenraum vollständig abzubilden und Planenden zugänglich zu machen.
- Baum- und PV Anteile stellen sensitive Designvariablen dar. Zusammen mit einem Clustering der PF und einer Rückführung dieser Cluster in den Variablenraum ist eine Entscheidungsunterstützung zum Umgang mit Trade-offs in frühen Planungsphasen ableitbar.

5 Übertragung in die Planungspraxis

Ziel dieser Arbeit ist neben der Entwicklung eines generischen Prozesses zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung in der Quartiersplanung auch dessen Übertragung in die alltägliche Arbeit von Planer:innen und Entscheider:innen. Dabei besteht für die Forschung eine wesentliche Aufgabe in der transdisziplinären Zusammenarbeit, insbesondere mit Partner:innen aus der Praxis [117]. Hierfür wurde aus den im vorangegangenen Kapitel 4.4.3 vorgestellten Ergebnissen der Fallstudie zunächst ein Quartiersteckbrief mit mehreren Varianten der Entscheidungsunterstützung entworfen. Dieser wurde in Expert:inneninterviews mit den Anforderungen der Praxis abgeglichen und entsprechend überarbeitet (sh. Kapitel 5.1 bzw. 5.2). Die dadurch entwickelte Variante des Quartiersteckbriefs wurde im Rahmen dieser Arbeit für drei in München häufig auftretende Quartierstypologien ausgearbeitet (sh. Kapitel 5.3). Ziel der Steckbriefe ist es dabei typologiespezifische Trade-offs und optimale Handlungsspielräume betrachteter KPIs zu identifizieren. Da jede Typologie in Variationen vorliegt, kann ansonsten eine Verzerrung entstehen, welche die Vergleichbarkeit zwischen den Typologien einschränkt [92]. Die generierten Quartiersteckbriefe sind in Anhang D zu finden (sh. Seite 158).

5.1 Stakeholder:innen und deren Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung

Im Folgenden wird die Gruppe der Stakeholder:innen sowie deren Anforderungen an die Ergebnisaufbereitung dargelegt. Letzteres erfolgt anhand von drei Expert:inneninterviews. Die Interviews zielen neben einem allgemeinen Eindruck zur Integration von Zielkonflikten in den Planungsprozess auf die Identifikation von Stärken und Schwächen verschiedener Darstellungsformen zu multikriteriellen Trade-offs ab. Zielgruppe sind insbesondere Stadtplanungsämter, welche bereits in den frühen Planungsphasen der Quartiersentwicklung involviert sind und wesentlichen Einfluss auf deren Rahmenbedingungen nehmen können. Die Steckbriefe helfen dabei, den optimalen Handlungsspielraum aufzuzeigen. Sie vermitteln einen Überblick der möglichen Lösungen und erlauben die konkrete Unterstützung bei der Umsetzung spezifischer Trade-off Abwägungen. Diese Informationen sind nicht nur für Planungsämter, sondern auch für Planende hilfreich. Sie ermöglichen eine frühzeitige Ermittlung von einfach handhabbaren Kennzahlen für Entwürfe und die Überprüfung ihrer Einhaltung.

5.1.1 Aufbau und Auswertungsmethode der Expert:inneninterviews

Um den Entwurf des Quartiersteckbriefs hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit zu überprüfen, wird der Ansatz empirischer Expert:inneninterviews gewählt. Diese bieten für Gebiete, auf denen zwar umfangreiches Erfahrungswissen bei den Anwender:innen vorliegt, aber nur wenige diesbezügliche Untersuchungen existieren, eine vielversprechende Möglichkeit dieses Wissen zu erheben. Das Ziel der Interviews ist in erster Linie, die Frage nach der Verwendbarkeit des entwickelten Quartiersteckbriefs und dem Vorgehen in der multikriteriellen Kompromissfindung im Rahmen der Stadtplanung zu klären. Hierfür eignen sich qualitative Methoden, da sie ein Nachfragen erlauben und nicht ausschließlich Kausalzusammenhänge aufdecken sollen [233]. Um die Forschungsfrage nach vereinfachten Hand-

lungsempfehlungen zu untersuchen, wird die Methode des leitfadengestützten Expert:inneninterviews gewählt. Die damit durchführbare, qualitative Inhaltsanalyse wird in einzelne Interpretationsschritte aufgelöst, die im Voraus festzulegen sind. Der gesamte Prozess zeichnet sich dadurch aus, dass die resultierenden Aussagen für Dritte nachvollziehbar und überprüfbar bleiben. Das Vorgehen für die Analyse ist an das jeweilige Interviewmaterial und den Einzelfall anzupassen [234].

Für diese Dissertation wurden im Zeitraum zwischen Juli und August 2023 drei Expert:inneninterviews durchgeführt. Die Auswahl der Interviewpartner:innen erfolgte auf Grundlage ihrer jeweiligen Beteiligung zu verschiedenen Zeitpunkten im Planungsprozess sowie einem thematischen Schwerpunkt auf die Themenfelder grüne Infrastruktur sowie Gebäude. Es konnte mit Mitarbeiter:innen der Referate für Stadtplanung und Bauordnung sowie für Klima und Umweltschutz der Landeshauptstadt München und des Referats für Stadtplanung und Umwelt der Stadt Freising gesprochen werden. Die Interviews fanden jeweils mit ein oder zwei Personen aus den genannten Referaten statt. Zur Strukturierung wurde ein Interviewleitfaden entwickelt. Dieser umfasst eine Abfrage zum Umgang mit Zielkonflikten, Meinungen zur Nutzbarkeit und den Visualisierungen des Steckbriefentwurfs sowie zu dessen Entwicklungspotentialen. Die genannten Oberbegriffe wurden in allen Interviews angesprochen und im weiteren Verlauf je nach Arbeitsfeld der Gesprächspartner:innen unterschiedlich stark thematisiert. Dadurch konnten vertiefte Einblicke in die jeweiligen Arbeitsfelder gesammelt werden. Für die Auswertung der Interviews wurden die Audioaufnahmen transkribiert sowie mithilfe der Software MAXQDA [235] codiert und ausgewertet. Das dabei angewandte Vorgehen folgte der strukturierenden Inhaltsanalyse nach Mayring [234]. Hierfür wurde zunächst eine grobe Codestruktur anhand des Interviewleitfadens erstellt und die Aussagen der Interviewpartner:innen entsprechend zugeordnet. Anschließend erfolgte eine iterative Verfeinerung der Codestruktur mit Unterkategorien, auf welche die codierten Segmente aufgeteilt wurden. Die Interpretation der Ergebnisse basiert auf den codierten Segmentgruppen. Dadurch ergibt sich eine Verdichtung der Aussagen und Sichtweisen, die zu einer Kernaussage bezüglich der im Interviewleitfaden entwickelten Fragestellungen führt [236]. Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Aufbau der Interviews sowie die behandelten Kernthemen.

5.1.2 Umgang mit Trade-offs in der Planungspraxis

Die Auswertung der Expert:inneninterviews zeigt, dass in Projektentwicklungen oft der bauliche Bedarf höher gestellt wird als der Bedarf an Grünflächen. Die Entscheidungsfindung zwischen PV und Dachbegrünung ist dabei nur ein genanntes Beispiel. PV-Anlagen sollen laut Expert:innen künftig eine priorisierte Rolle spielen, wobei der Raum für Grünflächen ebenfalls vorhabenspezifisch zu definieren sei. Die Pflegekosten von begrünten Flächen erwiesen sich in den Gesprächen als relevanter Faktor zur diesbezüglichen Abwägung. Im Zusammenhang mit Grünflächen anfallende THG-Emissionen oder Bindungspotentiale werden dagegen seltener diskutiert. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Umweltaspekte stärker in den städtischen Diskurs zu integrieren und dabei die positiven Effekte von Grünflächen auf die THG-Reduktion hervorzuheben. Die Interviewpartner:innen führten weiter an, dass mit zunehmender Tiefe der Analyse die Komplexität in der städtischen Planung ansteige. Das erklärte Ziel einer optimalen Zielerfüllung einzelner Fachbereiche stehe oft im Kontrast zur tatsächlichen Entscheidungsfindung, in der deutlich wird, dass Kompromisse mit anderen Disziplinen unvermeidbar sind. Die aus dem Quartiersteckbrief resultierende Darlegung des optimalen Lösungsraums anstelle nur einer

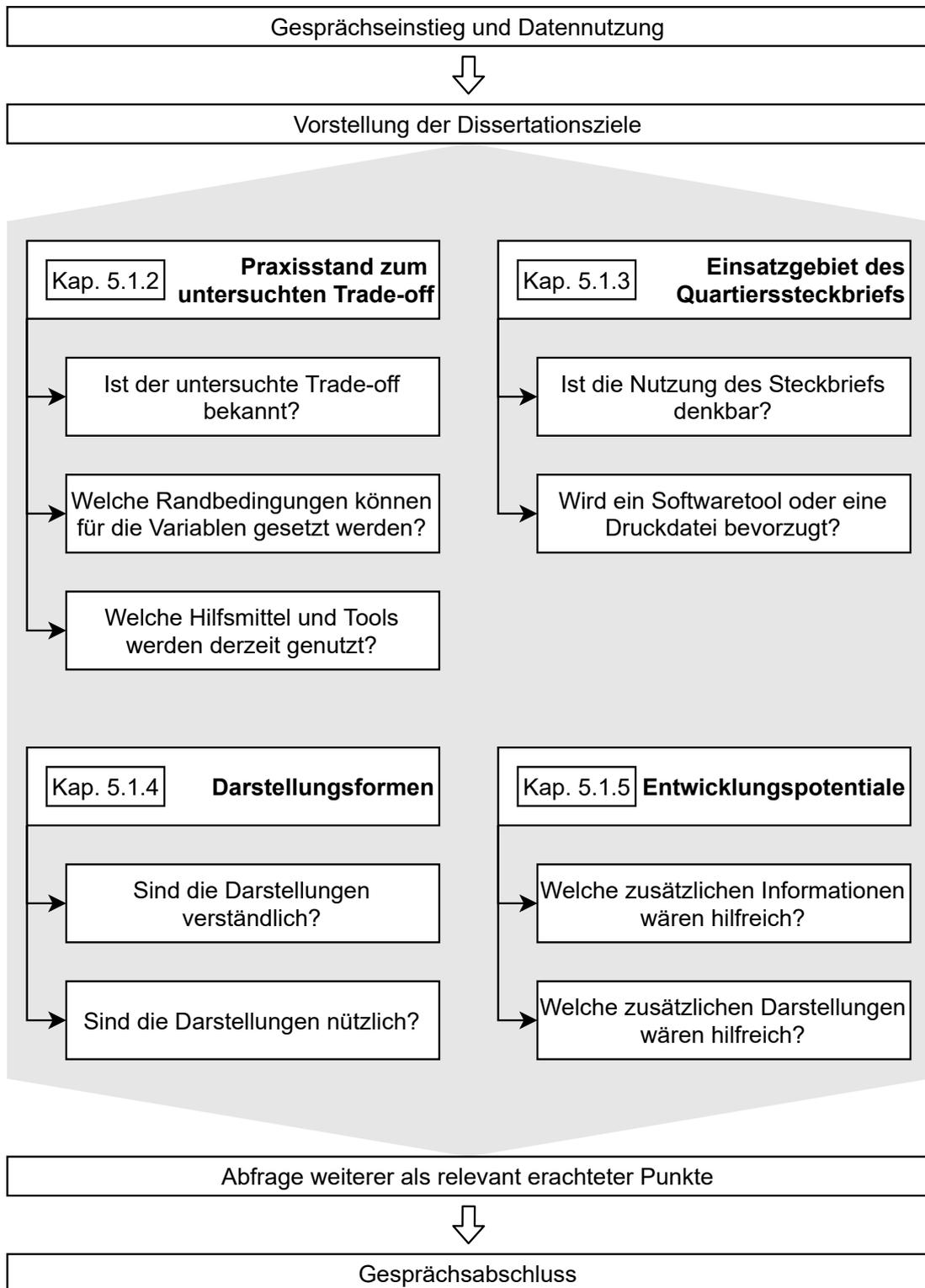


Abbildung 5.1 Aufbau und Fragestellungen der durchgeführten Expert:inneninterviews. Die angegebenen Kapitelnummern verweisen auf die Interviewauswertungen in dieser Dissertation.

optimalen Lösung wird als wesentlicher Mehrwert gesehen. Diese Erkenntnis ermöglichte den Beteiligten eine flexiblere Reaktion auf die Herausforderungen der Planung und verbesserte die Zustimmung zu Kompromissvorschlägen. In zwei der drei Interviews wurde zudem die Festlegung von Untergrenzen für einzelne Aspekte als häufige Herangehensweise betont. Diese Grenzen stammten oft aus Gutachten der Fachbereiche und dienten als Leitlinien für eine quartierspezifische Entwicklung.

Insgesamt ist der Trade-off zwischen den THG-Emissionen, den Lebenszykluskosten und dem thermischen Außenraumkomfort den Planungsakteur:innen durchaus bewusst, wenn auch nicht vollumfänglich in den derzeitigen Kommunikations- und Planungsprozessen vertreten. Der Grundgedanke des entwickelten Steckbriefs wurde dabei als wertvoll erkannt, insbesondere bei der Bestimmung des Kompromissrahmens.

„Aber irgendwo macht man einen Kompromiss am Ende, weil man nie alles perfekt hin bekommt, weil es eben Wechselwirkungen hat, weil es sich aufwiegt [...] und dass man jetzt einfach mal einen Schritt zurücktritt und sagt na ja, was kann ich denn überhaupt optimieren und was habe ich für Möglichkeiten, um zu einem Optimum für möglichst alle Belange zu kommen?“ [237]

Neben der Abfrage des Bewusstseins zu vorherrschenden Trade-offs wurden die Expert:inneninterviews genutzt, um relevante Zielgrößen und Steuerungsvariablen zu identifizieren. Dabei zeigte sich, dass eine umfängliche Quantifikation in der frühen Bauleitplanung nur selten durchgeführt wird und daher nur wenige Mindestvorgaben innerhalb einzelner Referate in der Stadtverwaltung existieren. Eine auf spezifische Quartiere abgestimmte Bewertung sei aufgrund der damit verbundenen Kosten ebenfalls nur in wenigen Fällen möglich und eine Zwischenlösung daher wünschenswert. Die drei verwendeten Zielgrößen wurden von den Expert:innen durchweg als relevant eingestuft. Dabei stünden Lebenszykluskosten insbesondere dann im Fokus, wenn die öffentliche Hand als Bauherrin auftritt. In privaten Vorhaben seien diese weniger von Interesse. Der thermische Außenraumkomfort würde dagegen fast immer abgewogen. Dabei sei die im Rahmen dieser Dissertation angewandte Durchschnittsbildung über das Planungsgebiet ein in der Quartiersplanung gängiges Verfahren und die Kennzahl daher gut vergleichbar. Die Bewertung der THG-Emissionen und das damit verbundene Ziel der lebenszyklusbasierten Klimaneutralität wird als häufig herangezogener Planungsaspekt genannt. Dabei ist dies laut Expert:innen oft nicht im Detail regelbar, was die Notwendigkeit unterstreicht Zusammenhänge zu erkennen und über systemische Hebel an anderer Stelle die Planung in eine entsprechende Richtung zu lenken.

Als gut beeinflussbare Planungsvariablen im Zuge von Wettbewerben, Bauleitplanungen oder Gestaltungssatzungen wurden unter anderem die Anzahl der Bäume sowie die Empfehlung von Baumarten genannt. Daneben seien PV-Anlagen auf Dach und zunehmend auf Fassaden gut steuer- und umsetzbar. Dies gelte auch für Gründächer und die Oberflächenausführung des Freiraums sowie Straßenbreiten. Insbesondere der Einfluss von versiegelten Verkehrsflächen wurde als interessant für den Vergleich unterschiedlicher Mobilitätskonzepte gesehen. Beispielsweise lassen sich dadurch die Auswirkungen konventioneller Auto- und Busspuren gegenüber Fahrrad- und Fußgängerwegen veranschaulichen. Zu den weniger steuerbaren Variablen zählen Batteriespeicher und konkrete Ausführungseigenschaften der Fenster. Grundsätzlich soll in Planungswettbewerben und Bebauungsplänen aber auch eine ge-

wisse Varianz sichergestellt bleiben. Daher wird oft eine Auswahl gewünschter Randbedingungen vorgegeben. Dies könne etwa eine Liste mit zulässigen Baumarten oder die Empfehlung verschiedener Ausführungsvarianten der erneuerbaren Energieerzeugung sein. Weiterhin geben die Interviewpartner:innen zu bedenken, dass viele Rahmenbedingungen im Planungsgebiet zwar in Wettbewerben angedacht, aber nur bedingt bau- und ordnungsrechtlich vorgeschrieben werden können.

5.1.3 Einsatzgebiet des Quartiersteckbriefs

Die Zielsetzung des entwickelten Quartiersteckbriefs besteht darin, möglichst frühzeitig im Planungsprozess zu unterstützen. Dies ermöglicht eine proaktive Herangehensweise, welche die etablierten städtebaulichen Voruntersuchungen anreichert. In den Expert:inneninterviews wurde betont, dass der Quartiersteckbrief insbesondere in Entwurfsphasen, beispielsweise bei Wettbewerbsauslobungen, eingebracht werden könne. Die Ableitbarkeit von Rahmenbedingungen für einzelne Planungsvariablen wurde hierbei als besonders geeignet betont, um Wettbewerbsteilnehmer:innen gezielt Hilfestellungen zu geben, ohne dabei ihre kreative Freiheit einzuschränken. Besonders interessant seien dabei von-bis-Bereiche, wodurch der Quartiersteckbrief auch eine Grundlage für die Entwicklung und Bewertung von städtebaulichen Konzepten biete. Dadurch wird er auch für Planende nutzbar, die sich damit grob orientieren und ihre Ergebnisse kontinuierlich abgleichen können.

Der Quartiersteckbrief wurde zudem als geeignetes Werkzeug im Planungsprozess und der Diskussion mit Fachstellen bewertet. Er ermögliche es, die eigene Kompromissbereitschaft zu hinterfragen und die Flexibilität bei der Lösungsfindung zu fördern. Dies wiederum eröffne Raum für neues Denken und unterstreiche die Tatsache, dass mehr als eine optimale Lösung existiert. Ein weiterer Einsatzbereich des Quartiersteckbriefs liege in der Überprüfung einzelner Änderungsvorschläge. Dies könne beispielsweise die Sensitivität bestimmter Faktoren betreffen. Als Beispiel wurde die Tatsache genannt, dass Stadtbäume zwar kostenintensiv seien, jedoch einen enormen Einfluss auf den thermischen Außenraumkomfort hätten. Nicht zuletzt diene der Steckbrief als unterstützendes Instrument zur Stärkung der Argumentation in Verhandlungen und Diskussionen rund um spezifische städtebauliche Entwicklungen. Eine unmittelbare Nutzung des Steckbriefs zur Kommunikation in Entscheidungsgremien wurde hingegen als wenig realistisch eingeschätzt, da die Darstellungen komplexe Zusammenhänge stark vereinfachten und dadurch die Gefahr von Fehlinterpretationen bestehe.

Zusammenfassend liegt ein entscheidender Vorteil des Quartiersteckbriefs in der Möglichkeit, die Kompromissfindung in städtebaulichen Prozessen durch die Veranschaulichung der zugrundeliegenden Komplexität zu unterstützen. In den Interviews wurde allerdings auch betont, dass ein Punkt existiere, an dem nicht mehr alle Faktoren von den Beteiligten verarbeitet werden können. Der Quartiersteckbrief fungiert als Werkzeug, um den Entscheidungsprozess in solchen Fällen zu unterstützen. Durch die Veranschaulichung, wie Zielgrößen auf die Veränderung einzelner Parameter reagieren, wird der Diskussionsprozess objektiviert und ein Verständnis für die Komplexität der städtebaulichen Fragestellungen aufgebaut. Dies fördert eine breitere Perspektive und ermöglicht es den Beteiligten, verschiedene optimale Szenarien zu berücksichtigen.

Der Quartiersteckbrief kann auch dazu beitragen, unerwartete Konfigurationen aufzudecken und in die Diskussion einzubeziehen. In der untersuchten Fallstudie wurde beispielsweise festgestellt, dass opti-

male Lösungen auch mit starker Begrünung und gleichzeitig vieler dadurch verschatteter PV Flächen möglich sind. In diesem Zusammenhang werden von den Interviewpartner:innen Möglichkeiten zur Prüfung und Reflexion der Ergebnisse als wünschenswert erachtet, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu sichern.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Diskussion in städtebaulichen Prozessen oft herausfordernd ist, da viele Fachbereiche mit individuellem Fokus beteiligt sind. Hier kommt dem Quartiersteckbrief und der zugrundeliegenden *Urban Systems Exploration* eine unterstützende Rolle zu, indem diese als disziplinenübergreifende Grundlagen fungieren und dazu beitragen, die Komplexität zu strukturieren. Oft wird in solchen Verfahren auf Erfahrungswissen zurückgegriffen, um diese Vielschichtigkeit zu bewältigen und den Diskussionsprozess zu erleichtern. Der Quartiersteckbrief bietet somit nicht nur eine visuelle Darstellung von Optimierungsergebnissen, sondern auch eine strukturierte Grundlage für den Austausch von Wissen und die Integration verschiedener Perspektiven in die städtebauliche Diskussion.

„[...] weil ich finde, hier ist ja die tolle Aussage, die man oft nicht sieht, dass es viele Kompromisslösungen gibt und dass man nicht verzweifelt auf einen Kompromiss hinarbeiten muss, sondern dass man eine gewisse Flexibilität hat und es mehrere optimale Lösungen gibt. Das beruhigt schon mal alle Gemüter vielleicht so ein bisschen. Da kann man ganz sachlich in die Diskussion gehen.“ [237]

5.1.4 Darstellung multikriterieller Entscheidungsräume für die Praxis

Im Zuge der Interviews wurden auch konkrete Entwürfe zur Ergebnisdarstellung mit den Expert:innen besprochen. Dabei standen neben der Integration zusätzlicher Erläuterungen zu den getroffenen Annahmen und Randbedingungen überwiegend vereinfachte Darstellungen im Fokus. Auch der generelle Umfang des Steckbriefs sollte möglichst knapp gehalten werden, um Anwender:innen nicht zu überfordern und einen schnellen Einstieg zu gewährleisten. Eine weitere wesentliche Frage dabei war, wie nützlich quantitative Informationen in solch frühen Planungsstadien (z. B. Wettbewerbsauslobung) sind. In den Interviews zeigte sich, dass die hier betrachteten Abwägungen nur selten derart quantitativ erfolgen, wie es mit den vorliegenden Ergebnissen der *Urban Systems Exploration* möglich wäre. Die den Abbildungen zugrunde liegenden Zahlenwerte werden zwar als nützlich eingeschätzt, seien für die ersten Abstimmungen aber nicht zwingend erforderlich und sollten eher nachrangig zur Verfügung stehen. Erst bei der tatsächlichen Umsetzung einer Auslobung seien quantitative Werte gut einzubringen. Dementsprechend kann festgestellt werden, dass qualitative Darstellungen den Abstimmungsprozess unterstützen, Quantifizierungen dagegen in der Umsetzung nützlich sind. Hinzu kommt der Wunsch nach Minimum- und Maximum-Angaben für Zielaspekte und Planungsparameter, um die Spannweite von Zielgrößen des optimalen Handlungsspielraums schnell einordnen zu können. Im Folgenden werden jeweils einzelne vorgestellte Darstellungsformen gezeigt und die zugehörigen Erkenntnisse aus den Interviews sowie die vorgenommenen Veränderungen erläutert.

„Wie gesagt, das ist ja eigentlich der Versuch unsere tägliche Arbeit in einer Matrix darzustellen. Aber unsere tägliche Arbeit ist eben unglaublich komplex. Deswegen ist es auch ein hohes Ziel, das so darstellen.“ [237]

Eine Übersicht zum Handlungsspielraum wurde durch die dreidimensionale Abbildung der zwischen den Zielaspekten resultierenden PF gegeben (sh. Abbildung 4.24, Seite 79). Diese wurde als guter Einstieg in die Thematik von urbanen Trade-offs und Zielkonflikten bewertet, welcher zeigt, dass verschiedene optimale Lösungen umsetzbar sind. Da die dreidimensionale Darstellung kein exaktes Ablesen der Ergebnisse erlaubt, wurden zudem die in Abbildung 5.2 dargestellten Violinplots verwendet. Diese geben sowohl Aufschluss über die minimalen und maximalen Ausprägungen jeder Zielgröße, als auch über die Verteilung der dazwischenliegenden Ergebnisse. Hierbei zeigten die Interviews, dass die Interpretation im Zusammenhang mit der Dreidimensionalität der multikriteriellen Problemstellung eine hohe Fehleranfälligkeit aufweist. Dies führte zum Konsens, dass eine reine Auflistung der Minima, Maxima und Mittelwerte für jeden der Aspekte hilfreicher und einfacher verständlich ist. Abbildung 5.3 zeigt die grafische Aufbereitung, wie sie sich im finalen Steckbrief findet.

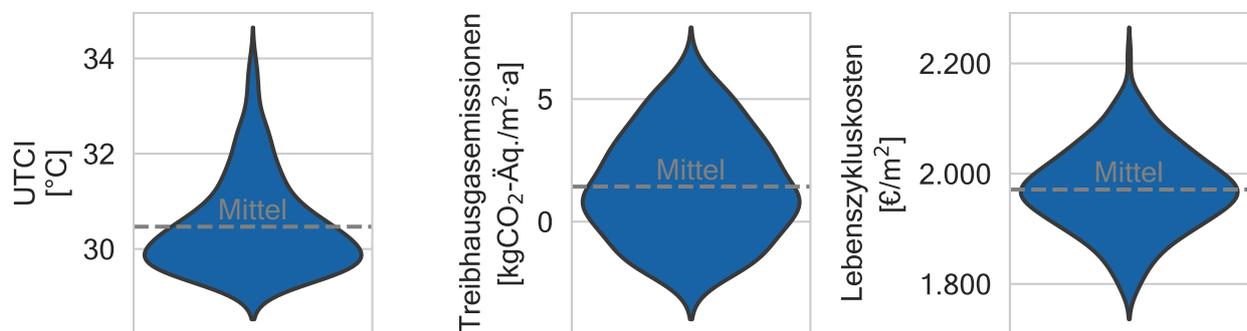


Abbildung 5.2 Im ersten Entwurf des Quartiersteckbriefs vorgeschlagene Violinplots mit Mittelwerten.



Abbildung 5.3 Im Zuge der Expert:inneninterviews als gut geeignete Darstellungsform identifizierte Wiedergabe von Minima, Maxima und Mittelwerten der Zielgrößen.

Zur Charakterisierung der Cluster wurde neben dem bereits gezeigten Balkendiagramm (sh. Abbildung 4.27, Seite 85) eine farbige Zuordnung der Cluster im dreidimensionalen Plot vorgeschlagen. Dabei wurde das Balkendiagramm in allen Interviews gegenüber der dreidimensionalen Darstellung bevorzugt. Der Zusammenhang zwischen den Zielaspekten und den Clustern könne laut den Gesprächspartner:innen auch über die Balkendarstellung gut hergestellt werden. Zudem sei dies ein in der Praxis geläufiger Diagrammtypus, der dadurch schnell erfasst würde. Alle Interviewpartner:innen erkannten den vorgesehenen Anwendungsfall zur quartiersspezifischen Suche nach einem geeigneten Kompromiss. Zudem wurde angemerkt, dass die zunächst verwendete Einteilung der Y-Achse in hoch bis niedrig anspruchsvoller zu interpretieren sei, als eine Einteilung in gut bis schlecht. Durch die Umsetzung dieser Anregung entfällt etwa beim als sommerlichen Hitzestress zu verstehenden thermischen Außenraumkomfort die Fehlerquelle niedrigere Werte mit einem schlechteren Abschneiden in Verbindung zu bringen. Daneben wurden qualitative Erläuterungen zu den Clustern als nützliche Erweiterung genannt. Diese sind in den finalen Steckbriefen integriert.

Zur Darstellung der zu den Clustern zugehörigen Planungsvariablen wurden in Abbildung 4.28 (sh. Seite 85) bereits Boxplots eingeführt. Im ersten Entwurf des Steckbriefs standen an dieser Stelle noch Punkteverteilungen (sogenannte Jitterplots). Allerdings wurden von allen Interviewten die Boxplots als bessere Visualisierungsart eingestuft, sofern eine Legende zur Bedeutung der einzelnen Boxplotbestandteile integriert würde. Die durch Darstellung der Spannweiten zu den einzelnen Planungsparametern gewonnene Flexibilität wurde seitens der Expert:innen als wertvolle Erkenntnis im Planungsprozess gesehen. Die grafische Umsetzung mit qualitativer Skala sei zur Diskussion besser erfassbar, wohingegen zur späteren Umsetzung auch Tabellen hilfreich seien. Diese sollten jedoch nicht Teil des Steckbriefs sein, um diesen nicht zu überfrachten und dadurch potentielle Anwender:innen abzuschrecken.

Zudem fanden sich im ursprünglichen Steckbriefentwurf Scatterplots wie in Abbildung 4.22 (sh. Seite 77). Diese wurden jedoch mehr als interessante Schulungsunterlage für den Einstieg in die Thematik der Wechselwirkungen auf Quartiersebene eingeordnet. Die in den Boxplots enthaltene Information sei zur Kompromissfindung als oberstes Ziel des Steckbriefs ausreichend. Entsprechend wurden in den finalen Steckbriefen nur die Boxplots berücksichtigt.

Die Ermittlung der Sensitivitäten von einzelnen Planungsvariablen erfolgte mittels eines One-at-a-time Verfahrens. Dafür wurde jeweils eine Planungsvariable vom Minimal- bis zum Maximalwert variiert und die Ergebnisse der drei Zielaspekte dargestellt. Abbildung 5.4 zeigt beispielhaft die Entwicklung der THG-Emissionen, der Lebenszykluskosten und des thermischen Außenraumkomforts bei der Variation des Baumanteils sowie des PV Anteils der Ost-West Fassaden. Eine nähere Erläuterung zu den Ergebnissen folgt im Zuge der Anwendungsbeschreibung im folgenden Kapitel.

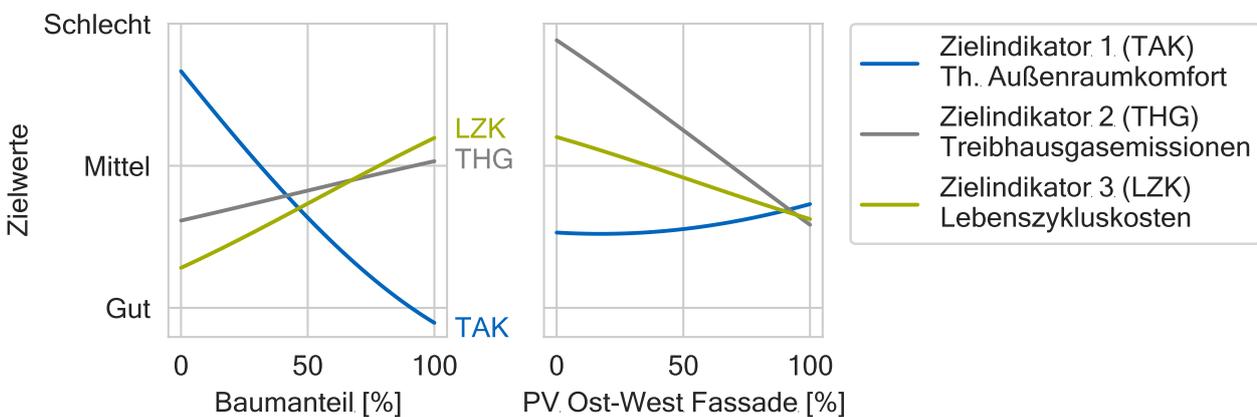


Abbildung 5.4 Sensitivität der drei Zielgrößen gegenüber den Planungsvariablen Baumanteil und PV Anteil der Ost-West Fassaden auf einer normierten Skala.

Die Expert:innen stufen diese Art der Sensitivitätsanalyse für einzelne Parameter als sehr nützlich ein. Sie sollte allerdings vielmehr als Ergänzung in der spezifischen Diskussion von Eingriffen verwendet werden. Der Vorteil liege in der unmittelbaren Sichtbarkeit von Auswirkungen auf die drei Zielaspekte, wenn einzelne Planungsvariablen verändert werden. Dies könne zur weiteren Objektivierung von detaillierten Diskussionen zwischen Fachplanungsstellen beitragen. Die Robustheit der Grafiken wurde dabei als wichtig erachtet, um Fehlinterpretationen vorzubeugen. Solche könnten sich schnell einstellen, da das zugrundeliegende Modell zahlreiche komplexe Vorgänge abbilde und daher eine tiefgreifende

Kenntnis zur korrekten Beschreibung der Zusammenhänge erfordere. Das Einsatzgebiet der Sensitivitätsdarstellung wird demnach nicht primär in der unmittelbaren Wettbewerbsauslobung gesehen. Die Darstellungsform erlaubt aber eine schnelle Prüfung der Auswirkung einzelner Änderungsvorschläge auf die Zielgrößen in der vorangeschrittenen Abstimmungsphase und wird daher für alle Planungsvariablen im Steckbrief integriert.

Zur Abwägung zwischen Planungsvariablen wurden zweidimensionale Histogramme bzw. Kernel Density Estimate (KDE) Plots angeboten. Diese zeigen die Verteilung der Pareto Lösungen zwischen zwei Variablen. Sie sollen insbesondere für den Fall von bereits getroffenen Festlegungen für einzelne Inputs unterstützen, um die weiteren Variablen darauf abzustimmen. In der hier aufgeführten Abbildung 5.5 ist beispielhaft der Baumanteil mit dem Kronendurchmesser und dem PV Anteil der Ost-West Fassaden gegenübergestellt. Dunklere Bereiche repräsentieren darin eine höhere Konzentration von Pareto Lösungen und sollten entsprechend bevorzugt werden. Ist beispielsweise der Baumanteil bereits auf einen bestimmten Bereich fixiert, etwa aufgrund einer Bestandssituation, können die weiteren Variablen danach ausgerichtet werden. Für die Fallstudie würde die Festlegung auf einen Baumanteil von 25% etwa zu dem Schluss führen, dass Kronendurchmesser zwischen drei und sechs Metern sowie PV Anteile auf Ost-West Fassaden von über 80% anzustreben sind. Von den Interviewpartner:innen wurde die deutlich höhere Komplexität dieser Abbildungen als kritisch eingestuft. Dadurch wären diese kaum mehr im regulären Planungsprozess anwendbar. Der Nutzen sei durchaus gegeben, aber ohne intensivere Auseinandersetzung nur schwer erfassbar. Dies mache die Auswertung für Workshops, in denen die Nutzung der Diagramme näher erläutert werden kann, einsetzbar. Das Anwendungsgebiet wird besonders in der Wettbewerbsauslobung gesehen, um bei gegebenen Prioritäten und fixierten Planungsvariablen die anderen Parameter nach diesen Rahmenbedingungen auszurichten. Aufgrund der eingangs geforderten Kompaktheit der Steckbriefe werden die Verteilungsplots nicht in deren finale Version integriert.

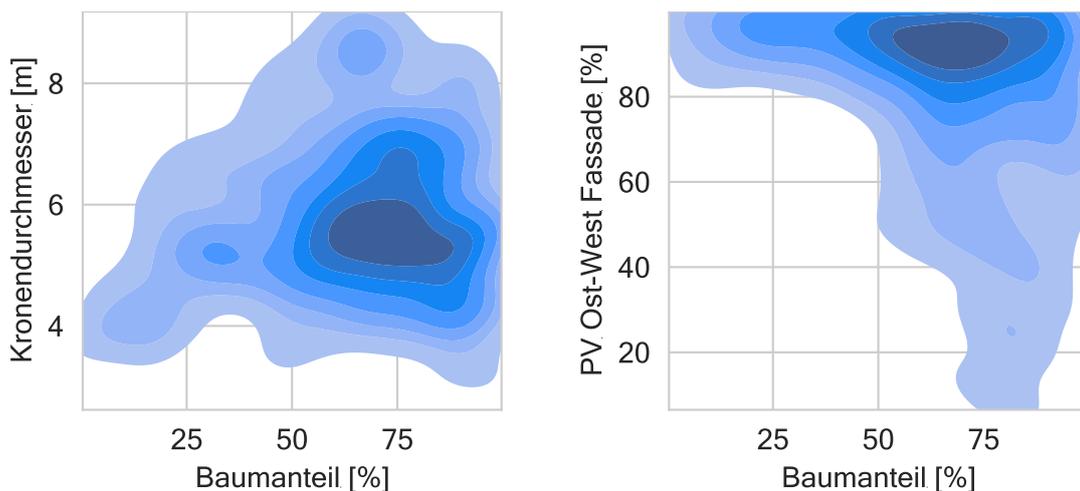


Abbildung 5.5 Beispielhafter Dichteplot der Verteilung Pareto-optimaler Lösungen zwischen den Variablen Baumanteil, Kronendurchmesser und PV Anteil der Ost-West Fassaden.

5.1.5 Nutzungsform des Steckbriefs und Entwicklungspotentiale

Im Zuge der Interviews sollten neben Anregungen zur Überarbeitung des Steckbriefentwurfs auch weitere potentielle Nutzungsformen ermittelt werden. Seitens der Expert:innen wurde angeführt, dass in der praktischen Quartiersplanung bislang nur wenige Unterstützungsmöglichkeiten für die multikriterielle Gegenüberstellung von Zielaspekten bestehen. Vielmehr würden oft intuitive Abwägungen aus einem kreativen Prozess heraus durchgeführt. Einfache Hilfsmittel wie Steckbriefe oder Tabellenwerke wurden unter diesem Gesichtspunkt als hilfreich empfunden. Dabei existieren bereits Leitfäden, Checklisten und Broschüren für frühe Planungsphasen, die verschiedene Aspekte der Stadtplanung abdecken. Beispiele für die Integration von Grünflächen oder ausgewogener Nachverdichtung finden sich in den Ergebnissen der Forschungsprojekte *Grüne Stadt der Zukunft* [99] bzw. *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* [168]. Allerdings existieren nur wenige Hilfestellungen, die sich explizit mit der quantitativen Abwägung von Zielkonflikten in der Quartiersplanung beschäftigen. Dieser Mangel könne laut Interviewpartner:innen oft durch die fachliche Spezialisierung der Referate einer Stadtverwaltung ausgeglichen werden. Dadurch stehe wertvolles Expert:innenwissen zur Verfügung, das mehrere Fachbereiche umspannt. Dies sei jedoch im Fall kleinerer Kommunen aufgrund der dortigen Aufgabenbündelung als deutlich schwieriger einzuschätzen. Hier könnten die entwickelten Steckbriefe einen nützlichen Ausgangspunkt zur Ersteinschätzung der vorliegenden Zielkonflikte bereitstellen.

Obwohl zunehmend Hilfsmittel für spezifische Anwendungsfälle entwickelt werden, fehlen weiterhin in vielen Bereichen handhabbare Methoden und Werkzeuge, mit denen der städtebauliche Entwurf in frühen Phase bewertbar und steuerbar wird. Dabei wurden bestehende Tools häufig als zu wenig praxisorientiert eingeschätzt. Oft sei spezielle Software im Einsatz, die Expert:innen erst in für andere Fachbereiche nachvollziehbare Aussagen übersetzen müssten. Dieses Hintergrundwissen sei für die Entscheidungsfindung allerdings oft nicht entscheidend, weshalb von den Interviewten durchaus Möglichkeiten zur vereinfachten Kommunikation der zugrundeliegenden Komplexität gesehen werden.

Druckdateien (Portable Document Format, .pdf) wurden dabei als geeignetes Format genannt, da sie für jede:n zugänglich sind. Zudem sei die Möglichkeit zum Ausdruck insbesondere in kleinen Diskussionsrunden nützlich. Im Gegensatz dazu wurde der Anwendungsfall von Softwarelösungen in der Vorprüfung gesehen. Generell sollten derartige Tools ohne Installation auskommen und selbsterklärend sein, da Nutzer:innen sonst schnell das Interesse verlieren würden. Eine frei zugängliche Website wäre hierfür geeignet. Dabei wird vor allem die Möglichkeit zur interaktiven Handhabung als wertvoll erachtet. Insbesondere die Untersuchung der Sensitivitäten einzelner Zielaspekte in Bezug auf die Planungsvariablen wurde als Digitalisierungspotential genannt. In den Gesprächen stand dabei vorwiegend die Nutzung zum Einstieg in Workshops im Fokus.

Neben der Nutzungsform wurden in den Interviews potentielle Erweiterungen der Betrachtungsaspekte abgefragt. Dabei kristallisierten sich unter anderem ein stärkerer Einsatz von Fassadengrün und die Berücksichtigung blauer Infrastruktur heraus. In diesem Zusammenhang wurde auch das Starkregnenmanagement und die damit verbundene Kühleistung durch Verdunstung als relevant angesehen. Dies wird im Ausblick dieser Dissertation erneut aufgegriffen (sh. Kapitel 7.3).

5.2 Verwendung des Quartiersteckbriefs

Auf Basis des ersten Steckbriefentwurfs sowie der Erkenntnisse aus den Expert:inneninterviews wurden mehrere Überarbeitungen der Visualisierungen und Erläuterungen vorgenommen. Darüber hinaus wurden insgesamt drei Quartierstypologien untersucht und für diese jeweils ein Steckbrief erstellt. Die Skalierbarkeit dieser Quartierstypologien innerhalb der Landeshauptstadt München wird in Kapitel 5.3 dargelegt. Die drei entwickelten Steckbriefe sind Anhang D zu entnehmen (sh. Seite 158). Dabei ist zu beachten, dass alle drei Steckbriefe für Bestandeingriffe konzipiert wurden und daher nicht uneingeschränkt für den Neubau einsetzbar sind. Die Anwendung wird im Folgenden anhand eines Beispiels für den Zeilenbau beschrieben.

Auf der ersten Steckbriefseite befindet sich eine allgemeine Übersicht zu den Randbedingungen, den Zielaspekten und den betrachteten Planungsvariablen. Zunächst muss festgestellt werden, ob der vorliegende Planungsfall mit der Typologie vergleichbar ist. Wenn dies bestätigt werden kann, folgt ein Überblick über den bestmöglichen Handlungsspielraum. Dieser Spielraum wird in einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht. Zusätzlich sind die Minima, Maxima und Mittelwerte je Zielaspekt aufgeführt. Diese können bereits zur quantitativen Einordnung von Entwürfen oder zur Ableitung von mindestens zu erreichenden Ergebnissen herangezogen werden. Beispielsweise würde sich ein Entwurf mit einem Ökobilanzergebnis von mehr als $6,1 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\cdot\text{a}$ nicht mehr in die Reihe der bestmöglichen Trade-offs einreihen und könnte dementsprechend im Vorfeld ausgeschlossen oder optimiert werden.

Die folgende Steckbriefseite zeigt die möglichen Schwerpunktsetzungen für die drei Zielaspekte. An dieser Stelle sollte ein Cluster gewählt werden, welches bestmöglich zu den Anforderungen des betrachteten Quartiers passt. Ist beispielsweise bekannt, dass das Quartier schlecht durchlüftet ist, kann hier ein Cluster mit dem Fokus auf thermischen Außenraumkomfort gewählt werden. Beispiele im Fall des Zeilenbaus sind die Clusternummern eins, drei, sechs oder sieben. Je nach Priorisierung der beiden weiteren Zielaspekte THG-Emissionen und Lebenszykluskosten kann die finale Auswahl erfolgen. Für ein eher ausgewogenes Szenario zwischen THG-Emissionen und Lebenszykluskosten kommt etwa Cluster sechs in Frage. Um anschließend konkretere Rahmenbedingungen zur Umsetzung von Cluster sechs zu erhalten, finden sich auf den Folgeseiten die Planungsvariablen der einzelnen Cluster. Diese geben sowohl Aufschluss über den relativen Wert der Variablen, als auch über deren Streuung und demnach, wie eng die Grenzen in den Planungsvorgaben gesetzt werden sollten. Für Cluster sechs sollte beispielsweise ein hoher Baumanteil mit mittleren bis hohen Kronendurchmessern in der Wettbewerbsauslobung aufgenommen werden. Zudem fördern mittlere bis hohe PV Anteile auf den Ost-West Fassaden die Umsetzung des Pareto-optimalen Trade-offs im gewählten Bereich.

Als letzte Grafik ist die Darstellung der Sensitivitäten über alle Planungsparameter hinweg enthalten. Ein Auszug daraus ist in Abbildung 5.4 wiedergegeben. Dadurch lassen sich die Auswirkungen von Variationen einzelner Planungsvariablen auf die drei Zielaspekte schnell erkennen und diskutieren. Für das in Abbildung 5.4 gezeigte Beispiel würde eine Erhöhung des Baumanteils zu einer deutlichen Verbesserung des thermischen Außenraumkomforts führen. Dagegen ist eine Steigerung der Lebenszykluskosten und der THG-Emissionen zu erwarten, da die Heizwärmebedarfe im Winter durch Schattenwürfe ansteigen und positiv wirkende PV Flächen verschattet werden. Die zweite Grafik in Ab-

Abbildung 5.4 zeigt die Abhängigkeit der Zielaspekte vom PV Anteil der Ost-West Fassaden. Durch die Erhöhung dieser Designvariable ist eine deutliche Verbesserung der THG-Emissionen zu erkennen. Auch die Lebenszykluskosten werden positiv beeinflusst. Der thermische Außenraumkomfort bleibt bei einer Erhöhung des PV Anteils der Ost-West Fassaden weitestgehend unverändert, lediglich sehr hohe Anteile führen zu einem leichten Anstieg. Dies kann unter anderem auf veränderte Albedowerte der Fassaden zurückgeführt werden, wodurch eine stärkere Aufheizung des Außenraums stattfindet [57].

Wie von den interviewten Expert:innen angemerkt, wurden die qualitativen Quartiersteckbriefe von den quantitativen Ergebnissen getrennt. Bei fortgeschrittenen Verfahren können die entsprechenden Ergebnistabellen dem Anhang E auf Seite 177 entnommen und dem jeweiligen Steckbrief angeheftet werden.



Abbildung 5.6 Überblick zum Quartiersteckbrief für den Zeilenbau. Das hochauflösende Dokument ist Anhang D auf Seite 158 zu entnehmen.

5.3 Auswahl der Quartierstypologien

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Quartiersteckbriefe im Rahmen dieser Dissertation für häufig vorkommende Quartierstypologien in München entwickelt. Im allgemeinen werden zur Einordnung bestehender Gebäudestrukturen meist die Parameter Gebäudetypologie, Baujahr sowie Gebäudegröße herangezogen [147]. Die hierfür verwendeten Daten beruhen auf den im Rahmen des Graduiertenkollegs *Urbane grüne Infrastruktur* erarbeiteten Stadtstruktur Typologien [238], welche wiederum auf bereits vorhandenen Stadtstrukturtypen der Landeshauptstadt München aufbauen. Die Daten der einzelnen Gebäude wurden von der Landeshauptstadt München in Form der Gebäudedatei mit Stand 31.12.2014 zur Verfügung gestellt. Zur Auswahl wurde die Anzahl der pro Baualtersklasse in den jeweiligen Typologien klassifizierten Bebauungsblöcke herangezogen.

Die resultierenden Verteilungen sind in Abbildung B.3 im Anhang wiedergegeben (sh. Seite 155). Zudem wurden die Grünanteile dieser Typologien im Rahmen des Graduiertenkollegs *Urbane grüne Infrastruktur* basierend auf Merkens et al. ermittelt [239]. Auf Basis der beschriebenen Auswertungen wurden die in Tabelle 5.1 charakterisierten Typologien mit hohem Verbesserungspotential bzw. guter Übertragbarkeit identifiziert. Deren geografische Verteilung über das Stadtgebiet München und somit die Skalierbarkeit zeigt Abbildung B.4 im Anhang (sh. Seite 156).

Zur Anwendung der *Urban Systems Exploration* wird jeweils eine der Charakterisierung entsprechende Fallstudie ausgewählt. Die Fallstudiengebiete befinden sich im Stadtgebiet Münchens und sind in Abbildung 5.7 zu sehen. Konkrete Rahmenbedingungen finden sich in den jeweiligen Steckbriefen.

Tabelle 5.1 Zur Erstellung der Quartiersteckbriefe ausgewählte Quartierstypologien (BAK = Baualtersklasse).

Typologie	BAK	Baujahre	Grund der Auswahl
Zeilenbebauung	2	1930 - 1940	Niedriger Grünanteil und geringer Dämmstandard
Einzel-/Doppelhäuser	5	1969 - 1978	Höchster Anteil in dieser Typologie
Blockbebauung	3	1949 - 1957	Höchster Anteil in dieser Typologie



Abbildung 5.7 Luftaufnahmen der drei ausgewählten Fallstudiengebiete (von links: Zeilenbebauung, Einzel-/Doppelhäuser, Blockbebauung). Quelle: Google Maps [240].

5.4 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus dem Kapitel Übertragung in die Praxis:

- Der Trade-off zwischen den THG-Emissionen im Lebenszyklus, den Lebenszykluskosten und dem thermischen Außenraumkomfort ist in der Praxis gegenwärtig, wenngleich er häufig nur für zwei der drei Aspekte betrachtet wird.
- In Expert:inneninterviews konnte die entwickelte Form des Steckbriefs als besonders geeignet für den Abstimmungsprozess (mit qualitativen Werten) sowie den Umsetzungsprozess (mit quantitativen Werten) identifiziert werden.
- Die Übersicht über den optimalen Handlungsspielraum und die zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten wurden als hilfreich bewertet, um eine breite und sachliche Diskussion zu unterstützen. Sensitivitäten der Planungsparameter helfen darüber hinaus beim Verständnis der Abhängigkeiten.
- Das Erkennen eines optimalen, disziplinspezifischen Kompromissrahmens wurde als wesentlicher Vorteil gegenüber dem konventionellen Planungsprozess gesehen. Dadurch ist eine Stärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit im Zuge von Quartiersentwicklungen möglich.
- Zur Steigerung der praktischen Nutzbarkeit sollten komplexe Visualisierungen vermieden und die Quartiersteckbriefe möglichst kompakt gehalten werden.
- Die Interviewpartner:innen bewerteten Druckdateien als leicht zugänglich und hilfreich in kleinen Diskussionsrunden. Einfach zu handhabende und frei zugängliche Tools für die multikriterielle Abwägung im Planungsprozess wurden als mögliche Weiterentwicklung genannt.
- Die auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit und den durchgeführten Expert:inneninterviews entwickelten Quartiersteckbriefe wurden für drei häufig vorkommende Quartierstypologien in München erstellt und können in der Praxis verwendet werden. Sie sind Anhang D zu entnehmen (sh. Seite 158).

6 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden wird die Bedeutung der in den Kapiteln 4 und 5 dargelegten Ergebnisse für das Forschungsziel dieser Arbeit diskutiert (sh. Kapitel 6.1 bis 6.3). Weiterhin werden die Einschränkungen und die Skalierbarkeit der erarbeiteten Methode zur Synergiebewertung sowie zur multikriteriell optimierten Quartiersentwicklung im Kapitel 6.4 erläutert. Schließlich erfolgt die Beantwortung der Forschungsfragen (sh. Kapitel 1.2, Seite 3) im Kapitel 6.5.

6.1 Nutzbarkeit synergetischer Effekte im Bauwesen

Unikriterielle Synergie auf Gebäude- und Quartiersebene

Die Untersuchungen auf Gebäude- und Quartiersebene zeigen, dass die strikte Auslegung von „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ bzw. „ $1 + 1 > 2$ “ anhand der in Kapitel 2.2.3 erarbeiteten Definitionen (sh. Seite 22) für den Heizwärmebedarf und die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen nur eine untergeordnete Rolle in der Praxis spielt. In den dargelegten Fallstudien betragen die absoluten synergetischen Einsparungen maximal $0,56 \text{ kgCO}_2\text{-Äq./m}^2\cdot\text{a}$. Dies stützt die Aussagen von Bull et al., welche bei einer ähnlichen Definition und Untersuchung von Synergiepotentialen ebenfalls kaum entsprechende Maßnahmenkombinationen in der Gebäudesanierung identifizieren konnten [41]. Die Autor:innen der Studie arbeiten im Vergleich zur Gebäudefallstudie in dieser Dissertation mit einem detaillierteren Sanierungsansatz, bei dem Einzelflächen wie Wände und Dächer unabhängig voneinander verbessert werden. Dies führt in ihrer Fallstudie zu einer Verringerung der Wärmeverluste des Gebäudes und somit zur Erhöhung der mittleren Innenraumtemperatur. Bull et al. argumentieren, dass dabei eine größere mittlere Temperaturdifferenz in der Gebäudehülle entsteht, was den Wärmetransport durch nicht sanierte Bauteile erhöht. Die Dämmung eines weiteren Elements der Gebäudehülle kann dann dazu beitragen, den erhöhten Wärmeverlust zu mildern und einen unikriteriellen Synergieeffekt zu erzielen. Chidiac et al. kommen ebenfalls zum Schluss, dass die lineare Aufsummierung von Energieeinsparungen durch einzelne Sanierungsmaßnahmen in den meisten Fällen besser abschneidet als deren Kombination [40]. Sie gehen dabei unter anderem auf das Alter und somit den energetischen Zustand der Gebäude ein und zeigen ein höheres Synergiepotential für nach 1975 gebaute Häuser im kanadischen Kontext. Der Anstieg unikriterieller Synergie mit zunehmenden Baualter wurde auch in den Ergebnissen dieser Dissertation auf Gebäudeebene festgestellt (sh. Abbildung 4.5, Seite 47). Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei jüngeren Baualtern höhere Energiestandards vorliegen. Dadurch vermindert sich die maximal erzielbare Einsparung durch Einzelmaßnahmen und interaktive Effekte kommen stärker zum Tragen. Dennoch erreichen sie auch bei Gebäuden aus den 2000er Jahren nur einen geringen absoluten Einfluss. Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen dieser Dissertation, dass der interaktive Effekt von Maßnahmen an Bestandsgebäuden und Bestandsquartieren auch bei einem größeren Betrachtungsmaßstab selten die lineare Aufsummierung ihrer Einzelsparungen im Hinblick auf den Heizwärmebedarf und die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen übersteigt. In Zukunft könnte dieser Effekt jedoch an Relevanz gewinnen, wenn höhere Dämmstandards im Bestand vorliegen und Eingriffe aufgrund von Sanierungszyklen, Nachverdichtungsmaßnahmen oder Umnutzungen stattfinden.

Neben dem Heizwärmebedarf und den THG-Emissionen im Lebenszyklus wurden der potentielle Kühlenergiebedarf sowie der thematisch vergleichbare thermische Innenraumkomfort von Gebäuden bzw. Quartieren in Hinblick auf unikriterielles Synergiepotential untersucht. Dabei traten maximale Verbesserungen aus den Wechselwirkung zwischen den jeweils einbezogenen Maßnahmen in Höhe von 16,7% bzw. 14,6% auf. Im Fall von Einzelgebäuden resultiert dieser Positiveffekt häufig aus der Verschlechterung des thermischen Innenraumkomforts durch einzelne Maßnahmen. McLeod et al. zeigen in ihrer Untersuchung des Passivhausstandards, dass in Nordeuropa mit einer Beeinträchtigung des thermischen Innenraumkomforts durch hohe Dämmstandards zu rechnen ist [183]. Dabei stellen die Autor:innen unter anderem fest, dass der Fensterflächenanteil und zugehörige Verschattungsmaßnahmen sowie die Luftdichtheit von Gebäuden geeignete Designvariablen darstellen, um die negative Beeinträchtigung durch hohe Dämmstandards zu begrenzen. Die vorliegende Dissertation legt einen ähnlichen Schluss nahe, da für die unikriterielle Synergie des potentiellen Kühlenergiebedarfs gute Ergebnisse bei der Anwendung von außenliegender Verschattung und angepasster Luftdichtheit festgestellt werden. Auf Quartiersebene ist die synergetische Verbesserung des thermischen Innenraumkomforts sowohl auf die zuvor beschriebenen Synergien auf Gebäudeebene, als auch auf die Überlagerung von Verschattungsleistungen im Quartier zurückzuführen. Xu et al. zeigen durch die getrennte Untersuchung des Kühlenergiebedarfs mehrerer Einzelgebäude in einem zusammenhängenden Quartier, dass sich die Wirkung von Verschattungsmaßnahmen bei einer Analyse der Gesamtsituation über die Summe der Einsparung bei Einzelgebäuden hinaus verbessert [125]. Die Autor:innen stellen eine Reduktion des Kühlenergiebedarfs im Quartier um 8,2% fest, wohingegen die individuelle Betrachtung von Gebäuden und die Aufsummierung der Einsparungen nur eine Einsparung von 6,2% bewirkt. Dies führen sie auf Wechselwirkungen zwischen den Gebäuden des Quartiers zurück, welche auch in der vorliegenden Dissertation als entscheidend für die Erzielung von Synergieeffekten identifiziert wurden.

Multikriterielle Synergie auf Gebäude- und Quartiersebene

Bei der Betrachtung von Verbesserungen über mehrere Zielaspekte hinweg (multikriterielle Synergie) zeigt sich, dass sowohl auf Gebäude-, als auch auf Quartiersebene Kombinationen identifiziert werden können, die zu einer gleichzeitigen Reduktion der THG-Emissionen und der Lebenszykluskosten sowie zu einer Verbesserung des thermischen Außenraumkomforts führen. Insbesondere die Stellschrauben des energetischen Sanierungszustands, der Primärenergiequelle, die PV-Flächen und die Baumanzahl spielen eine wichtige Rolle, um parallele Verbesserungen in allen drei Aspekten zu erzielen. Diese Variablen sollten demnach möglichst frühzeitig in der Planung Berücksichtigung finden, da Co-Benefits geringer ausfallen, je später Maßnahmen zu Klimaschutz und Klimaanpassung implementiert werden [16]. Mehrere Arbeiten belegen den starken Zusammenhang von unter anderem den Kosten, dem thermischen Innenraumkomfort und den Energiebedarfen mit der Sanierungsintensität und dem Primärenergieträger von Gebäuden [33, 241]. Aber auch der urbane Kontext, welcher wesentlich für den thermischen Außenraumkomfort ist, wirkt sich auf die Energiebedarfe und somit das multikriterielle Abschneiden aus [11, 53]. Berry et al. heben in Ihrer Studie zur sektorenübergreifenden Wechselwirkung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen zudem grüne Infrastruktur als wichtigen Hebel für derartige Synergieeffekte hervor [122]. Daniel et al. zeigen, dass Grün sowohl auf der Gebäudeebene (z. B. Dachbegrünungen, Fassadenbegrünungen), als auch auf der Quartiersebene (z. B. Straßenbäume) die Interaktion zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung verstärken kann [11]. Die in dieser Dissertation identifizierten Maßnahmen mit hohen multikriteriellen Synergieeff-

fekten können demnach herangezogen werden, um in frühen Entwurfsphasen positive Veränderungen in mehreren Zieldimensionen herbeizuführen.

Die vorliegende Dissertation konnte weiterhin zeigen, dass es sich bei den in allen Aspekten positiv abschneidenden Lösungen nicht zwangsläufig um Pareto-optimale Szenarien handelt. Dementsprechend ist eine zu frühe Festlegung auf eine Planungsvariante, die zwar eine Verbesserung in vielerlei Hinsicht verspricht, aber unter Umständen bessere Lösungen in allen Zieldimensionen erlaubt, zu vermeiden. Im Rahmen der Fallstudien dieser Dissertation wurde die multikriterielle Synergie durch einen Vergleich mit der Ausgangssituation des Gebäudes bzw. des Quartiers berechnet. Dadurch entstehen zahlreiche Konstellationen, die eine Verbesserung in den drei behandelten Zielaspekten bewirken. Jedoch führen selbst geringfügige Verbesserungen bei unterdurchschnittlichen Beständen bereits zur positiven Bewertung einzelner Szenarien. Es ist daher neben dem Vergleich mit der Bestandssituation auch eine Gegenüberstellung mit gesetzlichen Vorgaben oder projektspezifischen Mindestwerten zielführend. Dadurch lassen sich zu geringe Verbesserungen im Vorfeld ausschließen und die Einhaltung eines Mindeststandards hinsichtlich der betrachteten Nachhaltigkeitsaspekte sicherstellen.

6.2 Steuerung von Trade-offs durch die multikriteriell optimierte Quartiersentwicklung

Der vorgestellte Prozess der *Urban Systems Exploration* dient als methodischer Rahmen zur Erstellung von gekoppelten urbanen Simulationsmodellen und der Überführung daraus hervorgehender Trade-offs in die Entscheidungsunterstützung. Die entwickelte Werkzeugkette trägt dabei zur umfänglichen Untersuchung von Zielkonflikten zwischen Nachhaltigkeitsaspekten in Quartiersprojekten bei, indem sie einen detaillierten Einblick in den optimalen Handlungsspielraum ermöglicht. Dies geschieht durch die Analyse der im Optimierungsprozess identifizierten Pareto Punkte. Dabei lassen sich in ihren Charakteristika stark abweichende Cluster entlang der PF bilden, was die Vielfalt des optimalen Handlungsspielraums im Rahmen des Trade-offs zwischen den THG-Emissionen, den Lebenszykluskosten und dem thermischen Außenraumkomfort unterstreicht. Die Identifikation und die Analyse dieser Cluster eröffnet die Möglichkeit, quartiersspezifische Entscheidungen zu treffen und bereits in frühen Planungsphasen individuelle Lösungen zu entwickeln. Dadurch unterstützt die entwickelte Methodik eine Anpassung an kontextuelle Gegebenheiten bei der nachhaltigen Transformation des Gebäudesektors.

Im Anschluss an die Auswahl des präferierten Trade-off Clusters setzt die Methodik auf Ersatzmodelle. Diese Modelle identifizieren Planungsvariablen, die eine gezielte Lenkung des Quartiersentwurfs in die Richtung einer bestimmten Trade-off Abwägung der Zielkonflikte ermöglichen. Ähnliche Ansätze wurden in Forschungsarbeiten zur Optimierung von Gebäudeenergiebedarfen erfolgreich angewendet. Dabei wurde die im Rahmen dieser Dissertation erarbeitete Erweiterung auf den Gebäudelebenszyklus als Ausblick genannt [242]. Die Integration von Sensitivitätsanalysen, insbesondere der Sobol-Sensitivitätsanalyse, stellt einen weiteren Baustein der Methodik dar. Die Analyse ermöglicht es, den Einfluss der Eingangsunsicherheit auf die Ausgangsunsicherheit in nichtlinearen Systemen wie dem Bausektor zu quantifizieren [243, 244]. Dieses Wissen ist von entscheidender Bedeutung, um die Robustheit und Zuverlässigkeit der entwickelten Simulationsmodelle und Optimierungsstrategien zu bewerten. Bei der Verwendung von GPR Ersatzmodellen kommt die Möglichkeit zur Bewertung von

Modellunsicherheiten in spezifischen Bereichen der PF hinzu. Diese Information lässt sich in der Entscheidungsunterstützung zur Abwägung zwischen vergleichbaren Clustern einsetzen.

Die beispielhafte Werkzeugkette ermöglicht eine effiziente und effektive Bestimmung der PF im Zusammenhang mit rechenintensiven Simulationsmodellen. Dies trägt dazu bei, dass mit wenigen Simulationen fundierte Entscheidungen über die vorherrschenden Zielkonflikte und ihre Steuerungsmöglichkeiten getroffen werden können. Die Verbindung von GPR Ersatzmodellen mit dem Konzept der Pareto Reflexion benötigt dabei weniger Modellevaluierungen als evolutionäre Algorithmen wie NSGA-II, um eine umfassende Darstellung der PF urbaner Simulationsmodelle zu ermitteln [134]. Das Ergebnis steht im Einklang mit Studien, die den *Paref* Algorithmus auf mathematische Probleme angewandt haben [216]. Diese Dissertation belegt die Relevanz und Anwendbarkeit von *Paref* im mehrdimensionalen Stadtplanungskontext.

Die Validierung der Ersatzmodelle zeigt, dass die Anzahl der erforderlichen Trainingspunkte für eine gute Vorhersagequalität je nach Zielwert variiert. Das LCA Ersatzmodell schneidet bereits mit weniger als 30 Trainingspunkten gut ab. Im Gegensatz dazu weisen die Modelle für den thermischen Außenraumkomfort sowie die Lebenszykluskosten höhere Unsicherheiten auf und eine Konvergenz stellt sich erst ab mindestens 50 Trainingspunkten ein. Laloy und Jacques argumentieren in Ihrem Vergleich von Methoden zur Ersatzmodellbildung, dass GPR bei kleinen Trainingsdatensätzen eine robuste Methode darstellt, um vorhandene Datensätze abzubilden und Sensitivitäten zu untersuchen [245]. Zudem trägt GPR zu einer Glättung lokaler Optima bei [96], was in Kombination mit der multikriteriellen Optimierung von Vorteil ist. Die Eignung der GPR zur Erstellung von Ersatzmodellen und zur Optimierung von urbanen Simulationsmodellen wurde in dieser Dissertation dargelegt. Dabei ist auf eine ausreichende Anzahl von Trainingspunkten und auf das individuelle Verhalten der einzelnen Zieldimensionen zu achten, um eine hohe Modellgüte zu gewährleisten.

Zusammenfassend trägt dieser Teil der Arbeit zum Stand der Forschung bei, indem er einen generischen Prozess zum Aufbau und zur multikriteriellen Optimierung urbaner Simulationsmodelle sowie deren anschließender Überführung in die Entscheidungsunterstützung bietet. Der Überblick über den optimalen Handlungsspielraum und die Möglichkeit, gezielt auf unterschiedliche Gegebenheiten im Quartier einzugehen sowie den Einfluss von Unsicherheiten zu berücksichtigen, unterstützt Stadtplaner:innen bei Wettbewerbsauslobungen, Bauleitplanungsverfahren und damit verbundenen Entscheidungsprozessen. Die Übertragung der Ergebnisse in die Planungspraxis wird im folgenden Kapitel näher diskutiert.

6.3 Übertragung multikriterieller Trade-offs in die Planungspraxis

Die frühzeitige Kenntnis der Gestaltungsoptionen und ihres Einflusses auf hervorgehende Trade-offs kann das Verständnis von Planer:innen und Entscheider:innen für die Aufgabenstellung verbessern und die Grundlage für gut abgestimmte Entwürfe in späteren Planungsphasen schaffen [93]. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, wie der Handlungsspielraum für die Abwägung von THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort bereits in frühen Entwurfsphasen ermittelt und an Stakeholder:innen kommuniziert werden kann. Für zahlreiche Nachhaltigkeitsaspekte gilt dabei das Gebot des Frontloadings. Beispielsweise ist oft nur in sehr frühen Projektphasen ein signifikanter Einfluss auf die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen von Quartieren bei gleichzeitig überschaubaren Kosten für planerische Eingriffe möglich [246, 247]. Durch die Anwendung des in dieser Dissertation entwickelten Prozesses zur *Urban Systems Exploration* erhalten Planer:innen ein frühes Verständnis der notwendigen Randbedingungen für die Gestaltung oder Umgestaltung von Quartieren, für die es derzeit an praktikabler Unterstützung zum Umgang mit Zielkonflikten und Trade-offs mangelt [16, 98].

Die im Zuge dieser Dissertation erarbeiteten Quartiersteckbriefe können zudem die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Planungsbeteiligten verbessern. Durch die frühe Erkenntnis, dass mehr als eine optimale Lösung umsetzbar ist, können Kompromisse einfacher diskutiert und akzeptiert werden. Die interviewten Expert:innen erwarten dadurch eine Verbesserung in der Zusammenarbeit mit verschiedenen Disziplinen. Diese Intensivierung der Kooperation wird in vielen Forschungsarbeiten gefordert. Fan und Fang argumentieren etwa, dass die übermäßige Dominanz eines Planungsbereichs die Funktion anderer Bereiche beeinträchtigen kann und sich dadurch nachteilig auf das gesamte System auswirkt [115]. Fusco Nerini et al. fordern beispielsweise eine Verstärkung der fachübergreifenden Zusammenarbeit im Energiesektor, wofür sie die Wissenschaft als wesentlich zur Bereitstellung von Rahmenbedingungen und Daten sehen [117]. Diese Dissertation leistet hierfür einen wichtigen Beitrag, indem sie Methoden und Werkzeuge zur interdisziplinären Diskussion bereitstellt.

Hinsichtlich der Darstellung von Trade-offs konnte gezeigt werden, dass Visualisierungen nur ein begrenztes Maß an Komplexität aufweisen sollten. Die Veranschaulichung von Trade-offs im dreidimensionalen Raum bietet zwar einen guten Überblick zu möglichen Handlungsspielräumen und operative Unterstützung für die Quartiersplanung in frühen Phasen, sollte sich aber auf zweidimensionale Darstellungen beschränken. Zudem werden von den interviewten Expert:innen möglichst knapp gehaltene Planungshilfen gefordert, um deren schnelle Nutzbarkeit zu gewährleisten. Dabei können die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Entscheidungshilfen als gute Ergänzung zu bestehenden Ansätzen in der Stadtplanung verstanden werden, etwa dem Einsatz parametrischer Modelle zur Entscheidungsunterstützung [248]. Während die hier entwickelten Steckbriefe sehr generisch gehalten und auch ohne den Aufbau von Simulationsmodellen frühzeitig einsetzbar sind, können parametrische Untersuchungen bei Vorliegen eines konkreten Planungsfalls detaillierter unterstützen und die Informationen der Steckbriefe vertiefen. Beide Methoden haben ihre Daseinsberechtigung und sind für verschiedene Planungsstadien unterschiedlich gut geeignet.

6.4 Einschränkungen und Skalierbarkeit

Neben den bewerteten KPIs müssen bei der Entscheidungsfindung auch verschiedene qualitative Aspekte der gebauten Umwelt berücksichtigt werden. Dazu zählen beispielsweise die individuelle Wahrnehmung von Sicherheit, die Teilhabemöglichkeiten oder die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Diese Aspekte sind nur zum Teil quantifizierbar [63]. Das Simulationsmodell in dieser Dissertation beschränkt sich daher in vielerlei Hinsicht auf wesentliche Teile der Außenraum- und Gebäude- bzw. Quartiersimulation. Eine umfassende Abbildung der Realität ist dabei kaum möglich. Dies gilt insbesondere für frühe Projektphasen, in denen nur wenige Informationen über die Baukonstruktion und den Außenbereich vorliegen. Das verwendete Modell stellt dementsprechend einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand dar. Beispielsweise könnte die Genauigkeit der Ergebnisse der Windsimulation durch den Einsatz einer rechenintensiveren CFD Methode verbessert werden. Außerdem sollten die gewählten Parameter über die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Validierungen von Energiebedarf und urbanem Wärmeinseleffekt weiter mit Messdaten abgeglichen werden, um das Simulationsmodell besser an den betrachteten Standort anzupassen. Zudem ist die Komplexität des verwendeten Simulationsmodells hinsichtlich seiner Übertragbarkeit problematisch. Für die Erstellung waren Expert:innenwissen, Vereinfachungen und die Festlegung zahlreicher Randbedingungen erforderlich. Dazu gehören beispielsweise Nutzungsprofile, Materialeigenschaften, PV Wirkungsgrade oder zukünftige Prognosen für LCA Daten (z. B. die Dekarbonisierungsrate des Stromnetzes). Anpassungen sind daher nur durch einen kleinen Expert:innenkreis möglich. Die entwickelten Steckbriefe erlauben jedoch eine vereinfachte Nutzung der resultierenden Erkenntnisse in der Praxis.

Insbesondere die Implementierung von grüner Infrastruktur in urbanen Simulationsmodellen stellt weiterhin eine Herausforderung dar. Dabei verfolgt diese Dissertation einen für die Berücksichtigung von Großbäumen in Energiemodellen etablierten Ansatz. Bis Bäume allerdings die ermittelten Abmessungen und damit großflächige Verschattungsleistungen erreichen, benötigen sie Zeit. Daher sollten die Ergebnisse des thermischen Außenraumkomforts stets aus einer dynamischen Perspektive heraus betrachtet werden. Das bedeutet, Bäumen müssen hinreichende Wachstumsbedingungen zur Verfügung stehen, damit sie die im vorliegenden Simulationsmodell angesetzten Maße erreichen. Zwar wurde der Grad der Versiegelung und damit die Wasserverfügbarkeit im Modell integriert, es bestehen aber zahlreiche weitere Herausforderungen, die das Baumwachstum im städtischen Umfeld vermindern können. Hierzu zählen etwa Schadstoffe im urbanen Raum, Vandalismus, Krankheiten oder die zunehmende Belastung durch Trockenheit [249]. Da Bäume als wesentlicher Hebel für die Steuerung multikriterieller Trade-offs identifiziert wurden, könnte ihre mangelnde Pflege und dadurch gehemmtes Wachstum zu Einbußen beim Aspekt des thermischen Außenraumkomforts und damit dem Verlust der Pareto Eigenschaft der angestrebten Konfiguration führen. Demnach ist die reine Einbringung von Stadtgrün im Planungsprozess nicht ausreichend. Es gilt vielmehr ein Konzept zur permanenten Sicherung von grüner Infrastruktur zu implementieren und auf dessen spätere Umsetzung zu achten.

In dieser Dissertation wurde der Fokus auf jeweils einen Zielaspekt der drei Säulen der Nachhaltigkeit gelegt (ökologisch: THG-Emissionen im Lebenszyklus, ökonomisch: Lebenszykluskosten, sozial: thermischer Außenraumkomfort). Aufgrund der notwendigen Festlegung des Forschungsinteresses zu Beginn des Arbeitsprozesses besteht das Risiko, dass weitere Trade-offs, die sich aus den identifizierten Lösungen ergeben, nicht erkannt werden. Als besonders von Trade-offs betroffene Bereiche im Hinblick

auf Klimaschutz und Klimaanpassung nennt Sharifi dabei die Energieversorgung, die Landnutzung, die Mobilität, die Abfallwirtschaft, den Gebäudesektor sowie die blaue und grüne Infrastruktur [10]. Die in dieser Dissertation eingangs durchgeführte qualitative Ermittlung der vorherrschenden Trade-offs erfordert einen zusätzlichen Arbeitsschritt neben der Modellbildung (sh. Tabelle 4.6, Seite 61). Dabei könnte eine solche Einordnung auch aus dem Simulationsmodell heraus generiert und anschließend über bestehende Literatur plausibilisiert werden. Hierfür müsste vorab eine allgemeinere Auswertung des Modells mit weiteren Zielgrößen erfolgen, um Zusammenhänge zu identifizieren. Wenn bei der Gegenüberstellung von KPIs nur geringe Spannweiten der Pareto-optimalen Lösungen bzw. nur ein einzelner Pareto Punkt resultieren, kann das betrachtete Zielgrößenpaar ggf. von der multikriteriellen Untersuchung ausgeschlossen werden. Liegt der Untersuchungsfokus hingegen auf der Bewertung multikriterieller Synergien, können diese Beziehungen dabei helfen, Synergiepotentiale zu erkennen und in der weiteren Auswertung zu vertiefen. Insbesondere Korrelationen werden dabei häufig zur Unterscheidung zwischen Synergien und Trade-offs herangezogen [250–252]. Allerdings steht eine umfassende anfängliche Auswertung des Simulationsmodells dem Ziel möglichst weniger zeitintensiver Evaluationen entgegen. Die Entwicklung eines Mittelwegs, der die strukturierte Durchführung dieser vorgezogenen Untersuchung anhand des Simulationsmodells ermöglicht und Empfehlungen hinsichtlich der zu betrachtenden Zielgrößen liefert, wäre daher wünschenswert und wird im Ausblick erneut aufgegriffen.

Hinzu kommt, dass grundsätzlich auch Menschen als Teil des Systems der gebauten Umwelt betrachtet werden müssen [14]. Im Rahmen dieser Dissertation wurde menschliches Verhalten anhand von normierten Anwesenheitsmustern abgebildet. Diese stellen nur eine Annäherung an das tatsächliche Nutzer:innenverhalten dar, welches beispielsweise in Energiesimulationen zu einer Ergebnisabweichung von mehr als 40% führen kann [253]. Detailliertere Nutzer:innenmodelle erfordern jedoch oft höhere Rechenkapazitäten und müssen daher mit der Anforderung an die effiziente Bestimmung von Pareto Punkten in frühen Planungsphasen abgewogen werden. Wie eingangs erwähnt, sollten auch weitere Zielgrößen aus der Fokussierung auf das menschliche Wohlbefinden abgeleitet werden, wie etwa die Pollenverbreitung, die nächtliche Hitzebelastung oder der Zugang zu Grünflächen [49].

Neben der Erweiterung des Simulationsmodells um die genannten Bewertungsaspekte und das menschliche Verhalten bestehen Entwicklungspotentiale in der Berücksichtigung von Variationen der Designvariablen in der Entscheidungsunterstützung. Oft wird bei der Anwendung von MOO die Zuverlässigkeit der identifizierten Lösungen bei Abweichungen von Inputs nicht hinreichend untersucht [224]. Dabei können Punkte, die nur knapp von der Pareto Eigenschaft entfernt sind, jedoch eine deutlich höhere Zuverlässigkeit aufweisen, für Planende durchaus relevant sein. Die Behandlung dieser Punkte in der Nähe der PF wird beispielsweise von Calandra et al. thematisiert. Demnach können für Stadtplaner:innen Lösungen von Vorteil sein, die sehr nahe am Optimum liegen, aber robuster gegenüber Schwankungen im städtischen System sind [254]. Diese Lösungen werden im dargelegten Prozess der *Urban Systems Exploration* bei der Bildung von Ersatzmodellen einbezogen. In der finalen Auswertung liegt der Fokus aber ausschließlich auf Pareto Lösungen, da nur diese einen vollständig optimierten Trade-off darstellen. Dadurch bleiben unter Umständen nur geringfügig schlechter, dafür aber zuverlässiger abschneidende Lösungen unberücksichtigt. Die Auswertung der Ersatzmodelle sollte daher kritisch hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Variationen in den Inputs hinterfragt werden. Unter die-

sem Gesichtspunkt ist die zur Ersatzmodellerstellung verwendete GPR in der Lage, die Unsicherheit einzelner Pareto Lösungen auszugeben. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf deren Vorhersagegenauigkeit ziehen und die Notwendigkeit zusätzlicher Untersuchungen im Zuge von Quartiersentwicklungen aufdecken (sh. Abbildung 4.25, Seite 81).

Die durch Expert:inneninterviews gewonnenen Erkenntnisse zur Visualisierung von Trade-offs sollten nicht als uneingeschränkt gültig angesehen werden. Im Kontext dieser Arbeit dienen sie als Anhaltspunkt für die praxisgerechte Aufbereitung der Quartiersteckbriefe. Dabei ist nicht zwangsläufig sichergestellt, dass selbst eine größere Anzahl von Interviews einen generellen Konsens im betreffenden Fachkreis widerspiegelt [236]. Die geführten Gespräche sind vielmehr als eine Indizienquelle für die praktische Eignung der Steckbriefe zu verstehen. Die anhand dieser Steckbriefe diskutierten Darstellungen bieten eine gute Basis für weitergehende Arbeiten, eine Anpassung je nach Anwendungsfall und Nutzer:innengruppe ist aber notwendig.

Bei der Untersuchung von bestehenden baulichen Strukturen ist die Übertragbarkeit oft problematisch [92]. Die Ergebnisse der vorgestellten Fallstudie wurden im deutschen Kontext erarbeitet. Daraus ergeben sich Randbedingungen für Klima- und LCA-Datensätze. Die gewonnenen Erkenntnisse sind daher nicht uneingeschränkt auf andere Länder übertragbar. Daniel et al. zeigen jedoch, dass beispielsweise Ergebnisse für solare Energieerträge durchaus innerhalb der nordeuropäischen Klimazone Cfb (warmgemäßigtes, feuchtes Klima mit warmem Sommer) verallgemeinerbar sind [11]. Die Übertragung innerhalb des Münchner Stadtgebiets kann anhand der bereits zur Auswahl der Fallstudien genutzten Daten erfolgen. Dadurch lassen sich Bebauungsstrukturen identifizieren, die sowohl in ihrer Typologie, als auch im Baujahr ähnliche Eigenschaften aufweisen und daher potentiell geeignet zur Anwendung der hier generierten Ergebnisse sind. Eine Auswertung hierzu ist in Abbildung B.4 im Anhang dargestellt (sh. Seite 156). Die gebietsspezifische Einschätzung zur Übertragbarkeit ist dabei unabdingbar, da sich Gebäudeorientierung, bereits durchgeführte Sanierungsmaßnahmen oder bestehende grüne Infrastruktur von Fall zu Fall unterscheiden.

6.5 Beantwortung der Forschungsfragen

Basierend auf den dargelegten Ergebnissen können die in Kapitel 1.2 eingeführten Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden:

Forschungsfrage 1: Wie können die Begriffe Synergie und Trade-off für die gebaute Umwelt definiert werden?

Antwort: Synergie kann für die gebaute Umwelt in verschiedene Bereiche unterteilt werden. Dabei sind die unikriterielle Verbesserung eines Zielaspekts nach der Grundidee „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“, sowie die parallele Verbesserung mehrerer Zielaspekte unterscheidbar. Als Trade-off sind, dem Prinzip der Pareto Optimalität folgend, bestmögliche Kompromisse zwischen mehreren Zieldimensionen zu verstehen. Dabei ist die Verbesserung eines Aspekts nur durch die Verschlechterung eines anderen Aspekts erreichbar. Davon abzugrenzen sind in der gebauten Umwelt ebenfalls relevante Konflikte, bei denen etwa räumliche Widersprüche auftreten. Für die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Definitionen wird auf Kapitel 2.2.3 verwiesen (sh. Seite 22).

Forschungsfrage 2: Wie kann Synergie zwischen baulichen und grünen Maßnahmen an Gebäudebeständen im Hinblick auf ein oder mehrere Kriterien quantifiziert werden?

Antwort: Die Quantifizierung von Synergie zwischen baulichen und grünen Maßnahmen an Gebäudebeständen kann anhand eines Vergleichs von Szenarien mit der Ausgangssituation oder mit projektspezifischen Standards erfolgen. Für ein Kriterium sind dazu jeweils die Wirkung der Einzelmaßnahmen sowie die Wirkung ihrer zugehörigen Kombinationen und dementsprechend ein Full Factorial Design notwendig. Bei der Interpretation ist darauf zu achten, dass Einzelmaßnahmen negativ wirken können. Diese Negativwirkung kann durch die Kombination mit anderen Maßnahmen teilweise kompensiert werden. Zur Bewertung von Synergie zwischen mehreren Kriterien ist ebenfalls ein Vergleich mit dem Ausgangsfall zielführend. Dadurch können Maßnahmenkombinationen identifiziert werden, bei denen eine Verbesserung in allen Bewertungsaspekten eintritt. Um die Verbesserungen vergleichbar zu machen, können beispielsweise Normierungsverfahren eingesetzt werden.

Forschungsfrage 3: Wie können Handlungsspielräume für multikriterielle Trade-offs auf Quartiersebene identifiziert und in frühen Planungsphasen gezielt angesteuert werden?

Antwort: Der auf dem Prinzip der Hyper Space Exploration aufbauende Prozess zur *Urban Systems Exploration* bietet eine methodische Grundlage, um Simulationsmodelle zur Quantifizierung multikriterieller Trade-offs aufzubauen und deren Steuermechanismen zu untersuchen. Dabei müssen Wechselwirkungen erfasst und in einem Simulationsmodell abgebildet werden. Die zur Umsetzung der *Urban Systems Exploration* vorgestellte Werkzeugkette demonstriert die praktische Anwendbarkeit der Methodik. Die durchgeführten Expert:inneninterviews zeigen, welche Darstellungen und Informationen die vereinfachte Einbringung der Ergebnisse in frühen Planungsphasen ermöglichen. Dazu zählen etwa zweidimensionale Balkendiagramme, das Clustern optimaler Lösungen, die qualitative Beschreibung sowie die Angabe von Wertebereichen der zugehörigen Design Parameter.

6.6 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus dem Kapitel Diskussion der Ergebnisse:

- Auf der Gebäudeebene führen Maßnahmenkombinationen nur selten zu Verbesserungen der lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, die über eine lineare Aufsummierung der Wirkung beteiligter Einzelmaßnahmen hinausgehen. Dieser bislang überwiegend auf Bauteilebene untersuchte Effekt konnte im Rahmen der vorliegenden Dissertation bis zur Quartiersebene bestätigt werden.
- Die Quartiersebene weist ein höheres Maß an Wechselwirkungen und dadurch hervorgerufene Synergiepotentiale auf als die Gebäudeebene. Diese Wechselwirkungen sind hauptsächlich durch die Interaktionen zwischen den Gebäuden und dem Außenraum geprägt. Bäume und PV Flächen sind wichtige Stellhebel, um das Maß der Interaktionen zu beeinflussen.
- Szenarien, die zu einer Verbesserung der THG-Emissionen, der Lebenszykluskosten und des thermischen Außenraumkomforts gleichzeitig führen, sind nicht zwingend Pareto-optimal. Das bedeutet, es können in einzelnen Aspekten bessere oder zusätzliche Lösungen gefunden werden. Dementsprechend ist es wichtig, eine tiefere Optimierung durchzuführen und den Planungsprozess nicht bereits bei Erreichen einer geringfügigen Verbesserung in allen Bereichen abzuschließen.
- Die *Urban Systems Exploration* ermöglicht einen Überblick über den optimalen Handlungsspielraum in Quartiersentwicklungen. Der Prozess zeigt zudem relevante Einflussmöglichkeiten für quartierspezifische Konstellationen auf, um Trade-offs aktiv zu steuern.
- Die zur Übertragung in die Praxis erarbeiteten Quartiersteckbriefe bieten eine typologiebasierte Übersicht zum optimalen Handlungsspielraum sowie dazugehörige Steuerungsmöglichkeiten. Bei der Erstellung ist auf übersichtliche, vorwiegend zweidimensionale Darstellungen und eine kompakte Form solcher Steckbriefe zu achten.
- Einschränkungen dieser Dissertation bestehen insbesondere hinsichtlich der begrenzten Auswahl an Zielgrößen, der Detailtiefe des Simulationsmodells in den frühen Planungsphasen sowie der begrenzten Anzahl an Expert:inneninterviews.
- Die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde anhand der Landeshauptstadt München visualisiert. Es sollte dennoch im Einzelfall geprüft werden, in wie weit vergleichbare Eigenschaften im Bestand vorliegen.

7 Fazit und Ausblick

Abschließend wird das Fazit der Dissertation für einzelne Kernpunkte dargelegt. Es folgen die Überprüfung der Hypothesen aus Kapitel 1.2 (sh. Seite 3) sowie der Ausblick auf weitere Forschungspotentiale.

7.1 Fazit der Arbeit

Die Ergebnisse dieser Dissertation führen zu folgendem Fazit:

Systemdenken ist für die nachhaltige Transformation der gebauten Umwelt notwendig

Angesichts der vernetzten Natur des urbanen Raums ist es entscheidend, bei der Bewertung von Lösungsansätzen zur nachhaltigen Transformation des Bausektors die auftretenden Wechselwirkungen und Zielkonflikte zu berücksichtigen. Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Untersuchungs- und Bewertungsmethoden ermöglichen einen umfassenden Einblick in dadurch hervorgerufene Synergien und Trade-offs. Die durchgeführten Fallstudien auf Gebäude- und Quartiersebene zeigen die Bedeutung des Systemdenkens, insbesondere für die Lösung multikriterieller Fragestellungen. Planer:innen und Entscheider:innen sollten sich des systemischen Verhaltens der gebauten Umwelt stets bewusst sein und Entscheidungen nicht vorschnell, sondern in Abstimmung mit Vertreter:innen beteiligter Disziplinen treffen. Nur so kann die Relevanz der auftretenden Wechselwirkungen frühzeitig erkannt und diskutiert werden. Dies unterstützt den Abwägungsprozess und verhindert, dass die Fokussierung auf einzelne Zielaspekte zu einer unbewussten Problemverschiebung hin zu anderen Aspekten des nachhaltigen Bauens führt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass Quartiere als ganzheitlich nachhaltige Systeme geplant und umgesetzt werden. Zusätzlich dazu sollten Stadtverwaltungen darauf abzielen, die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Referate und Abteilungen zu intensivieren. Die Lösung komplexer, multikriterieller Fragestellungen erfordert eine koordinierte Anstrengung verschiedener Akteursgruppen, einschließlich Stadtplaner:innen, Architekt:innen und Ingenieur:innen. Die politische Agenda sollte daher darauf ausgerichtet sein, die Integration von Fachwissen aus der Vielzahl von Disziplinen zu erleichtern und den Dialog zwischen relevanten Interessengruppen (z. B. Bürger:innen, Investor:innen, Planer:innen) zu fördern.

Synergien maximieren und Trade-offs steuern

Die Bewertung von Synergieeffekten mit Hilfe der entwickelten Methoden zeigt eine bessere Eignung des multikriteriellen Ansatzes zur Entscheidungsunterstützung im Vergleich zum unikriteriellen Ansatz. Aus Maßnahmenkombinationen resultierende Synergieeffekte konnten bei den durchgeführten Fallstudien nur begrenzt beobachtet werden. Am vielversprechendsten war hierbei das synergetische Wirken von Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumkomforts bzw. des potentiellen Kühlenergiebedarfs. Zudem konnte gezeigt werden, dass Lösungen, die zu einer hohen Verbesserung mehrerer Zieldimensionen führen, nicht zwangsläufig ein Pareto-Optimum darstellen. Dementsprechend gilt es, Synergieeffekte zu maximieren, gleichzeitig aber die auftretenden Trade-offs zu erkennen und gezielt zu steuern. Dabei ist auf die Umsetzung Pareto-optimaler Lösungen zu achten. Die entwickelten Methoden stellen hierfür ein Grundgerüst dar und ermöglichen Planer:innen quantitative Einblicke in die Ausprägung dieser Effekte.

Exploration des Handlungsspielraums unterstützt ausgewogene Quartiersplanung

Viele Optimierungsansätze konzentrieren sich auf die Suche nach einzelnen Entwurfsvarianten. Der in dieser Arbeit entwickelte Prozess zur *Urban Systems Exploration* ermöglicht dagegen einen umfassenden Einblick in die Spannweite optimaler Lösungen. Dies unterstützt Stadtplaner:innen und Entscheidungsträger:innen bei Diskussionen mit verschiedenen Fachstellen, indem aufgezeigt wird, dass eine Vielzahl optimaler Lösungen umsetzbar ist. Beteiligten kann dadurch veranschaulicht werden, dass unter Umständen bereits eine geringfügige Abweichung in einem Zielaspekt zu einer deutlichen Verbesserung anderer Aspekte führt. In den Expert:inneninterviews wurde dies als wichtige Erkenntnis zum Diskussionsanstoß eingeordnet, wenn Positionen festgefahren und die involvierten Parteien stark auf disziplinspezifische Zielgrößen fixiert sind. Damit Stadtplaner:innen von dem entwickelten Prozess profitieren können, müssen Planungsämter ihre Sichtweise erweitern und eine breite Perspektive auf die gestellten Aufgaben zulassen. Dazu ist die Unterstützung durch Experten:innen auf dem Gebiet der systemischen Modellierung und der urbanen Simulation notwendig.

***Urban Systems Exploration* ermöglicht die Ableitung von Rahmenbedingung zur nachhaltigen Quartiersentwicklung in den frühen Planungsphasen**

Es existieren vielfältige Möglichkeiten, um konkrete Umsetzungsvorschläge für Quartiere zu erarbeiten. Der entwickelte Prozess zur *Urban Systems Exploration* ist nur eine davon. Stadtverwaltungen sehen sich zunehmend vor der Herausforderung, die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Quartiersentwicklung auf Basis weniger Informationen festzulegen. Dadurch bestehende Unsicherheiten müssen durch Methoden zur Entscheidungsunterstützung Berücksichtigung finden und früh adressierbar sein. Im Gegensatz zu detaillierten Verfahren ermöglicht die *Urban Systems Exploration* den Stadtplaner:innen eine frühzeitige Ableitung von Rahmenbedingungen für die Quartiersentwicklung in der Bauleitplanung. Diese Informationen sind zudem für die Initialisierung von Planungswettbewerben nutzbar. Das dafür entwickelte Vorgehen zur Gruppierung der optimalen Lösungen erlaubt die gezielte Steuerung von Trade-offs, auch wenn nur sehr wenige Informationen zur Verfügung stehen. Dadurch können die Ergebnisse einer allgemeinen Quartierstypologie auf kontextspezifische Anforderungen übertragen werden. Es bedarf allerdings einer weiteren Erprobung der Ergebnisse dieser Arbeit in der Stadtplanungspraxis.

Trade-off zwischen lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort durch Bäume und PV-Anlagen steuerbar

Die Fallstudien zeigen einen dreidimensionalen Trade-off zwischen den Aspekten der lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, der Lebenszykluskosten und des thermischen Außenraumkomforts. Eine einzelne optimale Lösung für alle drei Zielgrößen gleichzeitig kann nicht gefunden werden, was zur Ausbildung einer PF führt. Dieser Trade-off ist im Zusammenhang mit dem fortschreitenden Klimawandel und der notwendigen Transformation von Städten besonders relevant, da er alle drei Säulen der Nachhaltigkeit beispielhaft adressiert. Obwohl das konkrete Ergebnis stark von den Modellierungsansätzen abhängt und nur begrenzt verallgemeinerbar ist, unterstreicht es die Bedeutung der Untersuchung systemischer Zusammenhänge in zukünftigen Quartiersentwicklungen. Dies ist im komplexen urbanen System dringend erforderlich, um die Auswirkung von Planungsentscheidungen auf nicht unmittelbar zusammenhängende Aspekte aufzuzeigen.

Bäume und PV-Anlagen konnten in der Quartiersfallstudie als wichtige Hebel für den betrachteten Trade-off herausgearbeitet werden. Mit Hilfe dieser beiden Planungsvariablen ist eine Priorisierung der drei genannten Zielaspekte in Abhängigkeit von den vorhandenen städtischen Rahmenbedingungen besonders gut möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass der häufig angenommene Widerspruch zwischen schattenspendenden Bäumen und sonnenexponierter PV irreführend sein kann. Im Zuge der multikriteriellen Optimierung wurden auch Pareto Lösungen mit einem gleichzeitig hohen Anteil von Bäumen und PV Flächen identifiziert. Daher sollten bei der Abwägung von Maßnahmen zur Unterstützung des laufenden städtischen Transformationsprozesses beide Variablen berücksichtigt und eng aufeinander abgestimmt werden.

Vereinfachung für die Praxisanwendung

Eine intensive Berücksichtigung systemischer Zusammenhänge bedingt die Entwicklung anspruchsvoller Simulationsmodelle, welche die Abbildung von Wechselwirkungen sowie eine effektive und effiziente Analyse erlauben. Die Zusammenarbeit mit der Praxis ist dabei von großem Wert, da dadurch umfangreiche Einblicke in bekannte Wechselwirkungen erlangt sowie mögliche Auswirkungen und Zusammenhänge erfassbar werden. Die Umsetzung in simulationsfähigen Modellen und deren Auswertung obliegt jedoch Expert:innen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, vereinfachte Handlungsempfehlungen aus den Ergebnissen abzuleiten. Die hierfür entwickelten Quartiersteckbriefe sind eine praktische und leicht verständliche Möglichkeit, um die identifizierten Trade-offs und Handlungsspielräume für einzelne Quartierstypologien zu kommunizieren. Durch die qualitative Einordnung der Planungsvariablen können zudem Rahmenbedingungen für die Steuerung von Trade-offs in frühen Planungsphasen abgeleitet werden. Die aus dieser Arbeit hervorgehenden Quartiersteckbriefe (sh. Anhang D, Seite 158) umfassen mit Praxisbeteiligten abgestimmte Visualisierungen, die dazu beitragen komplexe Zusammenhänge verständlich und transparent zu machen. Auf diese Weise können die Ergebnisse in Diskussionen und Entscheidungsprozessen von verschiedenen Stakeholder:innen nachvollzogen werden.

7.2 Prüfung der Hypothesen

Basierend auf den Ergebnis- und Diskussionsteilen dieser Dissertation ergeben sich für die in Kapitel 1.2 aufgestellten Hypothesen folgende Bewertungen:

Hypothese 1: Es können Maßnahmenkombinationen identifiziert werden, die in ihrem Zusammenwirken einen größeren positiven Effekt auf die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen haben als die Summe ihrer Einzelmaßnahmen.

Fazit: Die Bewertung der unikriteriellen Synergie für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen erfolgte anhand der in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Methode. Für die betrachtete Fallstudie auf Gebäudeebene konnte nur ein geringfügiger Effekt beobachtet werden (sh. Kapitel 4.2.4, Seite 46). Die Untersuchung auf Quartiersebene ergab ebenfalls nur eine eingeschränkte Wirkung (sh. Kapitel 4.3.3, Seite 64). Obwohl jeweils ein breiter parametrischer Ansatz gewählt wurde, konnten nur wenige Konstellationen ein positives Ergebnis erzielen. Auf Gebäude- und Quartiersebene gingen nur 0,01 % bzw. 0,56 % der simulierten Szenarien über ein Ergebnis von 5 % für die unikriterielle Synergie der lebenszyklusbasierten THG-Emissionen hinaus (sh. Tabelle 4.7, Seite 65). Zudem wurden häufig negative Wirkungen einzelner Maßnahmen als Grund für das verbesserte positive Abschneiden von Maßnahmenkombinationen identifiziert. Zusammenfassend sind vereinzelte Kombinationen möglich, welche die Hypothese bestätigen. Diese sind aber meist auf eine Verringerung negativer Auswirkungen durch die Kombination zurückzuführen, weshalb die Forschungshypothese 1 nur teilweise verifiziert werden kann.

Hypothese 2: Der bestmögliche Handlungsspielraum in multikriteriellen Problemstellungen kann durch den Einsatz urbaner Simulationsmodelle und multikriterieller Optimierungsverfahren ermittelt werden.

Fazit: Der entwickelte Prozess zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung (*Urban Systems Exploration*) und dessen Anwendung zeigen, dass der optimale Handlungsspielraum dadurch ermittelbar ist. Der gewählte Optimierungsansatz mittels Pareto Reflexionen im Rahmen des *Pareto MOO* Algorithmus unterstützt dies unter mathematischer Garantie von Pareto Eigenschaftserhaltung sowie der Möglichkeit zur gezielten Suche nach den Eckpunkten der PF [215]. Zudem bietet die *Urban Systems Exploration* einen umfassenden Ansatz, um den bestmöglichen Lösungsraum zu untersuchen und daraus auf die Eigenschaften Pareto-optimaler Alternativen zu schließen (sh. Kapitel 4.4, Seite 70). Forschungshypothese 2 kann somit verifiziert werden.

Hypothese 3: Die Untersuchung von Synergien und Trade-offs ermöglicht die Ableitung von praxistauglicher Entscheidungsunterstützung zur kontextspezifischen Abwägung von THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort in frühen Planungsphasen.

Fazit: Die entworfenen Quartiersteckbriefe dienen zur vereinfachten Anwendung der Ergebnisse. Ihre Praxistauglichkeit wurde in den durchgeführten Expert:inneninterviews bestätigt und verbessert. Somit ist eine quartiersspezifische Steuerung des Trade-offs zwischen THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort in frühen Planungsphasen möglich. Forschungshypothese 3 kann dementsprechend verifiziert werden.

7.3 Ausblick

Die vorliegende Dissertation hat gezeigt, dass noch erheblicher Spielraum für weiterführende Forschung auf dem Gebiet der Bewertung von Wechselwirkungen im urbanen Raum besteht. Im Folgenden sind die wesentlichen Weiterentwicklungspotentiale dargelegt:

Skalierung auf Stadtebene

Die Ausweitung der *Urban Systems Exploration* vom Quartier auf die städtische Ebene sollte den intensiveren Einbezug von Aspekten wie der Mobilität und dem Nutzer:innenverhalten forcieren. Die Erweiterung des in dieser Dissertation verfolgten Ansatzes von Quartierstypologien um Schnittstellen zum Gesamtsystem Stadt stellt dabei einen vielversprechenden Weg dar, um allgemeine Empfehlungen auf größerem Maßstab zu generieren und die Effektivität verschiedener Maßnahmen im gesamtstädtischen Kontext zu bewerten.

Weitere Detaillierung des Simulationsmodells

Die methodische Weiterentwicklung von Simulationsbausteinen bietet hohes Potential für verbesserte und umfangreichere Analysen. Beispielsweise sind Windsimulationen durch die FFD Methode bereits heute für parametrische Untersuchungen verwendbar. Künftig könnten Modelle der künstlichen Intelligenz die Simulationszeiten stark reduzieren [75]. Dies würde die Berücksichtigung weiterer Wechselwirkungen im Modell ermöglichen, etwa die Auswirkungen lokaler Windeffekte auf den Energiebedarf im Gesamtjahr [255]. Weiterentwicklungen der in dieser Arbeit verwendeten Komponenten gehen ebenfalls laufend vonstatten. Beispielsweise präsentieren Xu et al. ein Update des UWGs, welches neben erhöhter Genauigkeit die Integration von Einflüssen aus blauer Infrastruktur auf den städtischen Wärmeineffekt erlaubt [256]. Das Update stand zum Zeitpunkt dieser Dissertation noch nicht öffentlich zur Verfügung, könnte aber innerhalb des vorhandenen Simulationsmodells integriert und mittels des beschriebenen Prozesses vernetzt werden.

Ausbau der vorhandenen Datengrundlage

Die Schließung von bestehenden Lücken in der Gebäudeinformation des Bestandes wäre ebenfalls ein bedeutender Beitrag zur Verbesserung der Simulationsmodelle [31]. Eine detailliertere Gebäudebewertung würde spezifischere Synergiepotentiale aufzeigen und somit zu einer präziseren Bewertung von nachhaltigen Entwicklungsmaßnahmen beitragen. Zudem könnte die eingangs genannte Übertragung und Skalierung der Ergebnisse auf Stadtebene mithilfe von Quartierstypologien dadurch spezifiziert und verbessert werden.

Ausweitung Design und Target Space

Mit der Integration weiterer Komponenten in das Simulationsmodell besteht die Option, zusätzliche Stell- und Zielgrößen in die Untersuchung aufzunehmen. Dies ermöglicht die Ausweitung des Planungsprozesses auf weitere Disziplinen. Dabei muss jedoch die verfügbare Rechenleistung berücksichtigt werden, damit die Simulationsmodelle mit gängigen Optimierungsmethoden verarbeitbar bleiben. Darüber hinaus sollten im Vorfeld die Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen untersucht werden, um nur solche einzubeziehen, die tatsächlich einen Trade-off repräsentieren. Liegt eine Korrelation zwischen den weiteren Zielgrößen vor, handelt es sich unter Umständen um kein multikriterielles Problem, sondern es ist eine einzelne optimale Lösung identifizierbar. Hierzu sind vorab einsetzbare Methoden zur Prüfung auf mehrdimensionale Trade-offs erforderlich.

Unterstützung im Auswahlprozess

Die vorgestellten Fallstudienresultate basieren auf der Bewertung von drei Zielgrößen. Dieser Umfang war im Zuge der Expert:inneninterviews noch gut erfassbar. Allerdings wird deutlich, dass eine darüber hinausgehende Erweiterung der Anzahl an Zielgrößen zu einer komplexeren und kaum mehr überschaubaren Entscheidungslandschaft führen kann. Angesichts dieser Herausforderungen wird es essenziell, Methoden zu entwickeln, die auf der Exploration des Handlungsspielraums aufbauen und den Abwägungsprozess vereinfachen. Eine vielversprechende Herangehensweise könnte darin bestehen, qualitative Beschreibungen zu verwenden, wie dies in den vorgestellten Steckbriefen bereits erprobt wurde. Es ist dabei von besonderer Bedeutung, dass die Ergebnisse nicht zwanghaft in einen numerischen Wert zusammengefasst, sondern in ihrer Bandbreite erhalten bleiben. Dadurch sollte den Entscheidungsträger:innen ein umfassendes Verständnis vermittelt und ihnen gleichzeitig die Freiheit gegeben werden, auf der Grundlage dieses Wissens ihre eigene Expertise und Intuition in den Entscheidungsprozess einzubringen.

Verbesserung der multikriteriellen Optimierung

Bisher waren keine Variablen einer Nominalskala in den gewählten Optimierungsansatz integriert. Daher wurden verschiedene Quartierstypologien als eigene Anwendungsfälle (Use Cases) modelliert. Könnten diese als nominale Variablen in den Design Space integriert werden, würde eine Abwägung der möglichen Quartierstypologien untereinander in nur einem Simulationsschritt möglich. Dies wäre insbesondere für die Anwendung der *Urban Systems Exploration* auf Neubaugebiete von hoher Relevanz. Dabei bestehen größere Freiheiten hinsichtlich der Typologiewahl als in den bislang betrachteten Bestandsstrukturen.

Auswirkungen des Klimawandels auf Trade-offs

Die zunehmend spürbaren Folgen des Klimawandels lassen eine deutliche Veränderung der Energiebilanz von Gebäuden erwarten [162]. Dementsprechend sollten die im Rahmen dieser Arbeit für heutige Klimabedingungen durchgeführten Untersuchungen um Klimawandelszenarien erweitert werden. Dadurch würden Quartierstypologien identifizierbar, deren Trade-off Ausprägung besonders vulnerabel auf Klimaveränderungen reagiert und somit eine noch intensivere Abstimmung im Planungsprozess erfordert.

Synergiebewertung in weiteren Kontexten

Diese Arbeit konnte nur eine geringe Relevanz der unikriteriellen Synergie für die betrachteten Fallstudien und die Zielgrößen Heizwärmebedarf und lebenszyklusbasierte THG-Emissionen feststellen. Eine Anwendung der Bewertungsmethodik in weiteren Kontexten könnte zu einer stärkeren Verallgemeinerbarkeit beitragen. Dabei sollten insbesondere klimatische Situationen untersucht werden, in denen Kühlenergiebedarfe eine größere Rolle am Gesamtenergiebedarf einnehmen, da für die Gebäudekühlung der bisweilen größte synergetische Effekt festgestellt wurde. Nichtwohngebäude stellen unter diesem Gesichtspunkt ebenfalls ein relevantes Anwendungsfeld dar, da ihr Kühlenergiebedarf in der Regel höher ausfällt als dies bei Wohngebäuden der Fall ist [160].

7.4 Kurzfassung des Kapitels

Kernpunkte aus dem Kapitel Fazit:

- Die nachhaltige Transformation der gebauten Umwelt erfordert zwingend eine systemische Herangehensweise. Dadurch wird sichergestellt, dass Wechselwirkungen im Planungsprozess eine angemessene Berücksichtigung finden. Andernfalls besteht die Gefahr von einseitig optimierten Quartieren, die aufgrund der Vernachlässigung einzelner Aspekte stark an Qualität einbüßen.
- Disziplinenübergreifende Zusammenarbeit ist in der Quartiersentwicklung unumgänglich. Es liegt eine Vielzahl an Trade-offs vor, die balanciert und abgestimmt werden müssen. Der entwickelte Prozess zur *Urban Systems Exploration* bietet einen ganzheitlichen Einblick in die Bandbreite optimaler Lösungen im Vergleich zu herkömmlichen, auf einzelne Entwurfsvarianten fokussierte Optimierungsansätze.
- Die politische Agenda sollte die Integration von Fachwissen aus verschiedenen Disziplinen erleichtern und den Dialog zwischen Interessengruppen unterstützen.
- Ohne die Analyse von Trade-offs besteht die Gefahr nicht optimaler Lösungen, die zwar für eine Zielgröße ein sehr gutes Ergebnis erreichen, jedoch kein Pareto-Optimum darstellen. In solchen Fällen sind Verbesserungen in den weiteren Zielgrößen möglich, ohne eine Problemverschiebung hervorzurufen.
- Die Fallstudienresultate zeigen, dass der Trade-off zwischen lebenszyklusbasierten THG-Emissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort gut mittels Bäumen und PV steuerbar ist. Dabei können auch Varianten mit hohem Baum- und PV Anteil zu optimalen Lösungen führen. Diese beiden Stellhebel sollten in der Quartiersentwicklung stets aufeinander abgestimmt werden.
- Es muss ein Frontloading in der Quartiersplanung stattfinden, welches dazu führt, dass solche grundlegenden Betrachtungen bereits in der Vorbereitung von Bauleitplanungen und Wettbewerbsauslobungen durchgeführt werden. Nur dadurch können Entwicklungen frühzeitig, gezielt und kostengünstig in eine nachhaltige Richtung gelenkt werden.
- Die entwickelten Quartiersteckbriefe bieten eine praktische und leicht verständliche Möglichkeit, Trade-offs für verschiedene Quartierstypologien zu steuern. Die Verfügbarkeit solcher vereinfachter Handlungsempfehlungen für Planer:innen und Entscheidungsträger:innen muss weiter erhöht werden, um die nachhaltige Transformation der gebauten Umwelt voranzutreiben.

Kernpunkte aus dem Kapitel Ausblick:

- Quartierstypologien bieten einen vielversprechenden Ansatz für die Skalierung der entwickelten Methodik auf Stadtebene.
- Mit einer Verbesserung der vorhandenen Datengrundlage nimmt auch die Ergebnisqualität bei der Bewertung von Bestandsquartieren zu. Zudem können diese Informationen zur Skalierung auf die Stadtebene beitragen.
- Urbane Simulationsmodelle lassen sich beliebig komplex gestalten. Künftige Weiterentwicklungen von Simulationsbausteinen sollten hier einbezogen werden, um stets einen guten Kompromiss zwischen der notwendigen Rechenleistung und dem Detaillierungsgrad sicherzustellen. Dadurch lassen sich weitere Zielgrößen und Planungsvariablen in die Untersuchung aufnehmen.
- Eine steigende Anzahl an Zielgrößen erhöht die Komplexität in der Entscheidungsfindung. Daher ist die Entwicklung von Methoden, die auf der Exploration des Handlungsspielraums basieren und weitergehende Unterstützung zur Wahl eines geeigneten Trade-offs bieten, notwendig. Die Aufrechterhaltung der Lösungsvielfalt ist dabei wichtig, um Entscheidungsträger:innen ein umfassendes Verständnis zu vermitteln und ihre Freiheit bei der Einbringung von Expertise und Intuition zu wahren.
- Die Verbesserung und Integration alternativer Optimierungsalgorithmen, insbesondere zur Abdeckung von nominalen Variablen, würde die Nutzbarkeit der *Urban Systems Exploration* in Neubauprojekten verbessern.
- Durch die Berücksichtigung des Klimawandels im Simulationsmodell ließen sich Erkenntnisse zur künftigen Relevanz der betrachteten Trade-offs gewinnen und damit Quartiersentwicklungen zukunftssicherer gestalten.
- Der entwickelte Ansatz zur Synergiebewertung sollte in weiteren Kontexten angewandt und dadurch die Allgemeingültigkeit der in den Fallstudien beobachteten geringen Relevanz unikriterieller Synergie für die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] United Nations Environment Programme, *Global Status Report for Buildings and Construction 2022: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. 2022. Adresse: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction> (aufgerufen am 14. 01. 2024).
- [2] C. Bi und J. C. Little, „Integrated assessment across building and urban scales: A review and proposal for a more holistic, multi-scale, system-of-systems approach“, *Sustainable Cities and Society*, **82**, Nr. 103915, 2022, ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103915.
- [3] World Commission on Environment and Development, *The Brundtland Report: Our Common Future* (Oxford Paperbacks). Oxford University Press, 1987, ISBN: 9780192820808.
- [4] M. Wackernagel und B. Beyers, *Ecological footprint: Managing our biocapacity budget*. New Society Publishers, 2019, ISBN: 9780865719118.
- [5] World Economic Forum, *The Global Risks Report: 18th Edition - Insight Report*. 2023. Adresse: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/> (aufgerufen am 22. 12. 2023).
- [6] M. Welsch und T. Lützkendorf, *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland: Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt*, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Hrsg. 2020. Adresse: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020.html> (aufgerufen am 02. 05. 2022).
- [7] United Nations - Department of Economic and Social Affairs, Populations Division, *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. 2019. Adresse: <https://population.un.org/wup/> (aufgerufen am 02. 05. 2022).
- [8] S. Grafakos, K. Trigg, M. Landauer, L. Chelleri und S. Dhakal, „Analytical framework to evaluate the level of integration of climate adaptation and mitigation in cities“, *Climatic Change*, **154**, S. 87–106, 2019, ISSN: 0165-0009. DOI: 10.1007/s10584-019-02394-w.
- [9] K. Raworth, *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*. Chelsea Green Publishing, 2017, ISBN: 9781603586740.
- [10] A. Sharifi, „Trade-offs and conflicts between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review“, *Journal of Cleaner Production*, **276**, Nr. 122813, 2020, ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122813.
- [11] R. Daniel, J. Cortesão, G.-J. Steeneveld, S. Stremke und S. Lenzholzer, „Performance of urban climate-responsive design interventions in combining climate adaptation and mitigation“, *Building and Environment*, **236**, Nr. 110227, 2023, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110227.

- [12] K. Allacker, V. Castellani, G. Baldinelli, F. Bianchi, C. Baldassarri und S. Sala, „Energy simulation and LCA for macro-scale analysis of eco-innovations in the housing stock“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **24**, Nr. 6, S. 989–1008, 2019. DOI: 10.1007/s11367-018-1548-3.
- [13] S. A. Markolf et al. „Interdependent Infrastructure as Linked Social, Ecological, and Technological Systems (SETSs) to Address Lock-in and Enhance Resilience“, *Earth's Future*, **6**, Nr. 12, S. 1638–1659, 2018, ISSN: 2328-4277. DOI: 10.1029/2018EF000926.
- [14] O. L. de Weck, D. Roos, C. L. Magee, C. M. Vest und S. Cooper, *Engineering Systems : Meeting Human Needs in a Complex Technological World*. MIT Press, 2011, ISBN: 9780262298513.
- [15] B. C. Patten, „Network ecology: indirect determination of the life-environment relationship in ecosystems“, in *Theoretical studies of ecosystems*, M. Higashi und T. P. Burns, Hrsg., Cambridge University Press, 1991, S. 288–351, ISBN: 0521105838.
- [16] L. Xu et al. „Identifying the trade-offs between climate change mitigation and adaptation in urban land use planning: An empirical study in a coastal city“, *Environment international*, **133**, Nr. 105162, 2019. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105162.
- [17] R. Ramírez-Villegas, O. Eriksson und T. Olofsson, „Life Cycle Assessment of Building Renovation Measures: Trade-off between Building Materials and Energy“, *Energies*, **12**, Nr. 344, 2019. DOI: 10.3390/en12030344.
- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14040:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Beuth Verlag, 2021. DOI: 10.31030/1555059.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14044:2021-02 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Beuth Verlag, 2021. DOI: 10.31030/3179656.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 15978:2011 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*. Beuth Verlag, 2012. DOI: 10.31030/1917049.
- [21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, *Ökobaudat: Informationsportal Nachhaltiges Bauen*, 2023. Adresse: <https://www.oekobaudat.de/> (aufgerufen am 29.03.2023).
- [22] M. Drilling und O. Schur, *Nachhaltige Quartiersentwicklung: Positionen, Praxisbeispiele und Perspektiven* (Quartiersforschung). VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012, ISBN: 9783531941509. DOI: 10.1007/978-3-531-94150-9.
- [23] R. K. Zimmermann, K. Kanafani, F. N. Rasmussen, C. Andersen und H. Birgisdóttir, „LCA-Framework to Evaluate Circular Economy Strategies in Existing Buildings“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **588**, Nr. 042044, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/588/4/042044.
- [24] S. Slabik, C. Zernicke, M. Storck und A. Hafner, „A methodological approach for life cycle assessment of refurbishment measures - from building to neighbourhood and municipal level“, *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, **38**, S. 559–565, 2022. DOI: 10.14311/APP.2022.38.0559.

- [25] M. Lotteau, P. Loubet, M. Pousse, E. Dufrasnes und G. Sonnemann, „Critical review of life cycle assessment for the built environment at the neighborhood scale“, *Building and Environment*, **93**, S. 165–178, 2015, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.06.029.
- [26] S. Longo, F. Montana und E. Riva Sanseverino, „A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations“, *Sustainable Cities and Society*, **45**, S. 87–104, 2019, ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2018.11.027.
- [27] 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*, **12**, Nr. 7, S. 2633, 2020. DOI: 10.3390/su12072633.
- [28] A. Braune, L. Ekhvaia und K. Quante, *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion: Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Hrsg. 2021. Adresse: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf (aufgerufen am 15.02.2022).
- [29] M. Röck et al. „Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation“, *Applied Energy*, **258**, Nr. 114107, 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107.
- [30] J. Mukkavaara und F. Shadram, „An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design“, *Energy and Buildings*, **253**, Nr. 111529, 2021, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111529.
- [31] A. Mastrucci, A. Marvuglia, E. Benetto und U. Leopold, „A spatio-temporal life cycle assessment framework for building renovation scenarios at the urban scale“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **126**, Nr. 109834, 2020, ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109834.
- [32] B. Kiss und Z. Szalay, „Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings“, *Automation in Construction*, **111**, Nr. 103044, 2020, ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103044.
- [33] D. Matic, J. R. Calzada, M. Eric und M. Babin, „Economically feasible energy refurbishment of prefabricated building in Belgrade, Serbia“, *Energy and Buildings*, **98**, S. 74–81, 2015, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.10.041.
- [34] N. Gohardani, T. af Klintberg und F. Björk, „Turning building renovation measures into energy saving opportunities“, *Structural Survey*, **33**, Nr. 2, S. 133–149, 2015, ISSN: 0263-080X. DOI: 10.1108/SS-09-2013-0034.
- [35] A. Galimshina et al. „Statistical method to identify robust building renovation choices for environmental and economic performance“, *Building and Environment*, **183**, Nr. 107143, 2020, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107143.
- [36] 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*, **112**, S. 166–176, 2017, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.11.031.

- [37] C. Ju, Y. Ning und W. Pan, „A review of interdependence of sustainable building“, *Environmental Impact Assessment Review*, **56**, S. 120–127, 2016, ISSN: 0195-9255. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.09.006.
- [38] R. Haberkellner, O. L. Weck, E. Fricke und S. Vössner, *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung*, 14. Aufl. Zürich: Orell Füssli Verlag, 2018, ISBN: 9783280092156.
- [39] F. Ali-Toudert und L. Ji, „Modeling and measuring urban sustainability in multi-criteria based systems – A challenging issue“, *Ecological Indicators*, **73**, S. 597–611, 2017, ISSN: 1470-160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.046.
- [40] S. E. Chidiac, E. Catania, E. Morofsky und S. Foo, „Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings“, *Energy*, **36**, Nr. 8, S. 5037–5052, 2011, ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2011.05.050.
- [41] J. Bull, A. Gupta, D. Mumovic und J. Kimpian, „Life cycle cost and carbon footprint of energy efficient refurbishments to 20th century UK school buildings“, *International Journal of Sustainable Built Environment*, **3**, Nr. 1, S. 1–17, 2014, ISSN: 2212-6090. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2014.07.002.
- [42] M. Panagiotidou, L. Aye und B. Rismanchi, „Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets“, *Energy and Buildings*, **252**, Nr. 111385, 2021, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111385.
- [43] N. Heeren, C. L. Mutel, B. Steubing, Y. Ostermeyer, H. Wallbaum und S. Hellweg, „Environmental Impact of Buildings—What Matters?“, *Environmental science & technology*, **49**, Nr. 16, S. 9832–9841, 2015. DOI: 10.1021/acs.est.5b01735.
- [44] J. Felkner, B. Marshal, S. Richter, E. Mbata und Zigmund, S., Nagy, Z., „Linking urban scenarios with energy simulations for dense urban planning under climate change“, *Journal of Physics: Conference Series*, **2042**, Nr. 012054, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2042/1/012054.
- [45] V. Z. Leskovar, M. Lesnik und M. Premrov, „Building refurbishment by vertical extension with lightweight structural modules“, *1st Latin American SDEWES Conference, Rio de Janeiro*, 2018.
- [46] J. H. Kämpf, M. Wetter und D. Robinson, „A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus“, *Journal of Building Performance Simulation*, **3**, Nr. 2, S. 103–120, 2010, ISSN: 1940-1493. DOI: 10.1080/19401490903494597.
- [47] G. A. Blengini und T. Di Carlo, „The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings“, *Energy and Buildings*, **42**, Nr. 6, S. 869–880, 2010, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- [48] N. Schüler, S. Cajot, M. Peter, J. Page und F. Maréchal, „The Optimum Is Not the Goal: Capturing the Decision Space for the Planning of New Neighborhoods“, *Frontiers in Built Environment*, **3**, 2018. DOI: 10.3389/fbuil.2017.00076.
- [49] D. R. Lumpkin, W. T. Horton und J. V. Sinfield, „Holistic synergy analysis for building subsystem performance and innovation opportunities“, *Building and Environment*, **178**, Nr. 106908, 2020, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106908.

- [50] H. Bott, G. C. Grassl und S. Anders, *Sustainable Urban Planning: Vibrant Neighbourhoods, Smart Cities, Resilience*. München: DETAIL Business Information GmbH, 2019, ISBN: 97839555-34622.
- [51] J. Natanian, O. Aleksandrowicz und T. Auer, „A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts“, *Applied Energy*, **254**, Nr. 113637, 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113637.
- [52] J. Natanian und T. Auer, „Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow“, *Sustainable Cities and Society*, **56**, Nr. 102094, 2020, ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102094.
- [53] H. Liu, Y. Pan, Y. Yang und Z. Huang, „Evaluating the impact of shading from surrounding buildings on heating / cooling energy demands of different community forms“, *Building and Environment*, **206**, Nr. 108322, 2021, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108322.
- [54] R. Loeffler, D. Österreicher und G. Stoeglehner, „The energy implications of urban morphology from an urban planning perspective – A case study for a new urban development area in the city of Vienna“, *Energy and Buildings*, **252**, Nr. 111453, 2021, ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111453.
- [55] Z. Tan, A. Wang, T. E. Morakinyo und Yung, Esther, Chan, Edwin, „Assessing the mitigation performance of building setback from street and the combination with roadside tree planting“, *Building and Environment*, **212**, Nr. 108814, 2022, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.108814.
- [56] T. Rötzer, A. Moser-Reischl, M. A. Rahman, R. Grote, S. Pauleit und H. Pretzsch, „Modelling Urban Tree Growth and Ecosystem Services: Review and Perspectives“, in *Progress in Botany*, F. M. Cánovas, U. Lüttge, M.-C. Risueño und H. Pretzsch, Hrsg., Bd. 82, Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 405–464, ISBN: 9783030686192. DOI: 10.1007/124_2020_46.
- [57] B.-J. He, „Green building: A comprehensive solution to urban heat“, *Energy and Buildings*, **271**, Nr. 112306, 2022, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112306.
- [58] W. Loibl et al. „Urban Densification and Urban Climate Change – Assessing Interaction through Densification Scenarios and Climate Simulations“, *REAL Corp*, **2019**, S. 809–817, 2019.
- [59] H. Welters, J. Sterl, A. Jentgens und B. Wahler, *Städtebauliche Nachverdichtung im Klimawandel: Ein ExWoSt-Fachgutachten* (ExWoSt-Information). Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2014, Bd. 46/1.
- [60] T. McPhearson et al. „Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities“, *BioScience*, **66**, Nr. 3, S. 198–212, 2016, ISSN: 0006-3568. DOI: 10.1093/biosci/biw002.
- [61] T. McPhearson et al. „A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services“, *One Earth*, **5**, Nr. 5, S. 505–518, 2022, ISSN: 2590-3322. DOI: 10.1016/j.oneear.2022.04.007.
- [62] K. Rus, V. Kilar und D. Koren, „Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: A new literature review“, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **31**, S. 311–330, 2018, ISSN: 2212-4209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.05.015.

- [63] S. Anders, *Stadt als System: Methode zur ganzheitlichen Analyse von Planungskonzepten*. Verlag Dorothea Rohn, 2016, ISBN: 9783946319023.
- [64] R. Webb et al. „Sustainable urban systems: Co-design and framing for transformation“, *Ambio*, **47**, Nr. 1, S. 57–77, 2018. DOI: 10.1007/s13280-017-0934-6.
- [65] X. Mu, L. Kong, C. Tu, J. Chen und G. Hu, „Correlation and synergy analysis of urban economy–energy–environment system: A case study of Beijing“, *Natural Resource Modeling*, 2021, ISSN: 0890-8575. DOI: 10.1111/nrm.12329.
- [66] Y. Zhang, H. Liu und B. D. Fath, „Synergism analysis of an urban metabolic system: Model development and a case study for Beijing, China“, *Ecological Modelling*, **272**, S. 188–197, 2014, ISSN: 0304-3800. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.10.003.
- [67] S. Chen und B. Chen, „Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: a case study of Vienna, Austria“, *Environmental science & technology*, **46**, Nr. 8, S. 4498–4506, 2012. DOI: 10.1021/es204662k.
- [68] M. Landauer, S. Juhola und M. Söderholm, „Inter-relationships between adaptation and mitigation: a systematic literature review“, *Climatic Change*, **131**, Nr. 4, S. 505–517, 2015, ISSN: 0165-0009. DOI: 10.1007/s10584-015-1395-1.
- [69] M. McHale et al. „The New Global Urban Realm: Complex, Connected, Diffuse, and Diverse Social-Ecological Systems“, *Sustainability*, **7**, Nr. 5, S. 5211–5240, 2015. DOI: 10.3390/su7055211.
- [70] B. Sevaldson, „Systems-oriented design for the built environment“, in *Design Innovation for the Built Environment*, M. U. Hensel, Hrsg., Florence: Routledge, 2012, S. 107–120, ISBN: 9780203129746.
- [71] L. A. Duguma, S. W. Wambugu, P. A. Minang und M. van Noordwijk, „A systematic analysis of enabling conditions for synergy between climate change mitigation and adaptation measures in developing countries“, *Environmental Science & Policy*, **42**, S. 138–148, 2014, ISSN: 1462-9011. DOI: 10.1016/j.envsci.2014.06.003.
- [72] K. Asarpota und V. Nadin, „Energy Strategies, the Urban Dimension, and Spatial Planning“, *Energies*, **13**, Nr. 14, 2020. DOI: 10.3390/en13143642.
- [73] Y. Li, D. Wang, S. Li und W. Gao, „Impact Analysis of Urban Morphology on Residential District Heat Energy Demand and Microclimate Based on Field Measurement Data“, *Sustainability*, **13**, Nr. 4, S. 2070, 2021. DOI: 10.3390/su13042070.
- [74] M. M. Saleh und K. S. Al-Hagla, „Parametric Urban Comfort Envelope: An Approach toward a Responsive Sustainable Urban Morphology“, *International Journal of Social, Human Science and Engineering*, **6**, Nr. 11, S. 1089–1096, 2012. DOI: 10.5281/zenodo.1057207.
- [75] Y. Hu, Y. Peng, Z. Gao und F. Xu, „Application of CFD plug-ins integrated into urban and building design platforms for performance simulations: A literature review“, *Frontiers of Architectural Research*, 2022, ISSN: 2095-2635. DOI: 10.1016/j.foar.2022.06.005.
- [76] F. Johari, J. Munkhammar, F. Shadram und J. Widén, „Evaluation of simplified building energy models for urban-scale energy analysis of buildings“, *Building and Environment*, **211**, Nr. 108684, 2022, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108684.

- [77] K. Liu, X. Xu, R. Zhang, L. Kong, W. Wang und W. Deng, „Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study of residential blocks in Jianhu, China“, *Energy and Buildings*, **280**, Nr. 112727, 2023, ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112727.
- [78] V. Pareto, „Manuel d'Economie politique“, *Bulletin of the American Mathematical Society*, **18**, 1912.
- [79] H. Palm und J. Holzmann, „Hyper Space Exploration a Multicriterial Quantitative Trade-Off Analysis for System Design in Complex Environment“, *International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, S. 1–6, 2018. DOI: 10.1109/SysEng.2018.8544435.
- [80] M. Manni und A. Nicolini, „Multi-Objective Optimization Models to Design a Responsive Built Environment: A Synthetic Review“, *Energies*, **15**, Nr. 2, S. 486, 2022. DOI: 10.3390/en15020486.
- [81] T. Wortmann und G. Nannicini, „Introduction to Architectural Design Optimization“, in *City Networks*, Springer Cham, 2018, S. 259–278, ISBN: 9783319880013. DOI: 10.1007/978-3-319-65338-9.
- [82] K.-H. Chang, *Design Theory and Methods Using CAD/CAE: Chapter 5 - Multiobjective Optimization and Advanced Topics*. Academic Press, 2015, S. 325–406, ISBN: 978-0-12-398512-5. DOI: 10.1016/B978-0-12-398512-5.00005-0.
- [83] L. Magnier und F. Haghghat, „Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network“, *Building and Environment*, **45**, Nr. 3, S. 739–746, 2010, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.016.
- [84] T. Wortmann und J. Natanian, „Multi-Objective Optimization for Zero-Energy Urban Design in China: A Benchmark“, *SimAUD 2020*, S. 203–210, 2020.
- [85] T. Wortmann, J. Cichocka und C. Waibel, „Simulation-based optimization in architecture and building engineering: Results from an international user survey in practice and research“, *Energy and Buildings*, **259**, Nr. 111863, 2022, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.111863.
- [86] T. Wortmann, „Opossum - Introducing and Evaluating a Model-based Optimization Tool for Grasshopper“, in *Proceedings of the 22nd CAADRIA Conference*, (Hong Kong), 2017, S. 283–292.
- [87] R. Zhang, X. Xu, P. Zhai, K. Liu, L. Kong und W. Wang, „Agile and integrated workflow proposal for optimising energy use, solar and wind energy potential, and structural stability of high-rise buildings in early design decisions“, *Energy and Buildings*, **300**, Nr. 113692, 2023, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113692>.
- [88] G. Guariso und M. Sangiorgio, „Improving the Performance of Multiobjective Genetic Algorithms: An Elitism-Based Approach“, *Information*, **11**, Nr. 12, S. 587, 2020. DOI: 10.3390/info11120587.
- [89] L. Zhao, W. Zhang und W. Wang, „BIM-Based Multi-Objective Optimization of Low-Carbon and Energy-Saving Buildings“, *Sustainability*, **14**, Nr. 20, 2022, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su142013064.
- [90] C. P. Boyd JR., „Designing to reduce construction costs“, *Journal of the Construction Division*, **CO4**, S. 587–592, 1976.

- [91] A. P. Otovic, L. M. B. Jensen und K. Negendahl, „Expansion in Number of Parameters: Simulation of Energy and Indoor Climate in Combination with LCA“, *2016 ASHRAE Annual Conference - St. Louis, MO, United States*, S. 1–8, 2016.
- [92] Z. Shi, J. A. Fonseca und A. Schlueter, „A parametric method using vernacular urban block typologies for investigating interactions between solar energy use and urban design“, *Renewable Energy*, **165**, S. 823–841, 2021, ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.067.
- [93] S. Shahi, P. Wozniczka, C. Rausch, I. Trudeau und C. Haas, „A computational methodology for generating modular design options for building extensions“, *Automation in Construction*, **127**, Nr. 103700, 2021, ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103700.
- [94] J. Bader und E. Zitzler, „HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization“, *Evolutionary Computation*, **19**, Nr. 1, S. 45–76, 2011, ISSN: 1063-6560.
- [95] N. Abdollahzadeh und N. Bioria, „Urban microclimate and energy consumption: A multi-objective parametric urban design approach for dense subtropical cities“, *Frontiers of Architectural Research*, **11**, Nr. 3, S. 453–465, 2022, ISSN: 2095-2635. DOI: 10.1016/j.foar.2022.02.001.
- [96] P. Li, T. Xu, S. Wei und Z.-H. Wang, „Multi-objective optimization of urban environmental system design using machine learning“, *Computers, Environment and Urban Systems*, **94**, Nr. 101796, 2022, ISSN: 0198-9715. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101796.
- [97] M. Makki, *Wallacei X*, 2024. Adresse: <https://www.wallacei.com/> (aufgerufen am 19. 02. 2024).
- [98] E. M. Hamin und N. Gurrán, „Urban form and climate change: Balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia“, *Habitat International*, **33**, Nr. 3, S. 238–245, 2009, ISSN: 0197-3975. DOI: 10.1016/j.habitatint.2008.10.005.
- [99] S. Linke, T. Zölch, D. Bechtel, E.-M. Moseler, K. Rehfeldt und S. Feder, *Klimaanpassung in städtebaulich- / landschaftsplanerischen Wettbewerben: Eine Anleitung für alle Wettbewerbsbeteiligten*, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Hrsg., München, 2023. Adresse: <https://www.lss.lss.tum.de/lapl/forschung/gruene-stadt-der-zukunft/publikationen/> (aufgerufen am 30. 11. 2023).
- [100] M. Balouktsi, „Principles and Tools for Designing Strategies for Sustainable Urban Development: A “Process-based” and “Action-oriented” Approach at Neighbourhood Level“, Dissertation, Karlsruhe Institute Of Technology, 2018.
- [101] A. Sharifi, „Resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): A review“, *Sustainable Cities and Society*, **99**, Nr. 104910, 2023, ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104910.
- [102] J. Holzmann, „Hyper Space Exploration: Methodik zur multi-kriteriellen Trade-off-Analyse von Systemen im disruptiven Kontext am Beispiel Elektromobilität“, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2017.
- [103] M. Mühlbauer, F. Rang, H. Palm, O. Bohlen und M. A. Danzer, „Pareto-optimal power flow control in heterogeneous battery energy storage systems“, *Journal of Energy Storage*, **48**, Nr. 103803, 2022, ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2021.103803.

- [104] A. Stadler, D. Mutzhas, J. Vollmar und H. Palm, „Prozess und Werkzeugkette zur multikriteriell optimierten Auslegung kommunaler Energiesysteme“, *17. Symposium Energieinnovation Graz*, S. 1–10, 2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.24208.69122.
- [105] H. Palm, F. Rang, F. Mueller und M. Guerster, „Multiobjective Design Optimization of Hybrid Electric Rail Vehicle Powertrains“, *2021 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, S. 1–6, 2021. DOI: 10.1109/ISSE51541.2021.9582501.
- [106] R. B. Fuller, *Synergetics: Explorations in the geometry of thinking*. London: MacMillan Publishing Company, 1976, ISBN: 0020653204.
- [107] P. A. Corning, *Synergy and the System Sciences*, 2015. Adresse: https://projects.iss.org/doku.php?id=synergy_and_the_system_sciences (aufgerufen am 15. 02. 2022).
- [108] S. Goubran, „On the Role of Construction in Achieving the SDGs“, *Journal of Sustainability Research*, **1**, Nr. 2, 2019. DOI: 10.20900/jsr20190020.
- [109] R. J. Tallarida, „The interaction index: a measure of drug synergism“, *Pain*, **98**, Nr. 1, S. 163–168, 2002, ISSN: 0304-3959. DOI: 10.1016/S0304-3959(02)00041-6.
- [110] M. Cortina-Borja, A. D. Smith, O. Combarros und D. J. Lehmann, „The synergy factor: a statistic to measure interactions in complex diseases“, *BMC research notes*, **2**, Nr. 105, 2009. DOI: 10.1186/1756-0500-2-105.
- [111] G. Beneke, W. Schurink und G. Roodt, „Towards a substantive theory of synergy“, *SA Journal of Human Resource Management*, **5**, Nr. 2, S. 9–19, 2007. DOI: 10.4102/sajhrm.v5i2.115.
- [112] V. Griffith und C. Koch, „Quantifying Synergistic Mutual Information“, in *Guided Self-Organization: Inception*, M. Prokopenko, Hrsg., Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 159–190, ISBN: 978364253-7349. DOI: 10.1007/978-3-642-53734-9_6.
- [113] B. K. Alshebli, T. P. Michalak, O. Skibski, M. Wooldridge und T. Rahwan, „A Measure of Added Value in Groups“, *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, **13**, Nr. 4, S. 1–46, 2019. DOI: 10.1145/3335547.
- [114] D. Rehak, J. Markuci, M. Hromada und K. Barcova, „Quantitative evaluation of the synergistic effects of failures in a critical infrastructure system“, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, **14**, S. 3–17, 2016, ISSN: 1874-5482. DOI: 10.1016/j.ijcip.2016.06.002.
- [115] Y. Fan und C. Fang, „Research on the synergy of urban system operation-Based on the perspective of urban metabolism“, *The Science of the total environment*, **662**, S. 446–454, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.252.
- [116] C. Du Plessis, „Towards a regenerative paradigm for the built environment“, *Building Research & Information*, **40**, Nr. 1, S. 7–22, 2012, ISSN: 0961-3218. DOI: 10.1080/09613218.2012.628548.
- [117] F. Fuso Nerini et al. „Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals“, *Nature Energy*, **3**, S. 10–15, 2018. DOI: 10.1038/s41560-017-0036-5.
- [118] E. Meijers, „Polycentric Urban Regions and the Quest for Synergy: Is a Network of Cities More than the Sum of the Parts?“, *Urban Studies*, **42**, Nr. 4, S. 765–781, 2005, ISSN: 0042-0980. DOI: 10.1080/00420980500060384.

- [119] W. Yin, „Integrating Sustainable Development Goals into the Belt and Road Initiative: Would It Be a New Model for Green and Sustainable Investment?“, *Sustainability*, **11**, Nr. 24, S. 6991, 2019. DOI: 10.3390/su11246991.
- [120] P. A. Corning, „The Synergism Hypothesis: On the Concept of Synergy and its Role in the Evolution of Complex Systems“, *Journal of Social and Evolutionary Systems*, Nr. 21, S. 133–172, 2000.
- [121] B. Mainali, J. Luukkanen, S. Silveira und J. Kaivo-oja, „Evaluating Synergies and Trade-Offs among Sustainable Development Goals (SDGs): Explorative Analyses of Development Paths in South Asia and Sub-Saharan Africa“, *Sustainability*, **10**, Nr. 3, S. 815, 2018. DOI: 10.3390/su10030815.
- [122] P. M. Berry et al. „Cross-sectoral interactions of adaptation and mitigation measures“, *Climatic Change*, **128**, S. 381–393, 2015, ISSN: 0165-0009. DOI: 10.1007/s10584-014-1214-0.
- [123] J. Luukkanen et al. „Synergies or Trade-offs? A New Method to Quantify Synergy Between Different Dimensions of Sustainability“, *Environmental Policy and Governance*, **22**, Nr. 5, S. 337–349, 2012, ISSN: 1756-932X. DOI: 10.1002/eet.1598.
- [124] A. T. Almeida und M. D. Duarte, „A multi-criteria decision model for selecting project portfolio with consideration being given to a new concept for Synergies“, *Pesquisa Operacional*, **2**, Nr. 31, S. 301–318, 2011. DOI: 10.1590/S0101-74382011000200006.
- [125] X. Xu, J. E. Taylor und A. L. Pisello, „Network synergy effect: Establishing a synergy between building network and peer network energy conservation effects“, *Energy and Buildings*, **68**, S. 312–320, 2014, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.017.
- [126] R. J. T. Klein et al. „Inter-relationships between adaptation and mitigation: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, in *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Hrsg., Cambridge University Press, 2007, S. 745–777.
- [127] J. Jiao, Y. Huang, C. Liao und D. Zhao, „Sustainable development path research on urban transportation based on synergistic and cost-effective analysis: A case of Guangzhou“, *Sustainable Cities and Society*, **71**, Nr. 102950, 2021, ISSN: 2210-6707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102950>.
- [128] C. A. Bana e Costa und R. C. Oliveira, „Assigning priorities for maintenance, repair and refurbishment in managing a municipal housing stock“, *European Journal of Operational Research*, **138**, Nr. 2, S. 380–391, 2002. DOI: 10.1016/S0377-2217(01)00253-3.
- [129] D. Österreicher, „A Methodology for Integrated Refurbishment Actions in School Buildings“, *Buildings*, **8**, S. 1–17, 2018. DOI: 10.3390/buildings8030042.
- [130] D. Haase, N. Schwarz, M. Strohbach, F. Kroll und R. Seppelt, „Synergies, Trade-offs, and Losses of Ecosystem Services in Urban Regions: an Integrated Multiscale Framework Applied to the Leipzig-Halle Region, Germany“, *Ecology and Society*, **17**, Nr. 3, 2012, ISSN: 1708-3087. DOI: 10.5751/ES-04853-170322.

- [131] M. Pedercini, S. Arquitt, D. Collste und H. Herren, „Harvesting synergy from sustainable development goal interactions“, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116**, Nr. 46, S. 23 021–23 028, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1817276116.
- [132] J. E. Anderson, „Expanding the use of life-cycle assessment to capture induced impacts in the built environment“, Dissertation, Technische Universität München, 2014.
- [133] V. Z. Gjorgievski, E. Mihajloska, A. Abazi und N. Markovska, „Sustainable Development Goals–Climate Action Nexus:Quantification of Synergies and Trade-offs“, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, ISSN: 1618-954X. DOI: 10.1007/s10098-021-02124-w.
- [134] R. Reitberger, N. Palm, H. Palm und W. Lang, „Urban systems exploration: A generic process for multi-objective urban planning to support decision making in early design phases“, *Building and Environment*, **254**, Nr. 111360, 2024, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111360.
- [135] Robert McNeel & Associates, *Rhinoceros 3D*, 2023. Adresse: <https://www.rhino3d.com/de/> (aufgerufen am 07. 08. 2023).
- [136] J. Huang, Z. Chen und N. Dupin, „Comparing Local Search Initialization for K-Means and K-Medoids Clustering in a Planar Pareto Front, a Computational Study“, *Communications in Computer and Information Science*, **1443**, S. 14–28, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-85672-4_2.
- [137] C. E. Rasmussen, C. K. Williams et al. *Gaussian processes for machine learning*. MIT Press, 2006, ISBN: 9780262256834. DOI: 10.7551/mitpress/3206.001.0001.
- [138] Meteotest AG, *Meteonorm*, Bern, Schweiz, 2023. Adresse: <https://meteonorm.com/> (aufgerufen am 07. 08. 2023).
- [139] K. Błażejczyk et al. „An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI)“, *Geographia Polonica*, **86**, Nr. 1, S. 5–10, 2013, ISSN: 0016-7282. DOI: 10.7163/GPol.2013.1.
- [140] US Department of Energy, *EnergyPlus*, Washington, 2023. Adresse: <https://energyplus.net/> (aufgerufen am 07. 08. 2023).
- [141] M. S. Roudsari und M. Pak, „Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design“, *Proceedings of the 13th International IBPSA Conference Held in Lyon, France*, S. 3128–3135, 2013.
- [142] B. Bueno, L. Norford, J. Hidalgo und G. Pigeon, „The urban weather generator“, *Journal of Building Performance Simulation*, **6**, Nr. 4, S. 269–281, 2013, ISSN: 1940-1493. DOI: 10.1080/19401493.2012.718797.
- [143] Solemma, *ClimateStudio*, 2023. Adresse: <https://www.solemma.com/climatestudio> (aufgerufen am 06. 04. 2023).
- [144] C. Waibel, L. Bystricka, A. Kubilay, R. Evins und J. Carmeliet, „Validation of Grasshopper-based Fast Fluid Dynamics for Air Flow around Buildings in Early Design Stage“, *Proceedings of the 15th IBPSA Conference (San Francisco)*, **15**, S. 2147–2156, 2017. DOI: 10.26868/25222708.2017.582.
- [145] Thornton Tomasetti Inc, *TT Toolbox for Grasshopper | Colibri*, 2022. Adresse: <https://www.thorntontomasetti.com/> (aufgerufen am 07. 08. 2023).

- [146] W. Lang und S. Pauleit, *ZSK – Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt: Abschlussbericht*, 2017. Adresse: <https://www.zsk.tum.de/zsk/veroeffentlichungen/> (aufgerufen am 03.09.2021).
- [147] M. Röck, E. Baldereschi, E. Verellen, A. Passer, S. Sala und K. Allacker, „Environmental modelling of building stocks – An integrated review of life cycle-based assessment models to support EU policy making“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **151**, Nr. 111550, 2021, ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111550.
- [148] 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*, Darmstadt, 2005. Adresse: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/werkzeuge/2005_IWU_LogaEtAl_Kurzverfahren-Energieprofil.pdf (aufgerufen am 14.09.2021).
- [149] S. Klauß, W. Kirchhof und J. Gissel, *Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten*, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Hrsg., Kassel, 2009. Adresse: <https://www.zub-systems.de/sites/default/files/downloads/Deutschlandkarte-2009-10.pdf> (aufgerufen am 18.07.2021).
- [150] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - Typology approach for building stock energy assessment, EPISCOPE - Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks*, Darmstadt, 2015. Adresse: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf (aufgerufen am 10.09.2021).
- [151] B. Zeno et al. *Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten*. Darmstadt: Passiv Haus Institut, 2009. Adresse: https://passiv.de/downloads/05_altbauhandbuch.pdf (aufgerufen am 10.09.2021).
- [152] BBSR, *Bauteileditor - eLCA*, 2022. Adresse: <https://www.bauteileditor.de/> (aufgerufen am 08.08.2023).
- [153] G. Schiller et al. *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft*, Umweltbundesamt, Hrsg., Dresden, 2015. Adresse: <https://ioer-isbe.de/ressourcen/aus-welchen-materialien-bestehen-unsere-gebaeude> (aufgerufen am 18.07.2022).
- [154] R. Reitberger, C. Schade, F. Banihashemi und W. Lang, „A Life Cycle Perspective on Vertical Densification: Embodied Impact Assessment of Vertical Building Extensions“, *Passive Low Energy Architecture (PLEA)*, Nr. 2, S. 708–713, 2022.
- [155] M. A. Heinrich, „Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau - Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham“, Dissertation, Technische Universität München, 2019.

- [156] M. M. Singh und P. Geyer, „Information requirements for multi-level-of-development BIM using sensitivity analysis for energy performance“, *Advanced Engineering Informatics*, **43**, Nr. 101026, 2020, ISSN: 1474-0346. DOI: 10.1016/j.aei.2019.101026.
- [157] Passivhaus Institut, *Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit- und PHI-Energiesparhaus-Standard: Version 10b*, Passivhaus Institut, Hrsg., Darmstadt, 2022. Adresse: https://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_gebaeude_de.pdf (aufgerufen am 06. 10. 2022).
- [158] U. Bogenstätter, *Flächen- und Raumkennzahlen*, 2007. Adresse: www.ifbor.eu (aufgerufen am 07. 08. 2023).
- [159] H. Harter, „Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle“, Dissertation, Technische Universität München, 2021.
- [160] K. Bettgenhäuser, T. Boermans, M. Offermann, A. Krechting und D. Becker, *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung: Climate Change 10/2011*, Umweltbundesamt, Hrsg., Dessau-Roßlau, 2011. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3979.pdf> (aufgerufen am 05. 09. 2022).
- [161] Deutsche Energie-Agentur, *Dena Gebäudereport 2022: Zahlen, Daten, Fakten*, Deutsche Energie-Agentur, Hrsg., Berlin, 2022. Adresse: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Gebaeudereport_2022.pdf (aufgerufen am 05. 09. 2022).
- [162] F. Banihashemi, R. Reitberger und W. Lang, „Investigating Urban Heat Island and Vegetation Effects Under the Influence of Climate Change in Early Design Stages: For Performance-Based Early Urban Design Decisions“, *Proceedings of the 27th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRRIA) 2022*, **2**, S. 679–688, 2022. DOI: 10.52842/conf.caadria.2022.2.679.
- [163] Y. Ibrahim, T. Kershaw, P. Shepherd und D. Coley, „On the Optimisation of Urban form Design, Energy Consumption and Outdoor Thermal Comfort Using a Parametric Workflow in a Hot Arid Zone“, *Energies*, **14**, Nr. 13, S. 4026, 2021, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14134026.
- [164] H. Harter, M. M. Singh, P. Schneider-Marin, W. Lang und P. Geyer, „Uncertainty Analysis of Life Cycle Energy Assessment in Early Stages of Design“, *Energy and Buildings*, **208**, Nr. 109635, 2020, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109635.
- [165] T. L. Hemsath und K. Alagheband Bandhosseini, „Sensitivity analysis evaluating basic building geometry’s effect on energy use“, *Renewable Energy*, **76**, S. 526–538, 2015, ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2014.11.044.
- [166] S. Erlwein und S. Pauleit, „Trade-Offs between Urban Green Space and Densification: Balancing Outdoor Thermal Comfort, Mobility, and Housing Demand“, *Urban Planning and Green Infrastructure*, **6**, Nr. 1, 2021. DOI: 10.17645/up.v6i1.3481.
- [167] M. Fath et al. „Leitlinie zur Vereinfachung der Planung und Durchführung von Aufstockungs- / Erweiterungsmaßnahmen als Nachverdichtungsmaßnahme in innerstädtischen Bereichen, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Hrsg., Braunschweig, 2019.

- [168] F. Banihashemi et al. *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels - Schlussbericht*, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Hrsg., München, 2022. DOI: 10.14459/2023md1703685.
- [169] R. Reitberger, F. Banihashemi und W. Lang, „Sensitivity and Uncertainty Analysis of Combined Building Energy Simulation and Life Cycle Assessment: Implications for the Early Urban Design Process“, *Proceedings of the 27th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, Nr. 2, S. 629–638, 2022. DOI: 10.52842/conf.caadria.2022.2.629.
- [170] M. Weißberger, „Lebenszyklusorientierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik“, Dissertation, Technische Universität München, 2016. DOI: 10.14459/2016md1325463.
- [171] W. Chan, I. Joh und M. Sherman, *Analysis of Air Leakage Measurements from Residential Diagnostics Database*, 2012. DOI: 10.2172/1163524.
- [172] Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, *Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 37: Gebäudeenergiegesetz: GEG*. 2020.
- [173] A. Hafner und M. Storck, „Life Cycle Analysis of Vertical Building Extensions – Environmental Impacts of Different Material Selection“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **290**, Nr. 012046, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/290/1/012046.
- [174] S. R. Hassan, N. A. Megahed, O. M. Abo Eleinen und A. M. Hassan, „Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support“, *Energy and Buildings*, **267**, Nr. 112144, 2022, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112144.
- [175] D. Sailor, „A green roof model for building energy simulation programs“, *Energy and Buildings*, **40**, Nr. 8, S. 1466–1478, 2008, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>.
- [176] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN V 18599-10:2018 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag, 2018. DOI: 10.31030/2874436.
- [177] F. Salata, S. Falasca, V. Ciancio, G. Curci, S. Grifgnaffini und P. de Wilde, „Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study“, *Sustainable Cities and Society*, **76**, Nr. 103518, 2021, ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103518.
- [178] P. Santosh, *Eppy*, 2022. Adresse: <https://github.com/santoshphilip/eppy> (aufgerufen am 08.08.2023).
- [179] F. N. Rasmussen et al. „Existing benchmark systems for assessing global warming potential of buildings – Analysis of IEA EBC Annex 72 cases“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1078**, Nr. 012054, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012054.

- [180] DGNB, *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – Kriterienkatalog Gebäude Neubau: ENV1.1 / Ökobilanz eines Gebäudes*, Stuttgart, 2018. Adresse: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/02_ENV1.1_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf (aufgerufen am 10.09.2021).
- [181] Bundesinstitut für Bau, Stadt und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), *Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Hrsg., 2019. Adresse: <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/publikationen/bauen/leitfaden-nachhaltiges-bauen.html> (aufgerufen am 10.09.2021).
- [182] 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: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, S. 394–416, 2014, ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
- [183] R. S. McLeod, C. J. Hopfe und A. Kwan, „An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings“, *Building and Environment*, **70**, S. 189–209, 2013, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.024.
- [184] Bayerisches Staatsministerium für Finanzen und für Heimat, *Bayern Atlas*, 2023. Adresse: <https://atlas.bayern.de> (aufgerufen am 21.10.2022).
- [185] X. Oregi, P. Hernandez und R. Hernandez, „Analysis of life-cycle boundaries for environmental and economic assessment of building energy refurbishment projects“, *Energy and Buildings*, **136**, S. 12–25, 2017, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.057.
- [186] P. J. Littlefair, *Site layout planning for daylight and sunlight: A guide to good practice*. Bracknell: BRE, 2011, ISBN: 9781848061781.
- [187] Bundesnetzagentur, *Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045*, Bonn, 2022. Adresse: https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2037/SR/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf?__blob=publicationFile (aufgerufen am 06.04.2023).
- [188] National Renewable Energy Laboratory, *Best Research-Cell Efficiency Chart*, 2023. Adresse: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (aufgerufen am 10.05.2023).
- [189] C. Kalisch, *Untersuchung von Stadtgrün - Eine ökologische Lebenszyklusanalyse von Dach- und Außenraumbegrünung*, Bachelorarbeit, 2021.
- [190] P. Schönfeld, *Die Winterlinde und ihre Sorten als Stadtbaum*, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: LWF-Wissen 78, Hrsg., München, 2016. Adresse: https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/w78_winterlinde_stadtbaum.pdf (aufgerufen am 28.02.2024).
- [191] D. J. Nowak, J. Stevens, S. Sisinni und C. Luley, „Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide“, *Journal of Arboriculture*, **3**, Nr. 28, S. 113–122, 2002. DOI: 10.48044/jauf.2002.017.

- [192] T. Rötzer, M. A. Rahman, A. Moser-Reischl, S. Pauleit und H. Pretzsch, „Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions“, *The Science of the total environment*, **676**, S. 651–664, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.235.
- [193] International Organization for Standardization, *ISO 15686-5: Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 5: Life-cycle costing*, 2017.
- [194] f:data, *Baupreislexikon*, Weimar, 2022. Adresse: <https://www.baupreislexikon.de/> (aufgerufen am 01.07.2022).
- [195] *BKI Baupreise kompakt 2023 Altbau: Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexen* (BKI Kostenplanung). Stuttgart: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 2022, ISBN: 9783948683382.
- [196] BBSR, *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg., 2017. Adresse: <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/> (aufgerufen am 13.04.2023).
- [197] Statistisches Bundesamt, *Pressemitteilung Nr. 388 vom 29. September 2023: Gas- und Strompreise für Haushalte im 1. Halbjahr 2023 deutlich gestiegen*, 2023. Adresse: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/09/PD23_388_61243.html (aufgerufen am 16.10.2023).
- [198] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Erneuerbare Energien Gesetz: EEG*, 2023. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/ (aufgerufen am 16.10.2023).
- [199] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude: Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus*, 2021. Adresse: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/buerogebaeude/> (aufgerufen am 16.10.2023).
- [200] Co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, *Durchschnittlicher Wasserverbrauch & Kosten im Haushalt*, 2024. Adresse: <https://www.co2online.de/energie-sparen/wasser-sparen/wasserverbrauch/durchschnittlicher-wasserverbrauch/> (aufgerufen am 28.01.2024).
- [201] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 1946-6:2019-12 Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag, 2019. DOI: 10.31030/3113944.
- [202] D. J. Sailor, M. Georgescu, J. M. Milne und M. A. Hart, „Development of a national anthropogenic heating database with an extrapolation for international cities“, *Atmospheric Environment*, **118**, S. 7–18, 2015, ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.07.016.
- [203] P. Balakrishnan und J. A. Jakubiec, „Trees in Daylight Simulation – Measuring and Modelling Realistic Light Transmittance through Trees“, *LEUKOS*, S. 1–28, 2022, ISSN: 1550-2724. DOI: 10.1080/15502724.2022.2112217.

- [204] R. Reitberger, K. Theilig, M. Vollmer, I. Takser und W. Lang, „Connecting building density and vegetation to investigate synergies and trade-offs between thermal comfort and energy demand – a parametric study in the temperate climate of Germany“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1196**, Nr. 012034, 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1196/1/012034.
- [205] J. Mao und L. K. Norford, „Urban Weather Generator: Physics-Based Microclimate Simulation for Performance-Oriented Urban Planning“, in *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, Ser. Springer eBook Collection, M. Palme und A. Salvati, Hrsg., Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2021, S. 241–263, ISBN: 9783030654207. DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4_12.
- [206] K. Bezha, „Scaling of Urban Heat Island Simulation: Validation of the Urban Weather Generator for varying boundaries“, Masterarbeit, Technische Universität München, München, 2024. Adresse: <https://mediatum.ub.tum.de/1740192> (aufgerufen am 16. 04. 2024).
- [207] I. Farias, R. Keller, E. Rathjen, F. Remter und M. Riese, *100 Places M: Untersuchung der Auswirkungen des Untersuchung der Auswirkungen des Wärmeinseleffektes auf den öffentlichen Raum am Beispiel Münchens*, Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung, Hrsg. 2020. Adresse: <https://www.zsk.tum.de/zsk/veroeffentlichungen/> (aufgerufen am 12. 12. 2023).
- [208] P. Bröde et al. „Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)“, *International journal of biometeorology*, **56**, Nr. 3, S. 481–494, 2012. DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1.
- [209] P. Bröde, C. Di Napoli, L. A. Rosa, E. G. da Cunha und E. L. Krüger, „Sensitivity of UTCI Thermal Comfort Prediction to Personal and Situational Factors – Residual Analysis of Pedestrian Survey Data“, in *Applications of the Universal Thermal Climate Index UTCI in Biometeorology*, Ser. Springer eBook Collection, E. L. Krüger, Hrsg., Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2021, S. 67–80, ISBN: 9783030767167. DOI: 10.1007/978-3-030-76716-7_4.
- [210] S. Liu, Y. T. Kwok und C. Ren, „Investigating the impact of urban microclimate on building thermal performance: A case study of dense urban areas in Hong Kong“, *Sustainable Cities and Society*, **94**, Nr. 104509, 2023, ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104509.
- [211] Sachverständigenrat für Umweltfragen, *Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa: Umweltgutachten 2020*. Berlin: Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU), 2020, ISBN: 9783947370160.
- [212] J. Geletič et al. „High-fidelity simulation of the effects of street trees, green roofs and green walls on the distribution of thermal exposure in Prague-Dejvice“, *Building and Environment*, **223**, Nr. 109484, 2022, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109484.
- [213] T. Susca, „Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate“, *Building and Environment*, **162**, Nr. 106273, 2019, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106273.
- [214] D. Navarro-Mateu, M. Makki und A. Cocho-Bermejo, „Urban-Tissue Optimization through Evolutionary Computation“, *Mathematics*, **6**, Nr. 10, S. 189, 2018. DOI: 10.3390/math6100189.

- [215] N. Palm und H. Palm, „Multi-Objective Optimization Algorithm Classification by Composing Black Box with Pareto-Reflecting Functions“, *Preprint on SSRN*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4668407.
- [216] N. Palm, *Paref: Pareto reflection based multi-objective optimization*, 2023. Adresse: <https://pypi.org/project/paref/> (aufgerufen am 12.09.2023).
- [217] M. D. McKay, R. J. Beckman und W. J. Conover, „A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code“, *Technometrics*, **21**, Nr. 2, S. 239–245, 1979, ISSN: 0040-1706. DOI: 10.2307/1268522.
- [218] J. Herman und W. Usher, „SALib: An open-source Python library for Sensitivity Analysis“, *The Journal of Open Source Software*, **2**, Nr. 9, 2017. DOI: 10.21105/joss.00097.
- [219] C. Prieur und S. Tarantola, *Variance-based sensitivity analysis: Theory and estimation algorithms*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 1217–1239, ISBN: 9783319123851. DOI: 10.1007/978-3-319-12385-1_35.
- [220] A. Saltelli et al. *Global sensitivity analysis: The primer*. Chichester, England und Hoboken, NJ: John Wiley, 2008, ISBN: 0470725176. DOI: 10.1002/9780470725184.
- [221] R. Storn und K. Price, „A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces“, *Journal of Global Optimization*, **11**, Nr. 4, S. 341–359, 1997, ISSN: 0925-5001. DOI: 10.1023/A:1008202821328.
- [222] P. Virtanen et al. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“, *Nature Methods*, **17**, S. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [223] A. Stephan und L. Stephan, „Towards zero life cycle GHG emissions apartment buildings in Lebanon“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **588**, Nr. 022055, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/588/2/022055.
- [224] D. D’Agostino, F. Minelli und F. Minichiello, „New genetic algorithm-based workflow for multi-objective optimization of Net Zero Energy Buildings integrating robustness assessment“, *Energy and Buildings*, **284**, Nr. 112841, 2023, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.112841.
- [225] A. Passer, C. Ouellet-Plamondon, P. Kenneally, V. John und G. Habert, „The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings“, *Energy and Buildings*, **124**, S. 153–163, 2016, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.008.
- [226] DGNB, *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – Kriterienkatalog Gebäude Sanierung: ECO1.1 / Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus*, Stuttgart, 2021. Adresse: https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads_unprotected/dokumente/kriterien/dgnb-kriterium-eco1-1-gebaeude-sanierung-version-2021.pdf (aufgerufen am 02.04.2024).
- [227] L. La Fleur, P. Rohdin und B. Moshfegh, „Energy Renovation versus Demolition and Construction of a New Building – A Comparative Analysis of a Swedish Multi-Family Building“, *Energies*, **12**, Nr. 11, S. 2218, 2019. DOI: 10.3390/en12112218.
- [228] C. Zong, M. Margesin, J. Staudt, F. Deghim und W. Lang, „Decision-making under uncertainty in the early phase of building façade design based on multi-objective stochastic optimization“, *Building and Environment*, **226**, Nr. 109729, 2022, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109729.

- [229] S. Lloyd, „Least squares quantization in PCM“, *IEEE Transactions on Information Theory*, **28**, Nr. 2, S. 129–137, 1982, ISSN: 1557-9654. DOI: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- [230] R. Tibshirani, G. Walther und T. Hastie, „Estimating the Number of Clusters in a Data Set Via the Gap Statistic“, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, **63**, Nr. 2, S. 411–423, 2002, ISSN: 1369-7412. DOI: 10.1111/1467-9868.00293.
- [231] Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz, *GALK-Straßenbaumliste: Arbeitskreis Stadtbäume*, Bonn, 2024. Adresse: <https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste> (aufgerufen am 22. 02. 2024).
- [232] Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz, *GALK-Straßenbaumliste: Arbeitskreis Stadtbäume, Detailblatt zu Acer campestre Elsrijk*, Bonn, 2024. Adresse: <https://strassenbaumliste.galk.de/detail.php?id=2> (aufgerufen am 22. 02. 2024).
- [233] A. Bazen, F. K. Barg und J. Takeshita, „Research Techniques Made Simple: An Introduction to Qualitative Research“, *Journal of Investigative Dermatology*, **141**, Nr. 2, S. 241–247, 2021, ISSN: 0022-202X. DOI: 10.1016/j.jid.2020.11.029.
- [234] P. Mayring, *Qualitative content analysis: Theoretical foundation, basic procedures and software solution*. Klagenfurt, 2014. Adresse: <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/39517> (aufgerufen am 18. 08. 2023).
- [235] VERBI – Software Consult Sozialforschung GmbH, *MAXQDA*, 2020. Adresse: <https://www.maxqda.com/de/> (aufgerufen am 18. 08. 2023).
- [236] U. Froschauer und M. Lueger, *Das qualitative Interview*. Stuttgart, Deutschland: utb GmbH, 2020, ISBN: 9783838552804. DOI: 10.36198/9783838552804.
- [237] *Im Rahmen dieser Dissertation geführte Expert:inneninterviews zur Nutzbarkeit des Quartiersteckbriefs*. Durchführung und Auswertung der Expert:inneninterviews: Roland Reitberger, Durchführung der Expert:inneninterviews am 18.07.2023 (Referat für Stadtplanung und Umwelt, Stadt Freising), 26.07.2023 (Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Landeshauptstadt München) und 17.08.2023 (Referat für Klima und Umweltschutz, Landeshauptstadt München), 2023.
- [238] S. Pauleit et al. *Results Brochure of the Research Training Group Urban Green Infrastructure – Training Next Generation Professionals for Integrated Urban Planning Research*, 2024. DOI: 10.14459/2024md1742953.
- [239] L. Merkens et al. „Connectivity at home: A data-driven connectivity modeling framework for home range movements in heterogeneous landscapes (preprint)“, *bioRxiv*, 2023. DOI: 10.1101/2023.12.22.571399.
- [240] Alphabet Inc., *Google Maps*, 2024. Adresse: <http://maps.google.de/> (aufgerufen am 15. 02. 2024).
- [241] M. Jakob, „The Trade-offs and Synergies between Energy Efficiency, Costs and Comfort in office buildings“, *CISBAT 2007 Proceedings, Lausanne, Switzerland*, S. 1–6, 2007.
- [242] M. Zorn, N. Catunda, L. Claus, N. Kobylinska, M. Frey und T. Wortmann, „Replacing energy simulations with surrogate models for design space exploration“, *Bauphysik*, **44**, Nr. 6, S. 311–316, 2022, ISSN: 0171-5445. DOI: 10.1002/bapi.202200034.

- [243] A.-T. Nguyen und S. Reiter, „A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models“, *Building Simulation*, **8**, Nr. 6, S. 651–664, 2015, ISSN: 1996-3599. DOI: 10.1007/s12273-015-0245-4.
- [244] A. Saltelli et al. „Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices“, *Environmental Modelling & Software*, **114**, S. 29–39, 2019, ISSN: 1364-8152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.01.012.
- [245] E. Laloy und D. Jacques, „Emulation of CPU-demanding reactive transport models: a comparison of Gaussian processes, polynomial chaos expansion, and deep neural networks“, *Computational Geosciences*, **23**, Nr. 5, S. 1193–1215, 2019, ISSN: 1420-0597. DOI: 10.1007/s10596-019-09875-y.
- [246] J. Basbagill, F. Flager, M. Lepech und M. Fischer, „Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts“, *Building and Environment*, **60**, S. 81–92, 2013, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.11.009.
- [247] E. Meex, A. Hollberg, E. Knapen, L. Hildebrand und G. Verbeeck, „Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design“, *Building and Environment*, **133**, S. 228–236, 2018, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.016.
- [248] T. Fink, M. Vuckovic und A. Petkova, „KPI - driven Parametric Design of Urban Systems“, *Proceedings of the 27th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2022*, S. 579–588, 2021. DOI: 10.52842/conf.caadria.2021.2.579.
- [249] M. Czaja, A. Kołton und P. Muras, „The Complex Issue of Urban Trees – Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities“, *Forests*, **11**, Nr. 932, 2020. DOI: 10.3390/f11090932.
- [250] D. Landuyt, S. Broekx und P. L. Goethals, „Bayesian belief networks to analyse trade-offs among ecosystem services at the regional scale“, *Ecological Indicators*, **71**, S. 327–335, 2016, ISSN: 1470-160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.07.015.
- [251] N. Schwarz, F. Hoffmann, S. Knapp und M. Strauch, „Synergies or Trade-Offs? Optimizing a Virtual Urban Region to Foster Plant Species Richness, Climate Regulation, and Compactness Under Varying Landscape Composition“, *Frontiers in Environmental Science*, **8**, 2020. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00016.
- [252] J. D. Karimi, R. Corstanje und J. A. Harris, „Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: trade-offs and synergies in urban landscapes“, *Landscape Ecology*, **36**, S. 1817–1835, 2021, ISSN: 0921-2973. DOI: 10.1007/s10980-021-01252-4.
- [253] A. Muroi, I. Gaetani, P.-J. Hoes und J. L. M. Hensen, „Occupant behavior in identical residential buildings: A case study for occupancy profiles extraction and application to building performance simulation“, *Building Simulation*, **12**, Nr. 6, S. 1047–1061, 2019, ISSN: 1996-3599. DOI: 10.1007/s12273-019-0573-x.
- [254] R. Calandra, J. Peters und M. P. Deisenroth, „Pareto Front Modeling for Sensitivity Analysis in Multi-Objective Bayesian Optimization“, 2014. Adresse: <https://bayesopt.github.io/past/2014.html> (aufgerufen am 01. 09. 2023).

- [255] N. V. S. K. Manapragada und J. Natanian, „Parametric Integration of CFD-based Wind Pressure Coefficients into Building Energy Models: A Novel Workflow“, *Journal of Physics: Conference Series*, **2600**, Nr. 032011, 2023, ISSN: 1742-6588. DOI: 10.1088/1742-6596/2600/3/032011.
- [256] G. Xu, J. Li, Y. Shi, X. Feng und Y. Zhang, „Improvements, extensions, and validation of the Urban Weather Generator (UWG) for performance-oriented neighborhood planning“, *Urban Climate*, **45**, Nr. 101247, 2022, ISSN: 2212-0955. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101247.
- [257] S. Jenkin und M. Pedersen, *Rethinking our built environment*. Ministry for the Environment | New Zealand, 2009, ISBN: 9780478331455.
- [258] Z. J. Grabowski, T. McPhearson, A. M. Matsler, P. Groffman und S. T. A. Pickett, „What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning“, *Frontiers in Ecology and the Environment*, **20**, Nr. 3, S. 152–160, 2022, ISSN: 1540-9295. DOI: 10.1002/fee.2445.
- [259] K. Gruhler, R. Böhm, C. Deilmann und G. Schiller, *Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe - Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen*, Leibniz - Insitut für ökologische Raumentwicklung e.V.: IÖR-Schriften Band 38, Hrsg., Dresden, 2002. Adresse: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-396855> (aufgerufen am 08. 10. 2021).
- [260] F. Urbansky, „Photovoltaik-Fassaden auch für Mieterstrommodelle geeignet“, 2018. Adresse: <https://www.springerprofessional.de/photovoltaik/sanierung/photovoltaik-fassaden-auch-fuer-mieterstrommodelle-geeignet/15412848> (aufgerufen am 17. 10. 2023).
- [261] J. Figgner et al. *Speichermonitoring BW 2.0: Abschlussbericht*, 2023. Adresse: <https://pd.lubw.de/10501> (aufgerufen am 18. 10. 2023).
- [262] S. Saha, J. Kandarr und O. Jorzik, *Stadtbäume im Stress. Interview [Teil 1]*. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2019, Bd. 6. DOI: 10.2312/ESKP.019.
- [263] H. Eschenbruch, *Daten für die Erstellung und Unterhaltung von Grünanlagen überarbeitet: Neue Kennzahlen*, Stadt+Grün, Hrsg. 2012, Bd. 9.
- [264] Gartenjournal.net, *Baum fällen: Kosten und wichtige Faktoren im Überblick*, 2023. Adresse: <https://www.gartenjournal.net/baum-faellen-kosten> (aufgerufen am 17. 10. 2023).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau dieser Dissertation und Beitrag der Kapitel zum Forschungsziel.	5
2.1	Beispielhafte Verortung von Quartierseingriffen im SETS Framework.	11
2.2	Anzahl der Publikationen zum Themenfeld Synergie auf <i>Web of Science</i>	18
2.3	Suchergebnisse zum Themenfeld Synergie je SDG auf <i>Web of Science</i>	18
2.4	Unterscheidung der Begriffe Synergie und Trade-off in unikriterielle und multikriterielle Betrachtungsebene.	23
3.1	Grundprozess zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung (<i>Urban Systems Exploration</i>).	29
3.2	Prozesskette zur multikriteriell optimierten Entscheidungsunterstützung in der Quartiersentwicklung (<i>Urban Systems Exploration</i>).	30
4.1	Methode zur Ermittlung der Synergiekennzahlen auf Gebäudeebene durch parametrische Energiesimulation und Ökobilanzierung.	37
4.2	Fensterflächenanteile bezogen auf die Außenwandfläche je Baualtersklasse.	39
4.3	Methode zur Ökobilanzierung der grauen THG-Emissionen von Gebäudeaufstockungen.	43
4.4	Validierung der simulierten Heizwärmebedarfswerte mit TABULA.	45
4.5	Ergebnisverteilung der unikriteriellen Synergie auf Gebäudeebene nach Baujahren.	47
4.6	Verteilung der hinsichtlich S_{uni} bei lebenszyklusbasierten THG-Emissionen positiv abschneidenden Ergebnisse nach Energiestandard und Energieträger.	48
4.7	Beste 50 Varianten der multikriteriellen Synergie für das Fallstudiengebäude.	49
4.8	Veränderungen der besten Gebäudevariante der multikriteriellen Synergiebewertung.	50
4.9	Gegenüberstellung von THG-Emissionen und potentielltem Kühlenergiebedarf auf Gebäudeebene.	51
4.10	Pearson Korrelationskoeffizient der multikriteriellen Synergie bezogen auf die betrachteten Eingangswerte der Gebäudeebene.	52
4.11	Fallstudiengebiet für die Quartiersuntersuchung in München.	54
4.12	Validierung der UWG Simulationen zur Bewertung des UHI Effekts.	60
4.13	Vereinfachte Darstellung der Informationsflüsse im vernetzten Quartiersmodell.	62
4.14	Verteilung der Ergebnisse für die unikriterielle Synergie der Zielaspekte auf Quartiersebene.	64
4.15	Positive Ergebnisse für S_{uni} bezogen auf den thermischen Innenraumkomfort.	65
4.16	Ergebnisse für multikriterielle Synergie auf Quartiersebene.	66
4.17	Ergebnisse für die beste Variante der multikriteriellen Synergie auf Quartiersebene.	67
4.18	Gegenüberstellung von THG-Emissionen und Lebenszykluskosten zur Bewertung multikriterieller Synergie auf Quartiersebene.	68
4.19	Pearson Korrelationskoeffizient zwischen normierter Summe aus multikriterieller Synergie auf Quartiersebene und den Planungsvariablen.	69

4.20	Werkzeugkette und Datenschnittstellen zur Umsetzung des multikriteriellen Optimierungsprozesses.	71
4.21	Angepasste „WeightedNormToUtopia“ Suchsequenz des <i>Paref</i> Pakets zur Identifikation gleichmäßig verteilter Pareto Punkte im dreidimensionalen Raum.	74
4.22	Eigenschaften der mittels multikriterieller Quartiersoptimierung ermittelten Punkte.	77
4.23	Qualität der Ersatzmodelle in Abhängigkeit der Trainingspunktezahl.	78
4.24	Pareto Front des Quartiersmodells über die drei Zieldimensionen.	79
4.25	Mittels der GPR Ersatzmodelle ermittelte relative Standardabweichungen entlang der PF.	81
4.26	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse nach Sobol für die Quartiersfallstudie.	82
4.27	Charakterisierung der Cluster der Quartiersfallstudie.	85
4.28	Streuung der Input Parameter von Cluster vier und zugehörige Mediane.	85
5.1	Aufbau und Fragestellungen der durchgeführten Expert:inneninterviews.	89
5.2	Im ersten Entwurf des Quartiersteckbriefs vorgeschlagene Violinplots mit Mittelwerten.	93
5.3	Im Zuge der Expert:inneninterviews als gut geeignete Darstellungsform identifizierte Wiedergabe von Minima, Maxima und Mittelwerten der Zielgrößen.	93
5.4	Sensitivität der drei Zielgrößen gegenüber den Planungsvariablen Baumanteil und PV Anteil der Ost-West Fassaden.	94
5.5	Beispielhafter Dichteplot der Verteilung Pareto-optimaler Lösungen.	95
5.6	Überblick zum Quartiersteckbrief für den Zeilenbau.	98
5.7	Luftaufnahmen der drei ausgewählten Fallstudiengebiete.	99
B.1	Relativer Vergleich der THG-Emissionen von Bestandsbauteilen (TABLUA – IÖR).	154
B.2	Absoluter Vergleich der THG-Emissionen von Bestandsbauteilen (TABLUA – IÖR).	154
B.3	Anzahl der Gebäudeblöcke je Typologie und Baualtersklasse.	155
B.4	Verteilung der untersuchten Quartierstypologien über das Münchner Stadtgebiet.	156

Tabellenverzeichnis

2.1	Verschiedene Interpretationen des Synergiebegriffs und ihre Verwendung in der Literatur.	20
4.1	Zielaspekte zur Untersuchung von Wechselwirkungen in der gebauten Umwelt.	36
4.2	Zum Aufbau der Simulationsmodelle eingesetzte Grasshopper Plug-Ins.	36
4.3	Im parametrischen Gebäudemodell einbezogene Ausgangskonfigurationen und Eingriffe.	42
4.4	Inputs für die parametrische Quartiersimulation zur Berechnung der Synergiekennzahlen.	55
4.5	Randbedingungen für das Simulationsmodell auf Quartiersebene.	57
4.6	Interaktionen zur Berücksichtigung im vernetzten Quartiersmodell.	61
4.7	Anteil der Szenarien mit einem positiven Ergebnis von S_{uni} je Betrachtungsebene.	65
4.8	Input Parameter und ihre Wertebereiche für die multikriterielle Optimierung des Quartiersmodells.	70
5.1	Zur Erstellung der Quartiersteckbriefe ausgewählte Quartierstypologien.	99
A.1	U-Werte der thermischen Hülle nach den Baualtersklassen der TABULA Wohngebäudetypologie.	149
A.2	U-Werte der thermischen Hülle nach Sanierungsstandards.	149
A.3	Zuordnung der Baualtersklassen nach der TABULA Wohngebäudetypologie zu den Gebäudesteckbriefen nach IÖR.	150
A.4	Für Dämmstoffe verwendete LCA-Datensätze basierend auf dem Projekt <i>Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels</i> [168].	150
A.5	Randbedingungen des Fallstudiengebiets für die Quartiersuntersuchung.	151
A.6	Ökobilanzwerte für Dachbegrünung nach [168].	151
A.7	Systemgrenzen der Fallstudie für die Lebenszykluskostenanalyse nach [193].	152
A.8	Herstellungskosten zur Berechnung der Lebenszykluskosten.	153

Formelverzeichnis

3.1	Berechnung der unikriteriellen Synergie.	26
3.2	Berechnung der multikriteriellen Synergie.	27
4.1	Regressionsgleichung zur Berechnung der THG-Emissionen einer Winterlinde.	56
4.2	Regressionsgleichung zur Korrektur des Kronendurchmessers anhand der Versiegelung.	59

Glossar

Baualtersklasse

Die Baualtersklasse bezieht sich auf die zeitliche Einstufung von Gebäuden basierend auf ihrem Baujahr und Bautypus nach dem TABULA Projekt [150]. Diese Einstufung reicht bis in das Jahr 2016 und orientiert sich an zeitgenössischen Bauweisen und jeweils gültigen Wärmeschutzverordnungen bzw. Energieeinsparverordnungen. Eine Zuordnung der Bezeichnungen, Baujahre und Dämmeigenschaften kann Tabelle A.1 im Anhang dieser Arbeit entnommen werden (sh. Seite 149).

Black-Box Funktion

Eine Black-Box Funktion bezeichnet ein Konzept in der Informatik und Mathematik, bei dem die innere Funktionsweise eines Systems oder einer Funktion nicht bekannt oder zugänglich ist. Es können lediglich die Eingaben und die entsprechenden Ausgaben beobachtet werden, ohne Einsicht in die internen Prozesse oder den Algorithmus, der die Transformation von Eingaben zu Ausgaben vornimmt. Black-Box Funktionen werden oft verwendet, um Systeme oder Modelle zu analysieren und zu optimieren, ohne die Notwendigkeit, ihre genaue Struktur zu kennen. Ein Beispiel für eine Black-Box Funktion sind die in dieser Dissertation aufgebauten komplexen Simulationsmodelle für Gebäude und Quartiere.

Expected Hypervolume Improvement

Das Hypervolumen ist ein Maß für den Raum, den die von einem Algorithmus gefundenen Pareto-optimalen Lösungen dominieren. Eine Vergrößerung des Hypervolumens deutet darauf hin, dass der Algorithmus eine bessere Verteilung von Pareto-optimalen Lösungen erreicht hat. Das Expected Hypervolume Improvement wird häufig im Zusammenhang mit der multikriteriellen Optimierung verwendet. Dabei quantifiziert es den erwarteten Anstieg im Hypervolumen, wenn eine neue Lösung zur Pareto Front hinzugefügt wird. Dadurch kann die Leistung von Optimierungsalgorithmen verglichen werden.

Full Factorial Design

Full Factorial Design ist eine experimentelle Methode, bei der alle möglichen Kombinationen der Eingangsvariablen in einem Experiment betrachtet werden. Dies ermöglicht eine umfassende Analyse der Auswirkungen von Variablen auf die Ergebnisse, erfordert aber eine Begrenzung der einbezogenen Inputs und erlaubten Wertebereiche, um die notwendige Rechenleistung handhabbar zu halten.

Gap Statistik

Die Gap Statistik wird häufig in Zusammenhang mit dem K-Means Clusteringverfahren angewandt. Sie vergleicht die Summe der quadrierten Abstände von Datenpunkten zu ihren jeweiligen Clusterzentren mit einer Referenzverteilung, die durch eine Zufallsgenerierung von Datenpunkten erstellt wird. Durch diesen Vergleich versucht die Gap Statistik festzustellen, ob die gefundene Clusterstruktur signifikant besser oder schlechter ist als das, was durch Zufall zu erwarten wäre. Die optimale Anzahl von Clustern liegt dann vor, wenn die Lücke (Gap) zwischen der realen Datenverteilung und der zufälligen Referenzverteilung am größten ist. Die Gap Statistik ist eine nützliche Methode, um eine objektive Einschätzung zur Anzahl der Cluster in einem Datensatz zu erhalten, da sie nicht nur auf visuellen Beurteilungen basiert, sondern auch statistische Kriterien berücksichtigt [230].

Gebaute Umwelt

Die gebaute Umwelt bezieht sich auf den vom Menschen geschaffenen physischen Raum, der Städte, Gebäude, Infrastrukturen und andere konstruierte Elemente umfasst. Sie prägt maßgeblich die Art und Weise, wie Menschen leben, arbeiten und interagieren. Die Definition der gebauten Umwelt kann je nach Kontext variieren [257].

Grüne Infrastruktur

Grüne Infrastruktur bezieht sich auf ein Netzwerk aus natürlichen Elementen in städtischen und ländlichen Gebieten. Dazu gehören Parks, Grünflächen, Flussufer und andere Elemente, die zur Umweltqualität beitragen und Ökosystemdienstleistungen erbringen [258].

Graue Emissionen

Graue Emissionen beziehen sich auf Emissionen, die während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder einer Dienstleistung entstehen, jedoch nicht direkt mit der Energieproduktion oder -nutzung verbunden sind. Dies umfasst beispielsweise die Emissionen aus der Herstellung, dem Transport und der Entsorgung von Materialien. Die Berücksichtigung von grauen Emissionen ist entscheidend, um eine umfassende Bilanz der Umweltauswirkungen von Gebäuden zu erhalten [29].

K-Means Clustering

K-Means Clustering ist ein Algorithmus im Bereich des maschinellen Lernens, der zur Gruppierung von Datenpunkten in Kategorien verwendet wird. Das Verfahren ist besonders nützlich für die Segmentierung von Daten und zur Mustererkennung [229].

Komplexe Systeme

Komplexe Systeme sind durch eine hohe Anzahl von miteinander verbundenen Elementen gekennzeichnet, deren Wechselwirkungen oft nichtlinear sind. Das Verhalten solcher Systeme kann emergente Eigenschaften aufweisen, die sich nicht unmittelbar aus den Eigenschaften der Einzelteile ableiten lassen.

Komplizierte Systeme

Unter komplizierten Systemen versteht man eine Ansammlung von Ursache–Wirkbeziehungen, die aus vielen Einzelteilen oder Komponenten bestehen, jedoch mittels klarer Regeln und Strukturen interagieren. Die Analyse und Vorhersage des Verhaltens solcher Systeme erfordert detaillierte Kenntnisse der Komponenten und ihrer Wechselwirkungen. Im Gegensatz zu komplexen Systemen sind sie allerdings deterministisch und vorhersagbar.

Konflikt

Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnet ein Konflikt zwischen zwei Planungsvariablen Situationen, in denen bestimmte Wertebereiche einer Planungsvariable aufgrund der Wahl einer unabhängigen Planungsvariable ausgeschlossen sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn aufgrund einer hohen urbanen Dichte kein ausreichender Platz für grüne Infrastruktur vorhanden ist. Die Variablen urbane Dichte und grüne Infrastruktur stehen entsprechend im Konflikt [8, 10].

Unikriterielle Synergie

Der in dieser Arbeit eingeführte Begriff der unikriteriellen Synergie (S_{uni} , sh. Kapitel 3.1.1, Seite 25)

bezeichnet die Verbesserung einer Zielgröße durch eine Maßnahmenkombination im Vergleich zur linearen Aufsummierung der Verbesserungen durch die Einzelmaßnahmen der Kombination.

Multikriterielle Synergie

Der in dieser Arbeit eingeführte Begriff der multikriteriellen Synergie (S_{multi} , sh. Kapitel 3.1.2, Seite 27) bezeichnet die parallele Verbesserung mehrerer Zielgrößen. Dabei werden die Verbesserungen ermittelt und untereinander normiert. Die Maßnahmenkombination mit der größten normierten Summe deutet auf eine hohe Verbesserung in mehreren Bereichen hin.

Ökologische Lebenszyklusanalyse

Die ökologische Lebenszyklusanalyse (auch Life Cycle Assessment) bezeichnet die Erfassung von Umweltwirkungen über alle Lebensphasen eines Produkts oder Gebäudes hinweg. Dies umfasst in der Regel die Rohmaterialgewinnung, die Verarbeitung, die Transporte, die Nutzung sowie den Rückbau und die Entsorgung.

Pareto Prinzip

Das Pareto Prinzip spielt eine wesentliche Rolle in der multikriteriellen Optimierung und bei der Bewertung von Trade-offs. Es kommt dann zum tragen, wenn eine gleichzeitig Optimierung aller Zielgrößen nicht möglich ist, da Widersprüche zwischen diesen bestehen. Eine Lösung wird dann als Pareto Lösung bezeichnet, wenn sie eine nicht dominierte Lösung darstellt. Das bedeutet, dass keine der Zielgrößen weiter verbessert werden kann, ohne dass andere Zielgrößen beeinträchtigt werden. Durch die Identifikation der Pareto Front können Entscheidungsträger:innen Trade-offs besser verstehen und Kompromisse zwischen verschiedenen Zielen erkennen.

Rhinoceros 3D - Grasshopper

Grasshopper ist ein visueller Programmiereditor und eine Plattform für algorithmisches Design, die eng mit der 3D-Modellierungssoftware Rhinoceros 3D verbunden ist. Die Plattform wird häufig in der parametrischen Architektur und im Produktdesign verwendet und bietet vielfältige Funktionserweiterungen (Plug-Ins), welche die Integration von Simulationsbausteinen ermöglichen [135].

Thermische Zone

Eine thermische Zone ist ein Bereich in einem Gebäude oder einem städtischen Raum, der aufgrund ähnlicher thermischer Eigenschaften als wärmetechnisch zusammenhängend betrachtet werden kann. Thermische Zonen bilden das Grundgerüst thermischer Simulationen, in welchen Energiegleichgewichte zwischen einer oder mehreren thermischen Zonen untereinander und mit dem Außenraum gebildet werden. Dadurch lassen sich Energiebedarfe und Innenraumkonditionen ermitteln.

Trade-off

Einem Trade-off liegen stets multikriterielle Fragestellungen zugrunde, in denen eine Zielgröße nicht weiter optimiert werden kann, ohne andere Zielgrößen zu verschlechtern. Sie repräsentieren das Pareto Prinzip und können nach dessen Grundsätzen behandelt werden. Trade-offs werden im Rahmen dieser Dissertation auch als Zielkonflikte bezeichnet. Davon abzugrenzen sind räumliche und zeitliche Konflikte zwischen Planungsvariablen, welche die Umsetzung einzelner Maßnahmen unmöglich machen (sh. Glossareintrag „Konflikt“)

Übergradtemperaturstunden

Übergradtemperaturstunden sind über das Gesamtjahr aufsummierte Stunden und Temperaturdifferenzen, in denen die Temperaturen über einem vordefinierten Schwellenwert liegen. Dieser Wert wird häufig für die Bewertung des thermischen Innenraumkomforts herangezogen.

Utopia Punkt

Der Utopia Punkt ist ein hypothetischer Punkt im Zusammenhang mit multikriteriellen Fragestellungen, der die ideale Lösung für alle Zielgrößen darstellt. Er symbolisiert die bestmögliche Leistung auf allen Zielfunktionen gleichzeitig, was in der Realität oft nicht erreichbar ist. Zudem dient er als Referenzpunkt, um die Leistung von Optimierungsalgorithmen zu bewerten.

Anhang

A Anhang - Tabellen

Tabelle A.1 U-Werte der thermischen Hülle in $W/m^2 \cdot K$ nach Baualtersklassen. Es handelt sich um Mittelwerte aus den Kategorien Mehrfamilienhaus, Reihenhaus und großes Mehrfamilienhaus der TABULA Wohngebäude-typologie [148].

Baualtersklasse	Zeitraum	Dach	Bodenplatte	Außenwand	Fenster
A bzw. 0	vor 1859	2,60	1,20	2,00	2,80
B bzw. 1	1860 bis 1918	1,20	1,20	1,87	2,73
C bzw. 2	1919 bis 1948	1,00	1,00	1,60	2,80
D bzw. 3	1949 bis 1957	1,33	2,13	1,20	2,93
E bzw. 4	1958 bis 1968	0,60	1,60	1,20	2,93
F bzw. 5	1969 bis 1978	0,60	1,00	1,03	2,93
G bzw. 6	1979 bis 1983	0,50	0,80	0,80	2,90
H bzw. 7	1984 bis 1994	0,40	0,60	0,60	2,90
I bzw. 8	1995 bis 2001	0,35	0,40	0,25	2,80
J bzw. 9	2002 bis 2009	0,29	0,35	0,25	2,80
K bzw. 10	2010 bis 2015	0,27	0,50	0,37	1,30
L bzw. 11	ab 2016	0,26	0,30	0,30	1,30

Tabelle A.2 U-Werte der thermischen Hülle in $W/m^2 \cdot K$ nach Sanierungsstandards.

Szenario	Quelle	Bodenplatte	Dach	Außenwand	Fenster
Gebäudeenergiegesetz	[172]	0,35	0,20	0,24	1,30
Passivhaus	[157]	0,15	0,15	0,15	0,85

Tabelle A.3 Zuordnung der Baualtersklassen nach der TABULA Wohngebäudetypologie zu den Gebäudesteckbriefen nach IÖR.

Baualtersklasse TABULA Quelle: [150]	Zeitraum TABULA Quelle: [150]	Zugeordnetes Baujahr IÖR Quelle: [259]
A bzw. 0	vor 1859	MFH bis 1918
B bzw. 1	1860 bis 1918	MFH bis 1918
C bzw. 2	1919 bis 1948	MFH 1919 bis 1948
D bzw. 3	1949 bis 1957	MFH 1949 bis 1978
E bzw. 4	1958 bis 1968	MFH 1949 bis 1978
F bzw. 5	1969 bis 1978	MFH 1949 bis 1978
G bzw. 6	1979 bis 1983	MFH 1979 bis 1990
H bzw. 7	1984 bis 1994	MFH 1979 bis 1990
I bzw. 8	1995 bis 2001	MFH 1991 bis 2010
J bzw. 9	2002 bis 2009	MFH 1991 bis 2010
K bzw. 10	2010 bis 2015	MFH 1991 bis 2010
L bzw. 11	ab 2016	MFH 1991 bis 2010

Tabelle A.4 Für Dämmstoffe verwendete LCA-Datensätze basierend auf dem Projekt *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels* [168]. Einheit = kgCO₂-Äq./m³ Dämmstoff.

Kategorie	Phasen A1 bis A3	Phase B4	Phasen C3 bis C4	Phase D
Eco	-78,01	0,00	114,82	-25,94
Eco Standard	28,78	0,00	50,77	-13,95
Standard	20,60	0,00	101,90	-36,39
Konventionell	201,61	0,00	235,22	-78,88

Tabelle A.5 Randbedingungen des Fallstudiengebiets für die Quartiersuntersuchung.

Eigenschaft	Wert
Gebäudelänge	62,0 m
Gebäudebreite	10,5 m
Gebäudehöhe	15,0 m
Geschossanzahl	4 Vollgeschosse, 1 Dachgeschoss
Abstand zwischen Gebäuden Ost-West	20,0 m
Abstand zwischen Gebäuden Nord-Süd	12,0 m
Baujahr der Gebäude	1930
Ausrichtung gegen die Nordachse	10°

Tabelle A.6 Ökobilanzwerte für Dachbegrünung nach [168].

Bilanzierungsgegenstand	LCA Phase	kg CO ₂ -Äq.
Herstellung	A1 bis A3	7,87
Austausch	B4	27,81
End-of-Life	C3 bis C4	19,94
Gutschriften	D	-6,54

Tabelle A.7 Systemgrenzen der Fallstudie für die Lebenszykluskostenanalyse nach [193].

Bewertungsaspekte ISO 15686-5:2017	Systemgrenze in dieser Dissertation	Quellen
Herstellung der Gebäude	Herstellungskosten für Dach, Außenwände, Zwischendecken, Innenwände, Fundament sowie Fenster im verbauten Zustand	[194]
Sanierung und Instandsetzung von Gebäuden	Herstellungskosten für Dämmschichten im verbauten Zustand	[194]
Gebäudebetrieb	Kosten für Energieträger zur Beheizung der Gebäude.	[197]
Laufende Wartung und Instandsetzung	Austauschzyklen der Bauteile gemäß BNB	[196]
Rückbau und Entsorgung	Rückbau und Entsorgung nach generischen Kostensätzen	[194]

Tabelle A.8 Herstellungskosten (netto) zur Berechnung der Lebenszykluskosten.

Bauteil / Objekt	Einheit	€ / Einheit	Quelle
Dämmstoff Eco-Standard	m ³	813,60	[168, 194]
Fenster Holz-Alu	m ²	803,00	[195]
PV Dach	m ²	261,82	[195]
PV Fassade	m ²	2018: 500,00 2022: 541,22	[260]
PV Batterie	kWh	< 5 kWh: 1.100,84 5-10 kWh: 873,95 > 10 kWh: 756,30	[261]
Extensives Gründach	m ²	< 4 cm: 26,42 4–8 cm: 35,43 8–12 cm: 44,43 > 12 cm: 51,18	[194]
Winterlinde Herstellung inkl. Tiefbau	Stück	1.680,67	[262]
Winterlinde Pflege	Stück	2012: 58,50 2022: 71,31	[263]
Winterlinde Fällung	Stück	850,00	[264]
Abbruch Bestandsdach	m ²	78,15	[195]
Fassadengerüst	m ²	16,00	[195]

B Anhang - Abbildungen

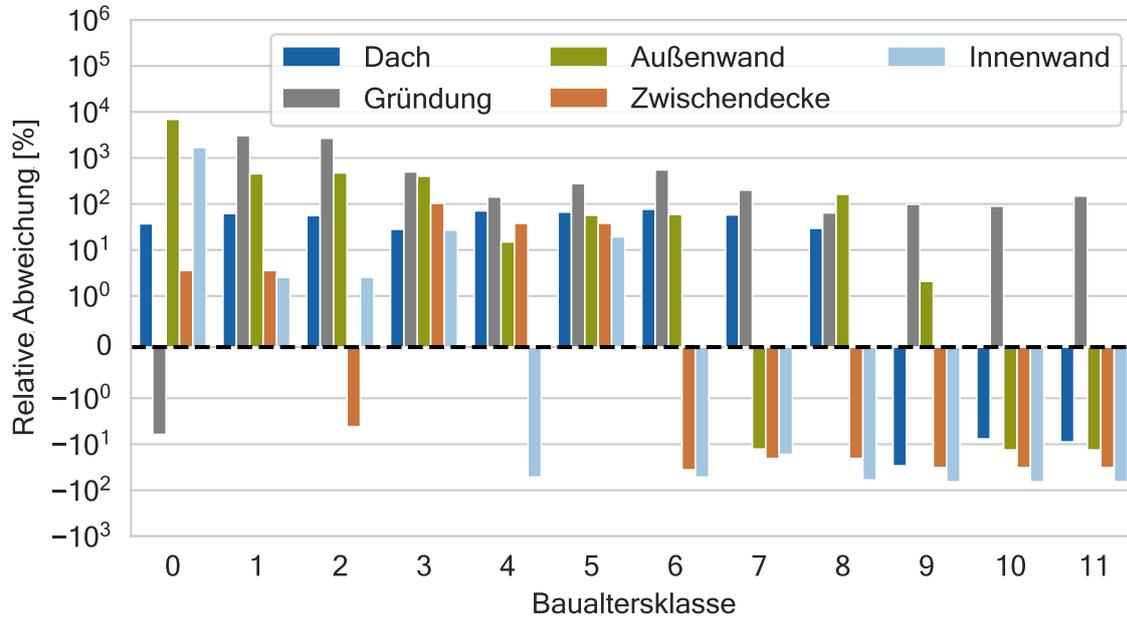


Abbildung B.1 Relativer Vergleich der THG-Emissionen von Bestandsbauteilen zwischen TABLUA und IÖR der Lebenszyklusphasen Rückbau (C3) und Entsorgung (C4).

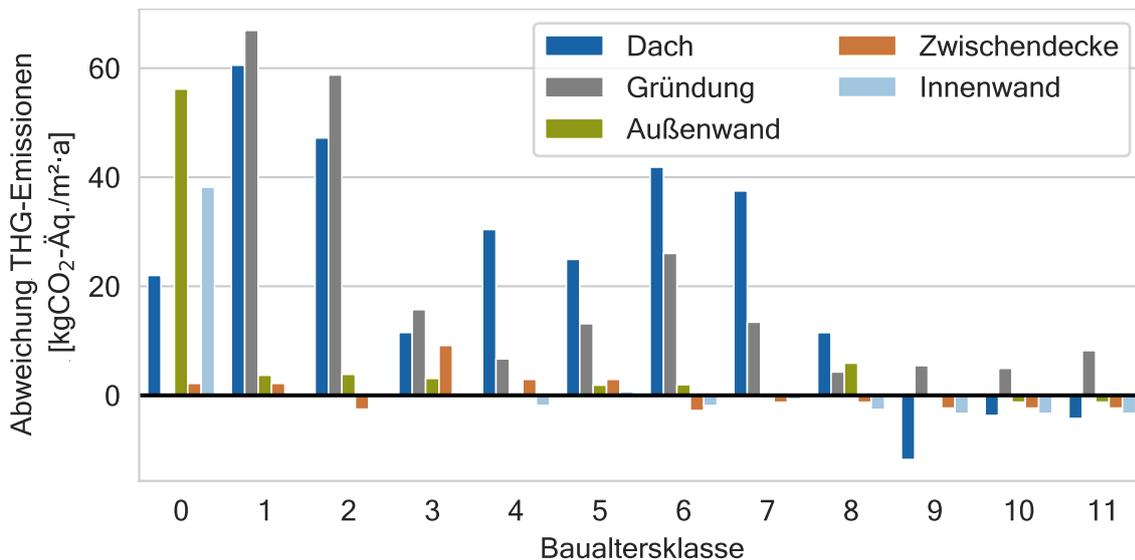


Abbildung B.2 Absoluter Vergleich der THG-Emissionen von Bestandsbauteilen zwischen TABLUA und IÖR der Lebenszyklusphasen Rückbau (C3) und Entsorgung (C4).

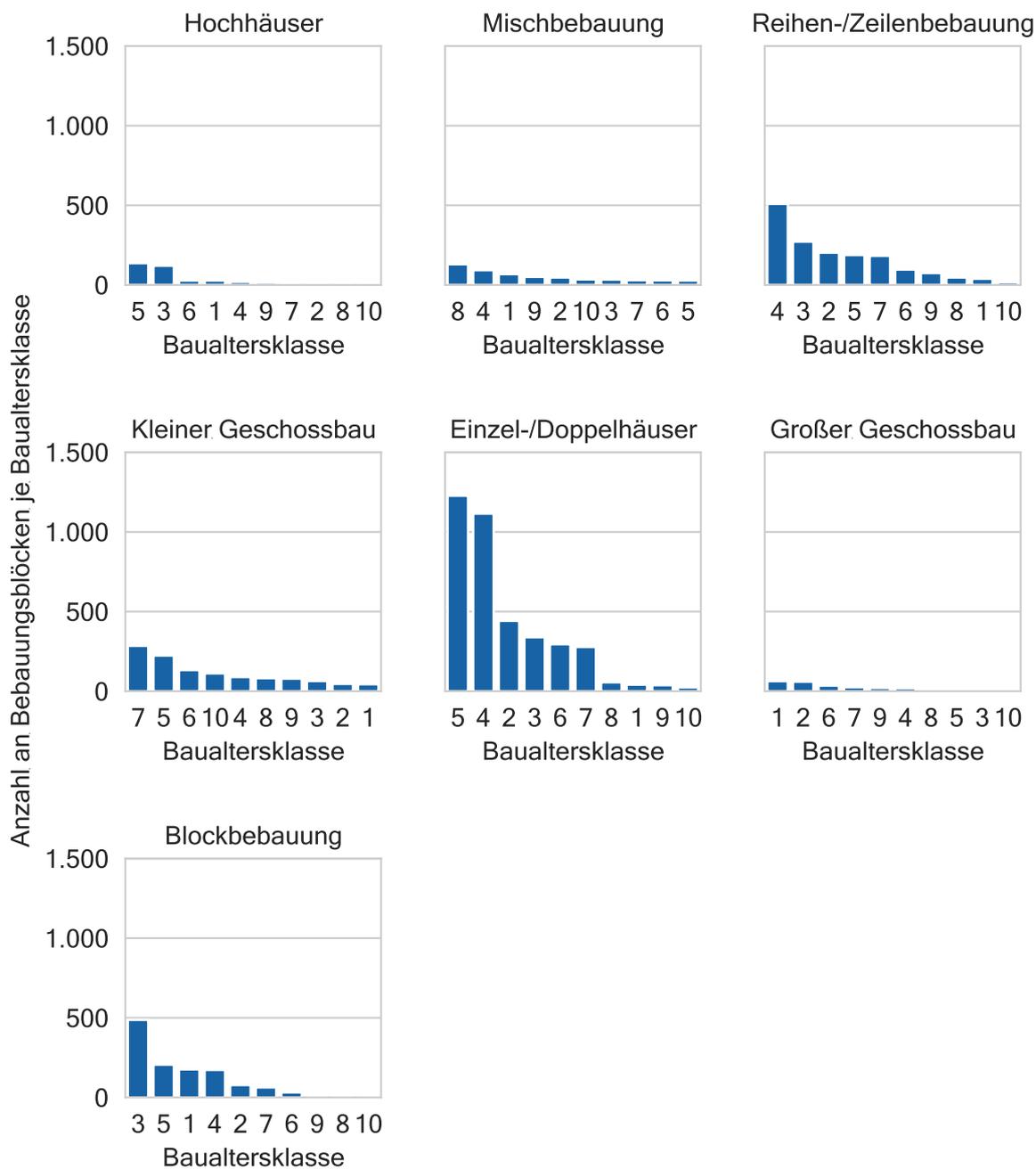


Abbildung B.3 Anzahl der Gebäudeblöcke je entwickelter Typologie und Baualtersklasse. Die verwendeten Typologien wurden im Rahmen des Graduiertenkollegs *Urbane grüne Infrastruktur* entwickelt [238].

Anwendbarkeit der Quartierssteckbriefe in München

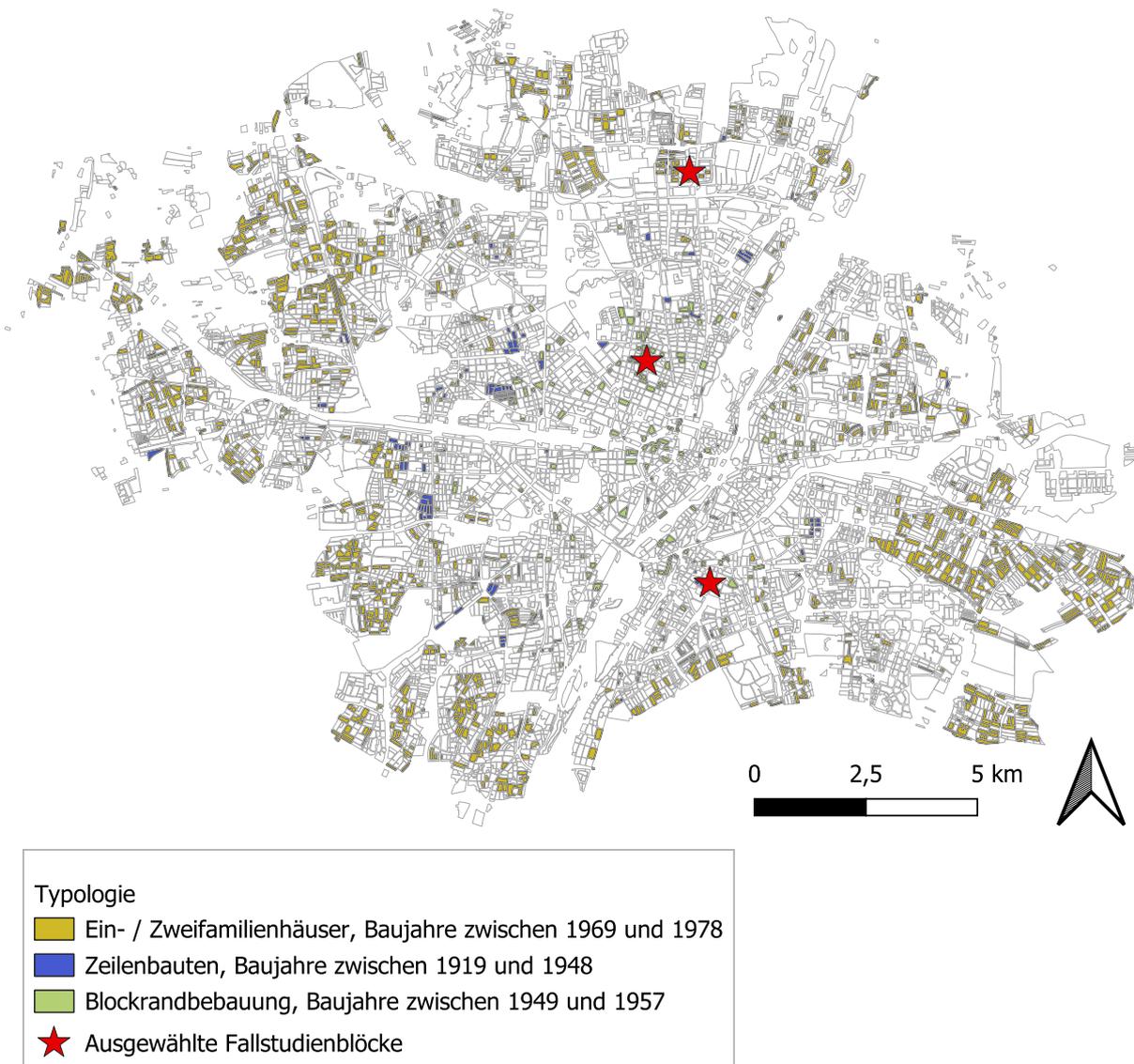


Abbildung B.4 Verteilung der untersuchten Quartierstypologien über das Münchner Stadtgebiet.

C Anhang - Simulationsmodell

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Simulationsmodell steht im GitLab des Lehrstuhls für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen dauerhaft zur Verfügung. Darin finden sich das für den Zeilenbau verwendete Grasshopper-Modell sowie eine Installations- und Modellerläuterung.

Das Repository ist unter folgendem Link erreichbar:

https://gitlab.lrz.de/tum-enpb/urban_systems_exploration



D Anhang - Quartiersteckbriefe

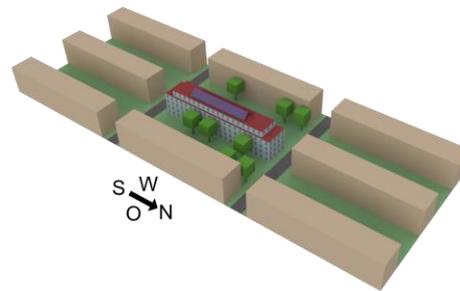
Dieser Anhang enthält die erstellten Quartiersteckbriefe. Die Steckbriefe sind als in sich abgeschlossene Dokumente konzipiert und wurden daher mit einer jeweils eigenen Seitennummerierung versehen. Die Steckbriefe sind zur Orientierung in frühen Planungsphasen entworfen und teils in qualitative Aussagen übersetzt. Dies wurde im Zuge der durchgeführten Expert:inneninterviews für die Planung und Konzeption von Quartiersentwicklungen als hilfreich erachtet (sh. Kapitel 5, Seite 87) und trägt zudem zur Kompaktheit der Steckbriefe bei. Die zugehörigen quantitativen Informationen können Anhang E entnommen werden (sh. Seite 177).

Inhalt des Anhangs D:

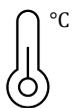
1. Steckbrief: Zeilenbebauung
2. Steckbrief: Punktbebauung
3. Steckbrief: Blockbebauung

Rahmenbedingungen des Steckbriefs

Bebauungstyp:	Zeilenbebauung
Baujahre der Gebäude:	1930 – 1940
Geschossflächenzahl:	1,54
Standort:	München
Energieträger:	Wärmepumpe
Sanierungsziel:	Passivhaus



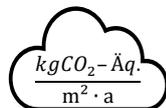
Betrachtete Zielaspekte



Thermischer Komfort
im Außenraum

Bewertung durch die Ermittlung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) rund um das mittige Gebäude.

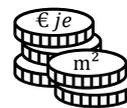
26 – 32°C: moderater Hitzestress
32 – 38°C: starker Hitzestress



THG-Emissionen
im Lebenszyklus

Bewertung durch Ökobilanzierung des mittigen Gebäudes unter Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Rückbau.

Für Bestandeingriff keine Vergleichswerte



Kosten im
Lebenszyklus

Bewertung durch Untersuchung des mittigen Gebäudes unter Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Rückbau.

Für Bestandeingriff keine Vergleichswerte

Betrachtete Planungsvariablen



Baumanteil [%]
Anteil mit Bäumen besetzter Freiflächen



Fassade PV Ost-West [%]
Anteil der mit PV belegten Fassadenfläche



Kronendurchmesser [m]
Durchmesser der zylindrischen Baumkrone



Batterie Photovoltaik (PV) [kWh]
Kapazität eines PV-Stromspeichers



Baumhöhe [m]
Höhe von Boden bis Unterseite der Krone



Gründachdicke [m]
Substratdicke extensiver Dachbegrünung



Kronentransparenz Sommer [%]
Belaubungszustand Mai bis Oktober



Fensterflächenanteil [%]
Anteil der Fenster an der Wandfläche



Kronentransparenz Winter [%]
Belaubungszustand November bis April



Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) [-]
Anteil der eintretenden Solarstrahlung



PV Dach [%]
Anteil der mit PV belegten Dachfläche



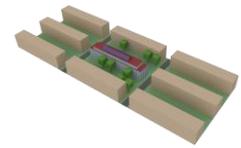
Albedo Fassade [-]
Rückstrahlung Fassade, Asphalt ca. 0,15



PV Fassade Süd [%]
Anteil der mit PV belegten Fassadenfläche

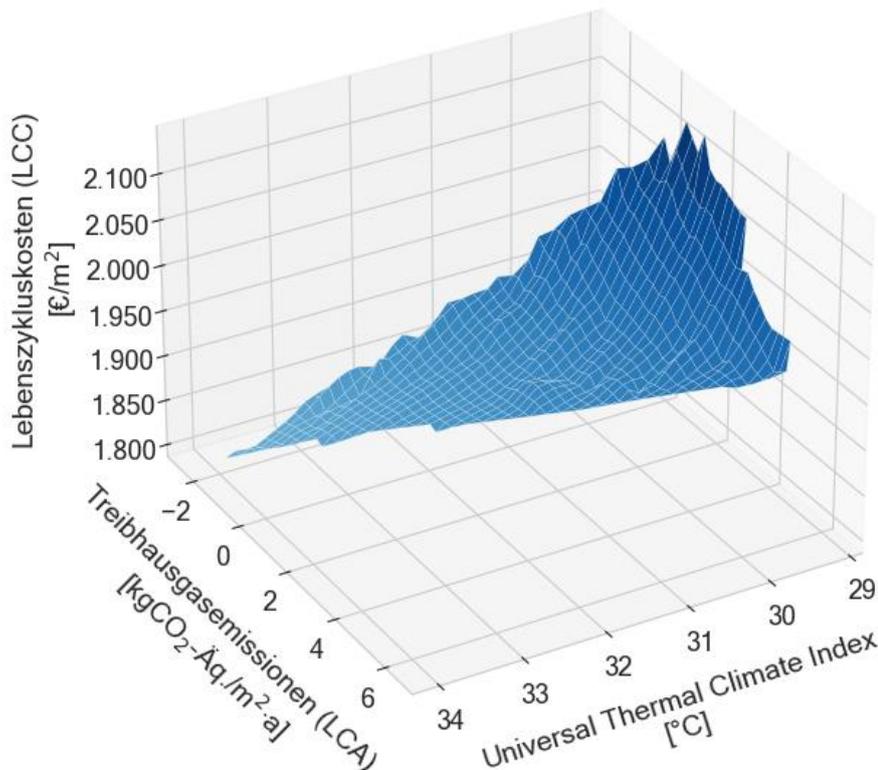


Straßenbreite [m]
Straße zwischen Gebäuden

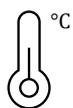


Bestmöglicher Handlungsspielraum

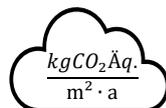
Zwischen den Aspekten Treibhausgasemissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort bestehen häufig Widersprüche. Alle drei Dimensionen können daher nicht gleichzeitig optimiert werden und es muss ein bestmöglicher Kompromiss für dieses multikriterielle Problem gefunden werden. Diese Seite zeigt den dabei vorhandenen Handlungsspielraum. Wichtig ist, dass in diesem Fall keine einzelne optimale Lösung existiert. Vielmehr besteht ein optimaler Lösungsraum, aus dem ein Kompromiss gewählt und umgesetzt werden muss.



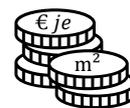
Die Spannweite der optimalen Lösungen über die drei Zielaspekte ist nachfolgend wiedergegeben. Dabei sind jeweils maximale, mittlere und minimale Ergebnisse aufgeführt. Hierbei erreicht keine Lösung ein gleichzeitiges Minimum in allen drei Zielaspekten.



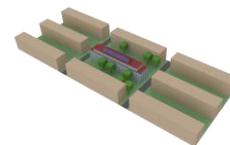
Max	34,0
Mittel	30,5
Min	29,2



Max	6,4
Mittel	1,4
Min	-2,5

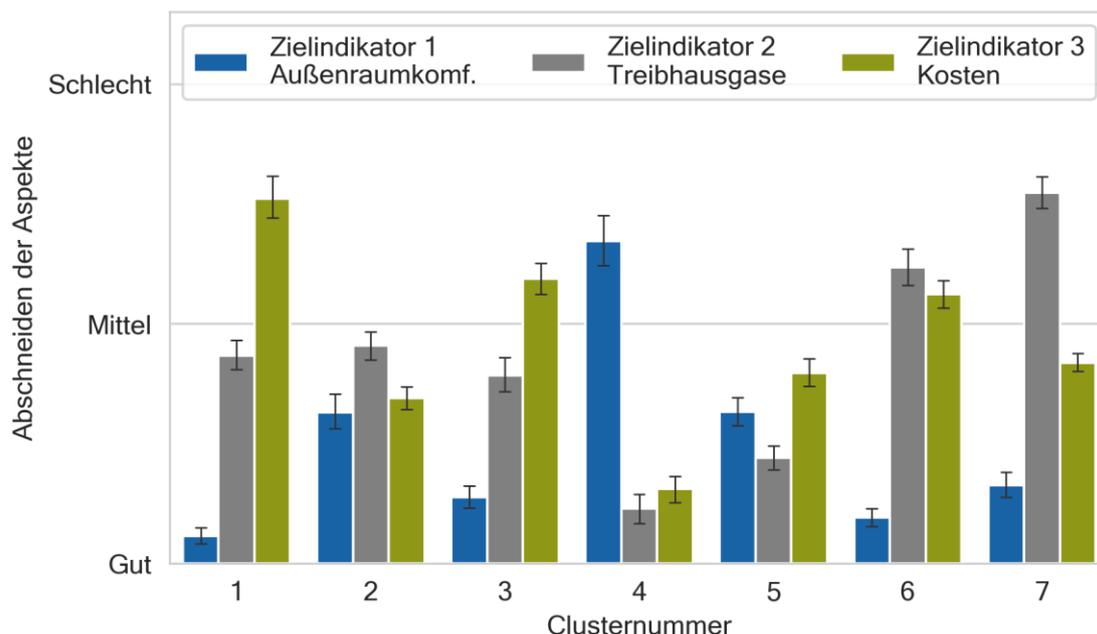


Max	2.214
Mittel	1.971
Min	1.788



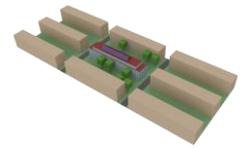
Steuerung von Zielkonflikten

Nachdem ein allgemeiner Eindruck zu den vorherrschenden Zielkonflikten und deren Spannweiten gegeben wurde, ermöglichen die folgenden Darstellungen die gezielte Ansteuerung eines Bereichs (im Folgenden auch Cluster genannt). Dadurch können Schwerpunkte für einen oder mehrere der drei Aspekte gesetzt oder eine möglichst ausgeglichene Variante verfolgt werden. Die Streuung der jeweiligen Zielaspekte wird durch die Fehlerbalken angezeigt. Die Wertebereiche der zugehörigen Planungsvariablen sind auf den nachfolgenden Seiten wiedergegeben.



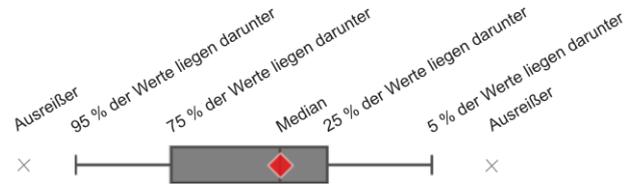
Qualitativ lassen sich folgende Charakterisierungen zusammenfassen:

Cluster	Beschreibung
2, 5	Sehr ausgeglichen, allerdings bei keinem der Aspekte am besten.
1, 3	Sehr gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Die Treibhausgasemissionen werden gegenüber den Lebenszykluskosten priorisiert.
7	Sehr gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Die Lebenszykluskosten werden gegenüber den Treibhausgasemissionen priorisiert.
6	Sehr gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Es liegt ein mittleres Abschneiden bei den Lebenszykluskosten und den Treibhausgasemissionen vor.
4	Sehr gut bei den Treibhausgasemissionen und den Lebenszykluskosten. Unterdurchschnittliches Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort.

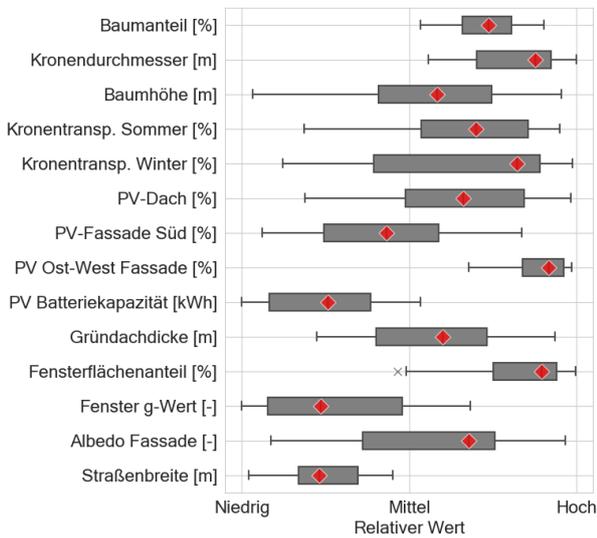


Planungsvariablen der Cluster

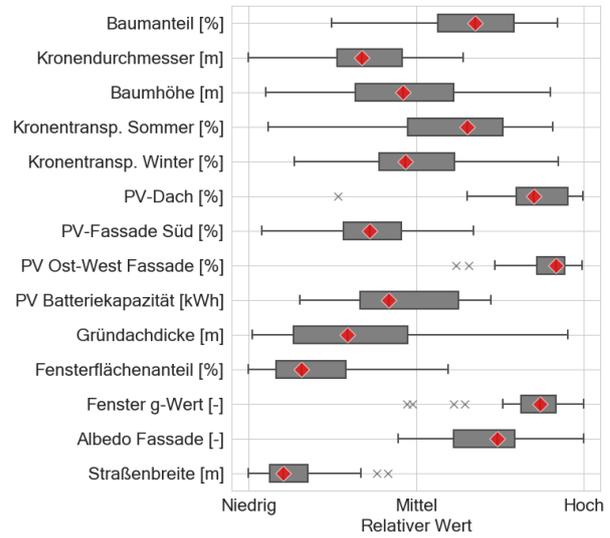
Die nachfolgend angegebenen Wertebereiche beziehen sich auf die Cluster der vorherigen Seite. Nach Auswahl eines Clusters können hier die zugehörigen Ausprägungen der Planungsvariablen auf einer qualitativen Skala abgelesen werden. Zudem geben die Darstellungen Aufschluss über den Spielraum jeder Variable. Bei großen Spannweiten ist der jeweilige Parameter nicht entscheidend für die Erreichung des beabsichtigten Clusters und kann freier gewählt bzw. mit weniger strikten Vorgaben versehen werden. Enge Spannweiten deuten hingegen auf Variablen hin, die mit einem geringeren Spielraum versehen werden sollten.



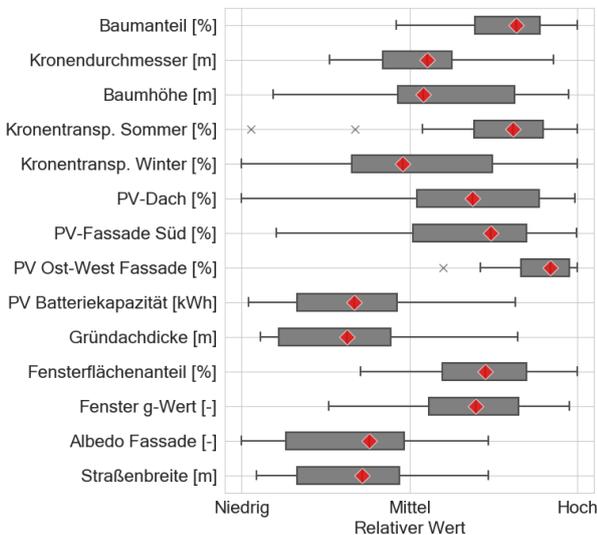
Cluster 1



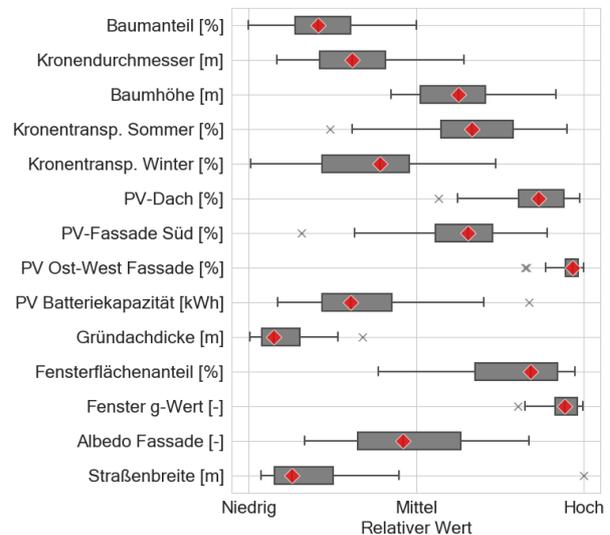
Cluster 2

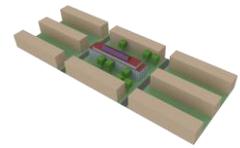


Cluster 3



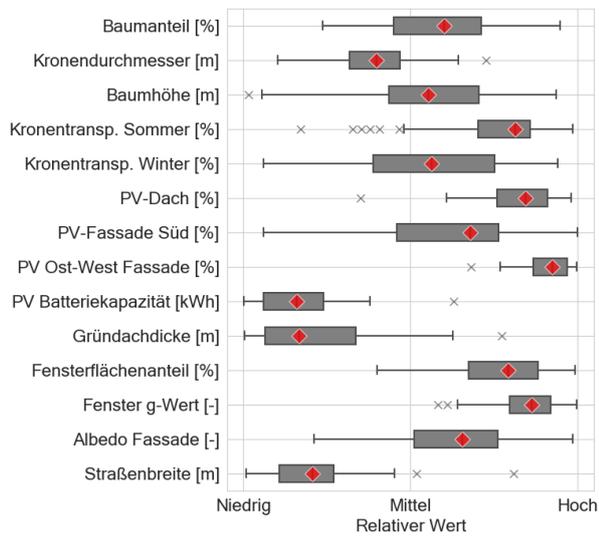
Cluster 4



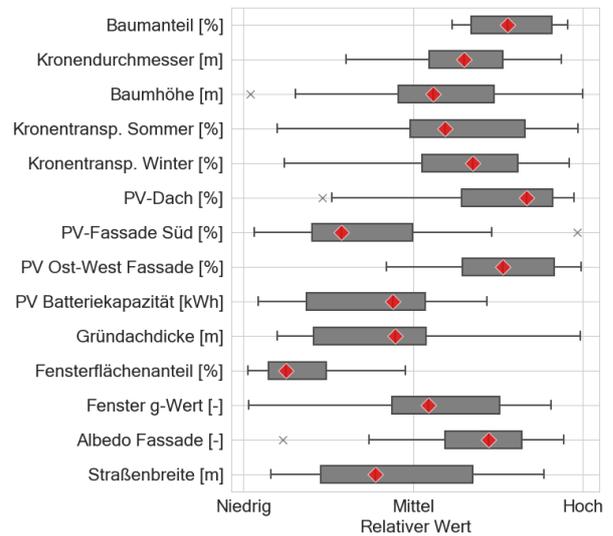


Designparameter der Cluster (Fortsetzung)

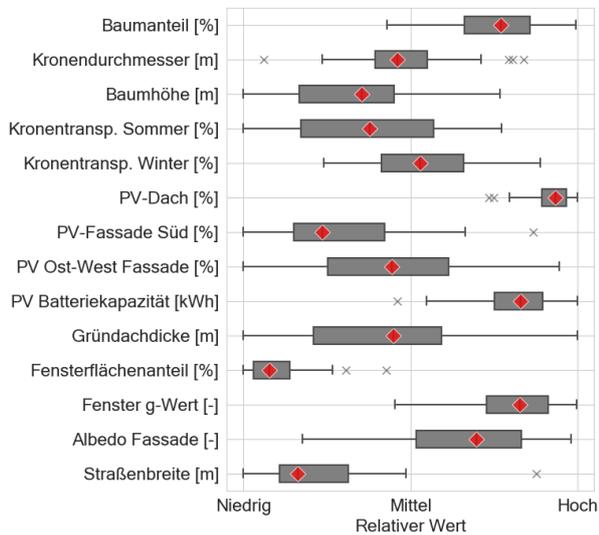
Cluster 5

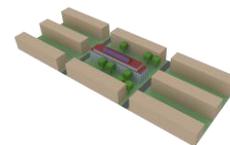


Cluster 6



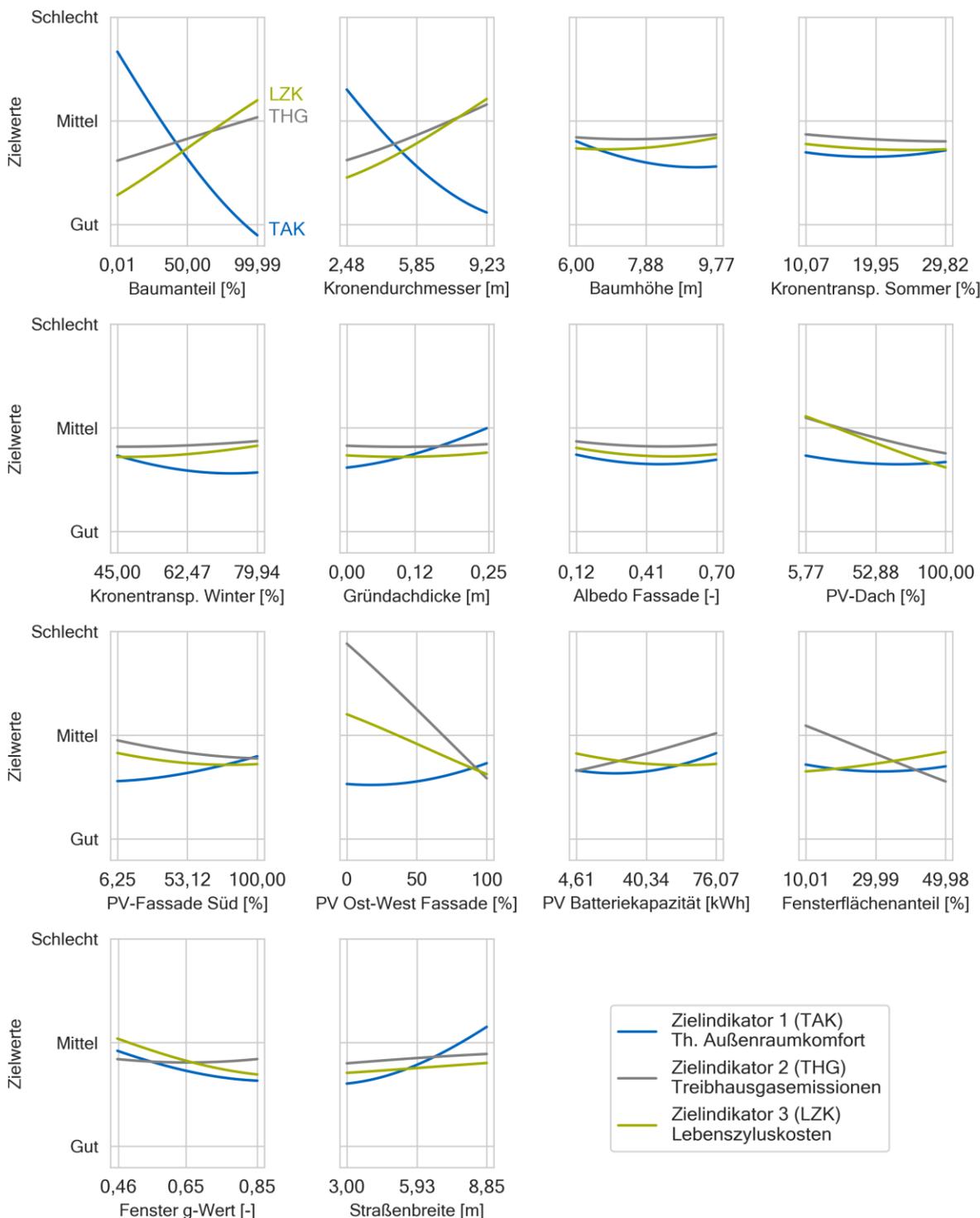
Cluster 7





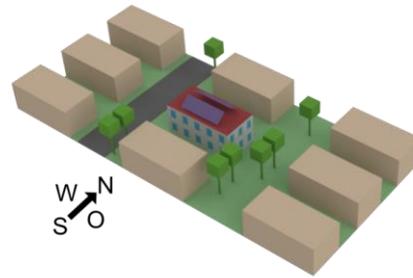
Auswirkungen von Planungsvariablen auf die Zielaspekte

Nachfolgende Abbildung gibt einen qualitativen Eindruck zur Veränderung der Zielaspekte (**Thermischer Außenraumkomfort**, **Treibhausgasemissionen**, **Lebenszykluskosten**) bei der Änderung einzelner Planungsvariablen. Dadurch können die Auswirkung jeder Stellschraube auf die drei Zieldimensionen im Einzelnen eingeschätzt werden. Bleiben Linien annähernd horizontal, deutet dies auf wenig Einfluss der betrachteten Variable hin. Linien mit hoher Steigung verändern ihre Werte dagegen stark, wenn an den einzelnen Variablen Änderungen vorgenommen werden.

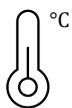


Rahmenbedingungen des Steckbriefs

Bebauungstyp:	Einzelhausbebauung
Baujahre der Gebäude:	1969 – 1978
Geschossflächenzahl:	0,41
Standort:	München
Energieträger:	Wärmepumpe
Sanierungsziel:	Passivhaus



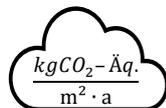
Betrachtete Zielaspekte



Thermischer Komfort
im Außenraum

Bewertung durch die Ermittlung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) rund um das mittige Gebäude.

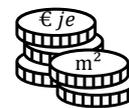
26 – 32°C: moderater Hitzestress
32 – 38°C: starker Hitzestress



THG-Emissionen
im Lebenszyklus

Bewertung durch Ökobilanzierung des mittigen Gebäudes unter Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Rückbau.

Für Bestandeingriff keine Vergleichswerte



Kosten im
Lebenszyklus

Bewertung durch Untersuchung des mittigen Gebäudes unter Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Rückbau.

Für Bestandeingriff keine Vergleichswerte

Betrachtete Planungsvariablen



Baumanteil [%]
Anteil mit Bäumen besetzter Freiflächen



Fassade PV Ost-West [%]
Anteil der mit PV belegten Fassadenfläche



Kronendurchmesser [m]
Durchmesser der zylindrischen Baumkrone



Batterie Photovoltaik (PV) [kWh]
Kapazität eines PV-Stromspeichers



Baumhöhe [m]
Höhe von Boden bis Unterseite der Krone



Gründachdicke [m]
Substratdicke extensiver Dachbegrünung



Kronentransparenz Sommer [%]
Belaubungszustand Mai bis Oktober



Fensterflächenanteil [%]
Anteil der Fenster an der Wandfläche



Kronentransparenz Winter [%]
Belaubungszustand November bis April



Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) [-]
Anteil der eintretenden Solarstrahlung



PV Dach [%]
Anteil der mit PV belegten Dachfläche



Albedo Fassade [-]
Rückstrahlung Fassade, Asphalt ca. 0,15



PV Fassade Süd [%]
Anteil der mit PV belegten Fassadenfläche

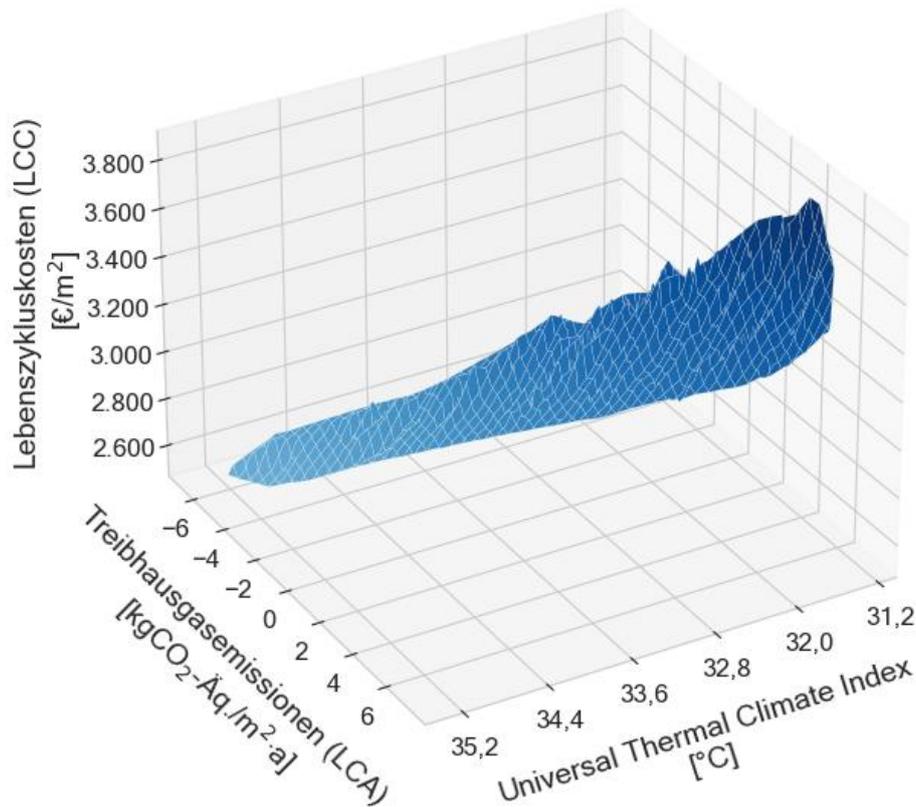


Straßenbreite [m]
Straße zwischen Gebäuden

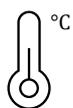


Bestmöglicher Handlungsspielraum

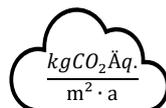
Zwischen den Aspekten Treibhausgasemissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort bestehen häufig Widersprüche. Alle drei Dimensionen können daher nicht gleichzeitig optimiert werden und es muss ein bestmöglicher Kompromiss für dieses multikriterielle Problem gefunden werden. Diese Seite zeigt den dabei vorhandenen Handlungsspielraum. Wichtig ist, dass in diesem Fall keine einzelne optimale Lösung existiert. Vielmehr besteht ein optimaler Lösungsraum, aus dem ein Kompromiss gewählt und umgesetzt werden muss.



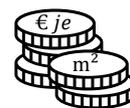
Die Spannweite der optimalen Lösungen über die drei Zielaspekte ist nachfolgend wiedergegeben. Dabei sind jeweils maximale, mittlere und minimale Ergebnisse aufgeführt. Hierbei erreicht keine Lösung ein gleichzeitiges Minimum in allen drei Zielaspekten.



°C	Max	35,3
	Mittel	32,9
	Min	31,3



$\frac{kgCO_2\text{-}\ddot{A}q.}{m^2 \cdot a}$	Max	7,3
	Mittel	1,2
	Min	-6,6

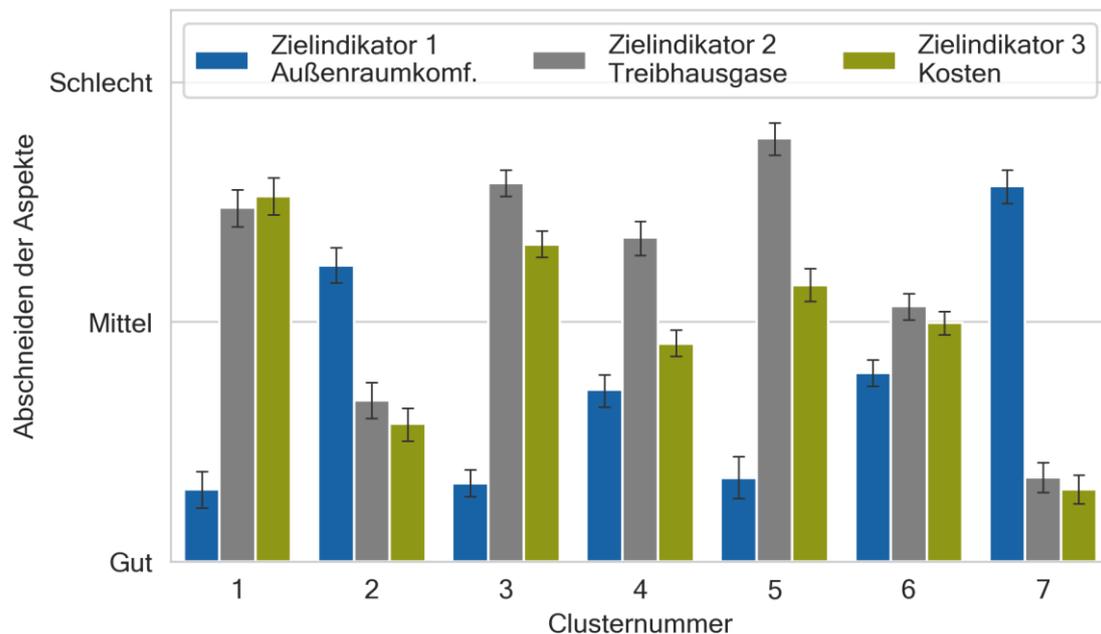


€ je m²	Max	3.950
	Mittel	3.173
	Min	2.484



Steuerung von Zielkonflikten

Nachdem ein allgemeiner Eindruck zu den vorherrschenden Zielkonflikten und deren Spannweiten gegeben wurde, ermöglichen die folgenden Darstellungen die gezielte Ansteuerung eines Bereichs (im Folgenden auch Cluster genannt). Dadurch können Schwerpunkte für einen oder mehrere der drei Aspekte gesetzt oder eine möglichst ausgeglichene Variante verfolgt werden. Die Streuung der jeweiligen Zielaspekte wird durch die Fehlerbalken angezeigt. Die Wertebereiche der zugehörigen Planungsvariablen sind auf den nachfolgenden Seiten wiedergegeben.



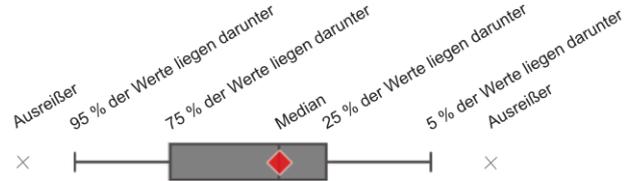
Qualitativ lassen sich folgende Charakterisierungen zusammenfassen:

Cluster	Beschreibung
6	Sehr ausgeglichen, allerdings bei keinem der Aspekte am besten.
4	Der thermische Außenraumkomfort und die Lebenszykluskosten liegen im mittleren bis guten Bereich. Die Treibhausgasemissionen schneiden etwas schlechter ab.
1, 3	Gutes bis sehr gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Die Lebenszykluskosten und die Treibhausgasemissionen schneiden schlecht ab.
5	Gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Die Lebenszykluskosten werden gegenüber den Treibhausgasemissionen priorisiert.
2, 7	Sehr gut bei den Treibhausgasemissionen und den Lebenszykluskosten. Unterdurchschnittliches Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort.

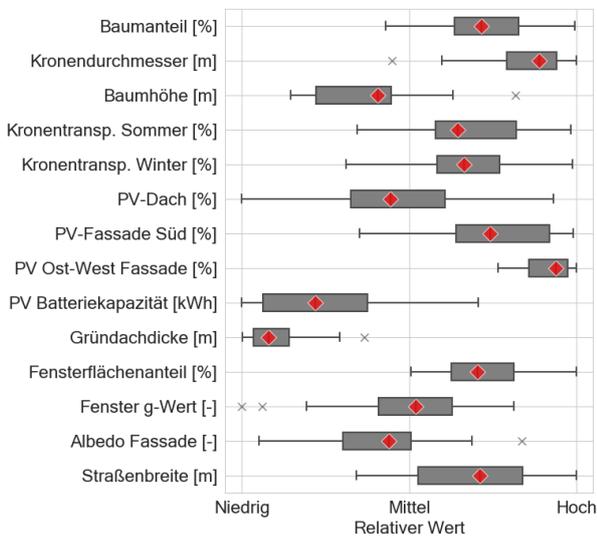


Planungsvariablen der Cluster

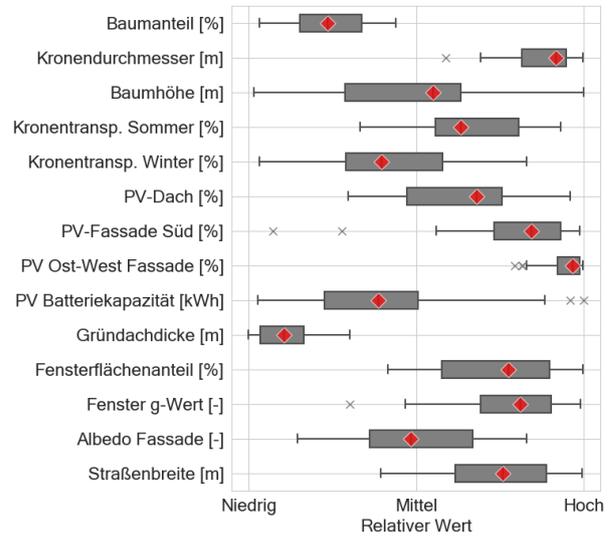
Die nachfolgend angegebenen Wertebereiche beziehen sich auf die Cluster der vorherigen Seite. Nach Auswahl eines Clusters können hier die zugehörigen Ausprägungen der Planungsvariablen auf einer qualitativen Skala abgelesen werden. Zudem geben die Darstellungen Aufschluss über den Spielraum jeder Variable. Bei großen Spannweiten ist der jeweilige Parameter nicht entscheidend für die Erreichung des beabsichtigten Clusters und kann freier gewählt bzw. mit weniger strikten Vorgaben versehen werden. Enge Spannweiten deuten hingegen auf Variablen hin, die mit einem geringeren Spielraum versehen werden sollten.



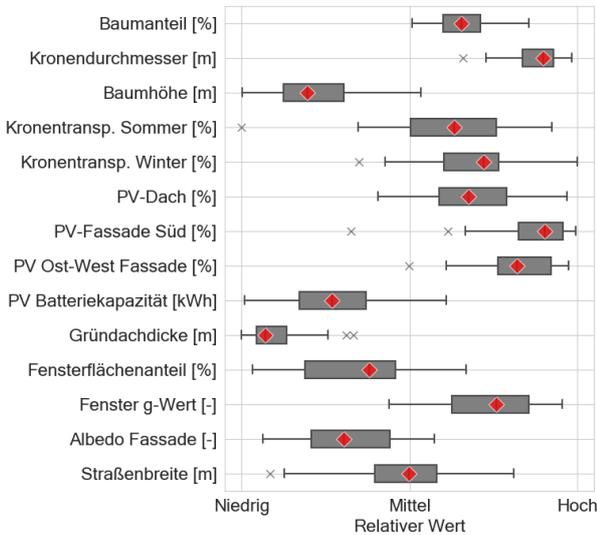
Cluster 1



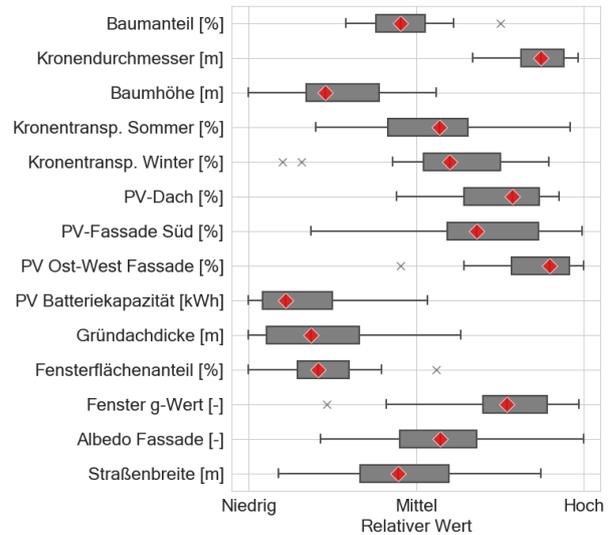
Cluster 2



Cluster 3



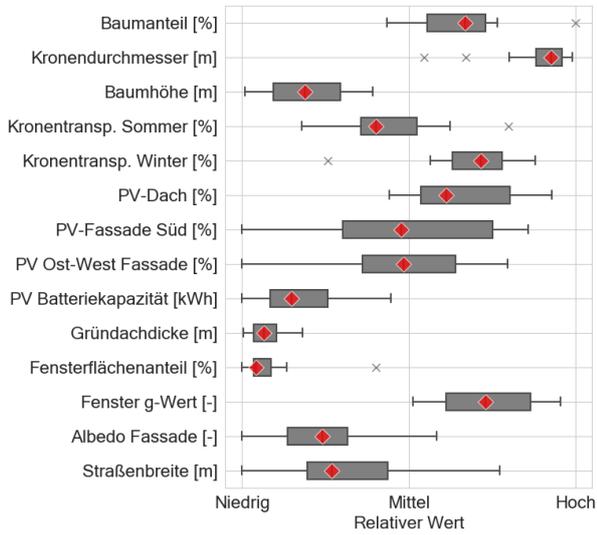
Cluster 4



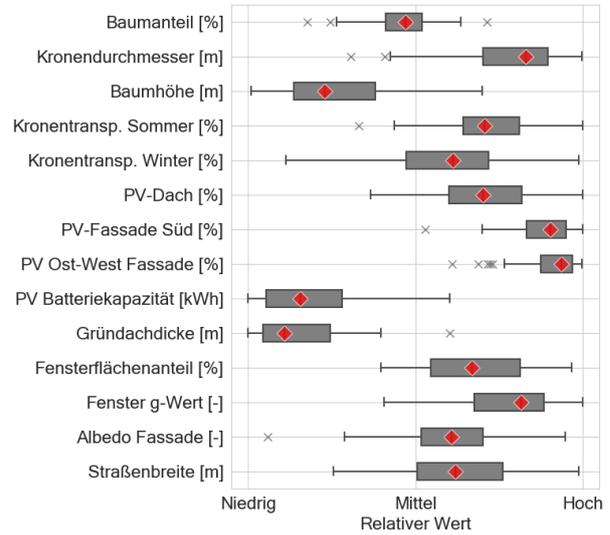


Designparameter der Cluster (Fortsetzung)

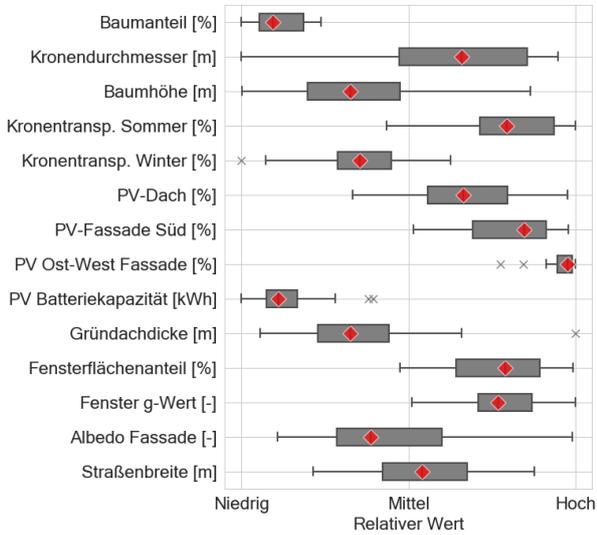
Cluster 5



Cluster 6



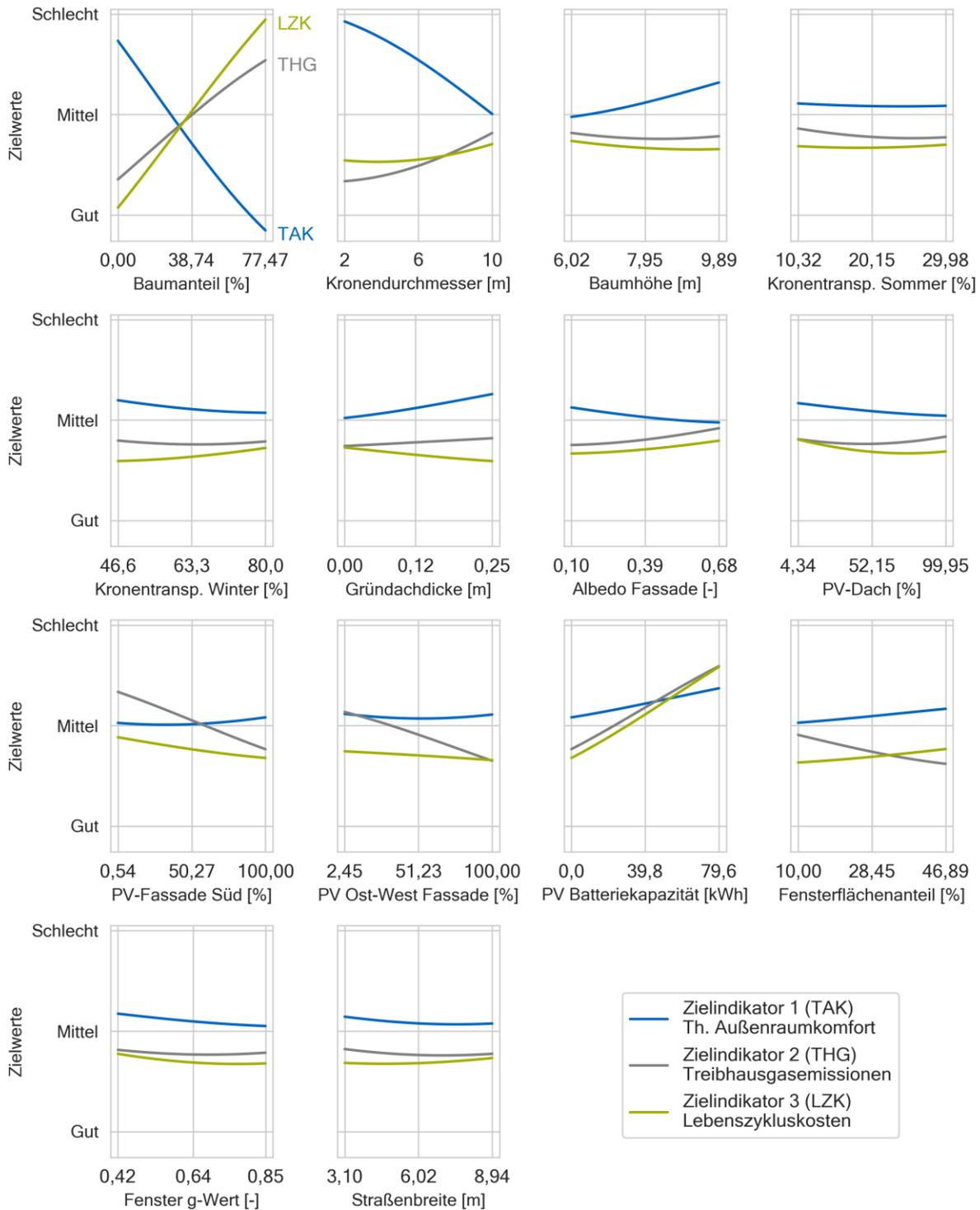
Cluster 7





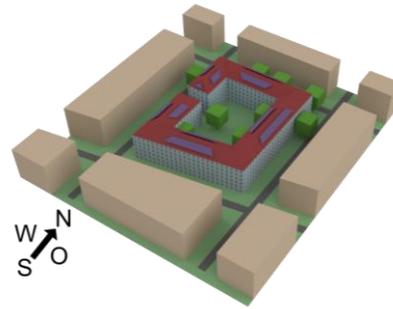
Auswirkungen von Planungsvariablen auf die Zielaspekte

Nachfolgende Abbildung gibt einen qualitativen Eindruck zur Veränderung der Zielaspekte (**Thermischer Außenraumkomfort**, **Treibhausgasemissionen**, **Lebenszykluskosten**) bei der Änderung einzelner Planungsvariablen. Dadurch können die Auswirkung jeder Stellschraube auf die drei Zieldimensionen im Einzelnen eingeschätzt werden. Bleiben Linien annähernd horizontal, deutet dies auf wenig Einfluss der betrachteten Variable hin. Linien mit hoher Steigung verändern ihre Werte dagegen stark, wenn an den einzelnen Variablen Änderungen vorgenommen werden.

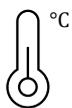


Rahmenbedingungen des Steckbriefs

Bebauungstyp:	Blockbebauung
Baujahre der Gebäude:	1949 – 1957
Geschossflächenzahl:	2,92
Standort:	München
Energieträger:	Wärmepumpe
Sanierungsziel:	Passivhaus



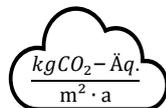
Betrachtete Zielaspekte



Thermischer Komfort
im Außenraum

Bewertung durch die Ermittlung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) rund um das mittige Gebäude.

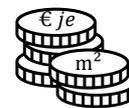
26 – 32°C: moderater Hitzestress
32 – 38°C: starker Hitzestress



THG-Emissionen
im Lebenszyklus

Bewertung durch Ökobilanzierung des mittigen Gebäudes unter Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Rückbau.

Für Bestandeingriff keine Vergleichswerte



Kosten im
Lebenszyklus

Bewertung durch Untersuchung des mittigen Gebäudes unter Berücksichtigung von Herstellung, Betrieb und Rückbau.

Für Bestandeingriff keine Vergleichswerte

Betrachtete Planungsvariablen



Baumanteil [%]
Anteil mit Bäumen besetzter Freiflächen



Fassade PV Ost-West [%]
Anteil der mit PV belegten Fassadenfläche



Kronendurchmesser [m]
Durchmesser der zylindrischen Baumkrone



Batterie Photovoltaik (PV) [kWh]
Kapazität eines PV-Stromspeichers



Baumhöhe [m]
Höhe von Boden bis Unterseite der Krone



Gründachdicke [m]
Substratdicke extensiver Dachbegrünung



Kronentransparenz Sommer [%]
Belaubungszustand Mai bis Oktober



Fensterflächenanteil [%]
Anteil der Fenster an der Wandfläche



Kronentransparenz Winter [%]
Belaubungszustand November bis April



Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) [-]
Anteil der eintretenden Solarstrahlung



PV Dach [%]
Anteil der mit PV belegten Dachfläche



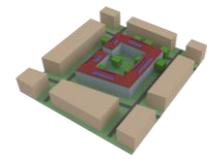
Albedo Fassade [-]
Rückstrahlung Fassade, Asphalt ca. 0,15



PV Fassade Süd [%]
Anteil der mit PV belegten Fassadenfläche

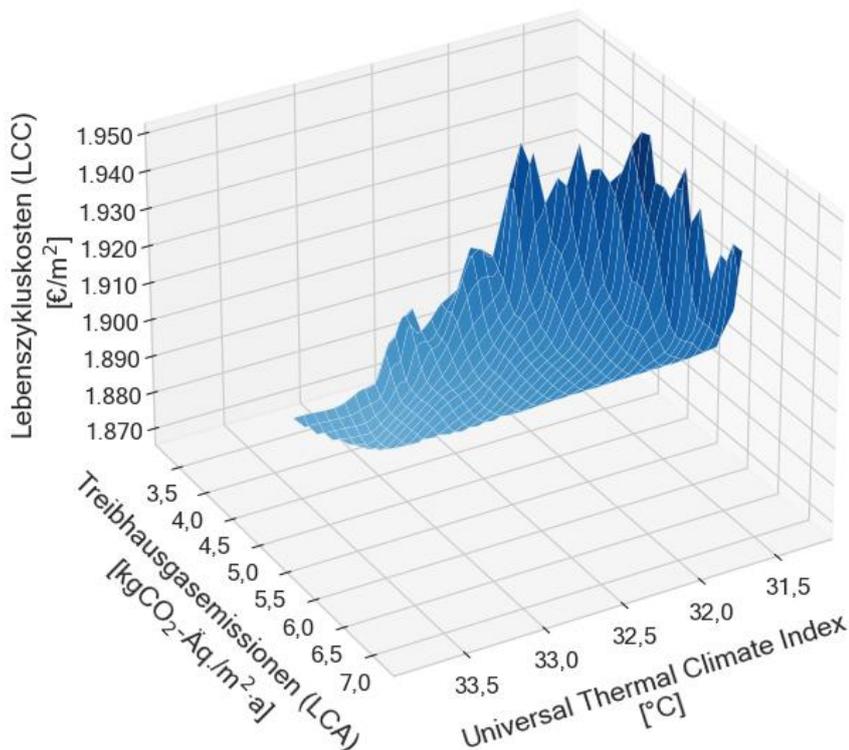


Straßenbreite [m]
Straße zwischen Gebäuden

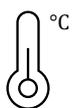


Bestmöglicher Handlungsspielraum

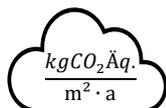
Zwischen den Aspekten Treibhausgasemissionen, Lebenszykluskosten und thermischem Außenraumkomfort bestehen häufig Widersprüche. Alle drei Dimensionen können daher nicht gleichzeitig optimiert werden und es muss ein bestmöglicher Kompromiss für dieses multikriterielle Problem gefunden werden. Diese Seite zeigt den dabei vorhandenen Handlungsspielraum. Wichtig ist, dass in diesem Fall keine einzelne optimale Lösung existiert. Vielmehr besteht ein optimaler Lösungsraum, aus dem ein Kompromiss gewählt und umgesetzt werden muss.



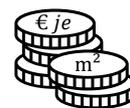
Die Spannweite der optimalen Lösungen über die drei Zielaspekte ist nachfolgend wiedergegeben. Dabei sind jeweils maximale, mittlere und minimale Ergebnisse aufgeführt. Hierbei erreicht keine Lösung ein gleichzeitiges Minimum in allen drei Zielaspekten.



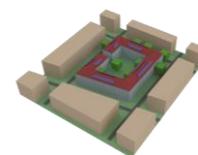
°C	Max	33,8
	Mittel	32,0
	Min	31,3



$\frac{kgCO_2\text{-Äq.}}{m^2 \cdot a}$	Max	7,1
	Mittel	4,6
	Min	3,3

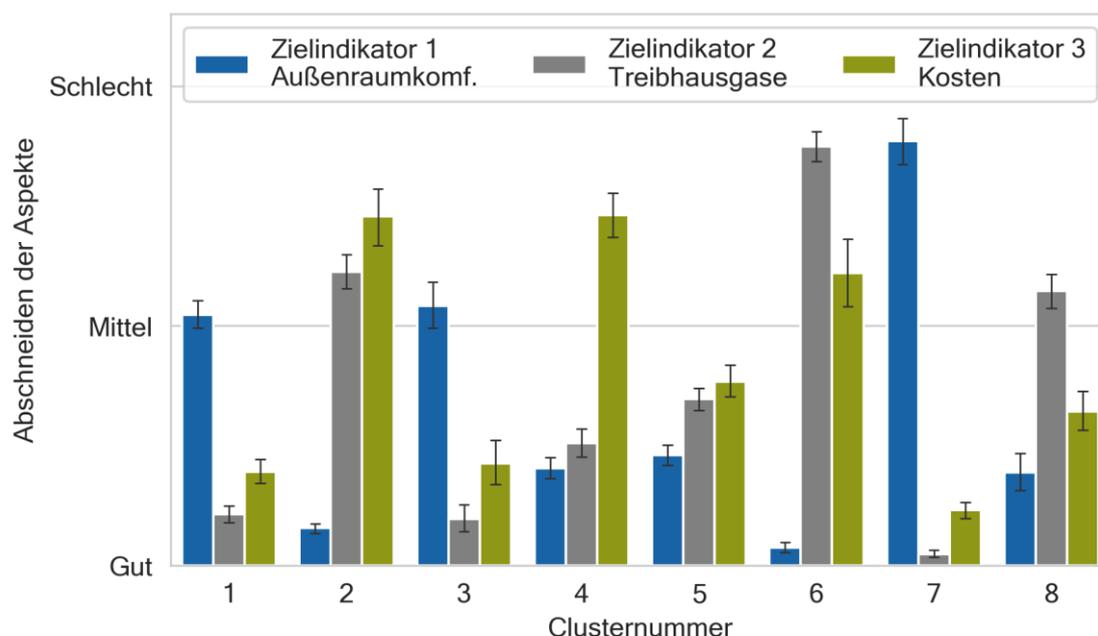


€ je m^2	Max	1.982
	Mittel	1.914
	Min	1.866



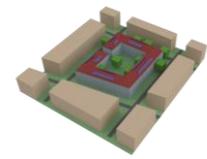
Steuerung von Zielkonflikten

Nachdem ein allgemeiner Eindruck zu den vorherrschenden Zielkonflikten und deren Spannweiten gegeben wurde, ermöglichen die folgenden Darstellungen die gezielte Ansteuerung eines Bereichs (im Folgenden auch Cluster genannt). Dadurch können Schwerpunkte für einen oder mehrere der drei Aspekte gesetzt oder eine möglichst ausgeglichene Variante verfolgt werden. Die Streuung der jeweiligen Zielaspekte wird durch die Fehlerbalken angezeigt. Die Wertebereiche der zugehörigen Planungsvariablen sind auf den nachfolgenden Seiten wiedergegeben.



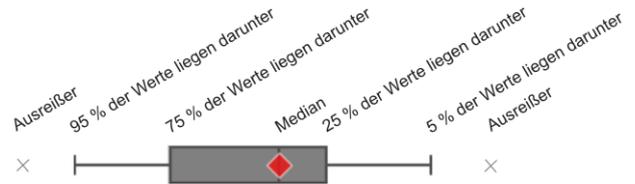
Qualitativ lassen sich folgende Charakterisierungen zusammenfassen:

Cluster	Beschreibung
5, 8	Ausgeglichene, allerdings bei keinem der Aspekte am besten.
2	Sehr gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Die Treibhausgasemissionen werden gegenüber den Lebenszykluskosten priorisiert.
6	Sehr gutes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort. Die Lebenszykluskosten werden gegenüber den Treibhausgasemissionen priorisiert.
4	Gutes Abschneiden bei den Treibhausgasemissionen und beim thermischen Außenraumkomfort. Die Lebenszykluskosten schneiden unterdurchschnittlich ab.
1, 3, 7	Sehr gut bei Treibhausgasemissionen und Lebenszykluskosten, allerdings mäßiges bis schlechtes Abschneiden beim thermischen Außenraumkomfort.

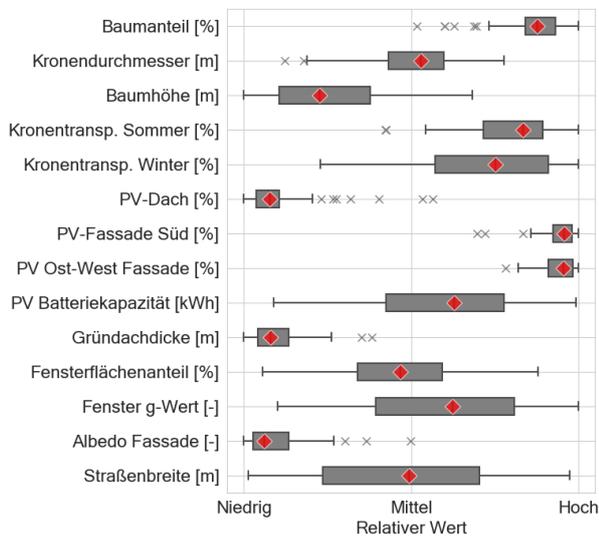


Planungsvariablen der Cluster

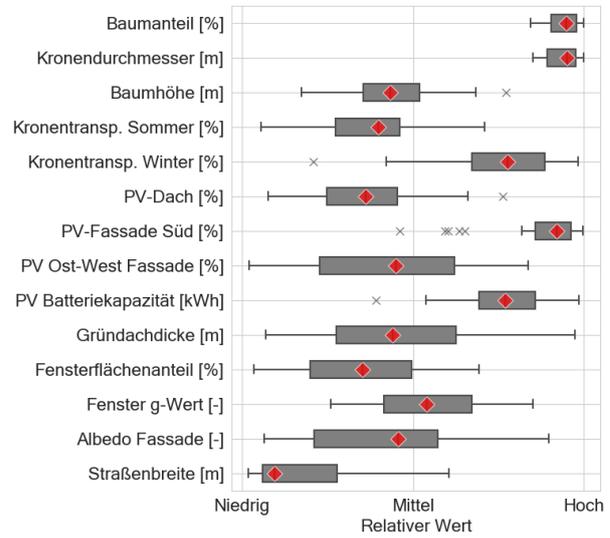
Die nachfolgend angegebenen Wertebereiche beziehen sich auf die Cluster der vorherigen Seite. Nach Auswahl eines Clusters können hier die zugehörigen Ausprägungen der Planungsvariablen auf einer qualitativen Skala abgelesen werden. Zudem geben die Darstellungen Aufschluss über den Spielraum jeder Variable. Bei großen Spannweiten ist der jeweilige Parameter nicht entscheidend für die Erreichung des beabsichtigten Clusters und kann freier gewählt bzw. mit weniger strikten Vorgaben versehen werden. Enge Spannweiten deuten hingegen auf Variablen hin, die mit einem geringeren Spielraum versehen werden sollten.



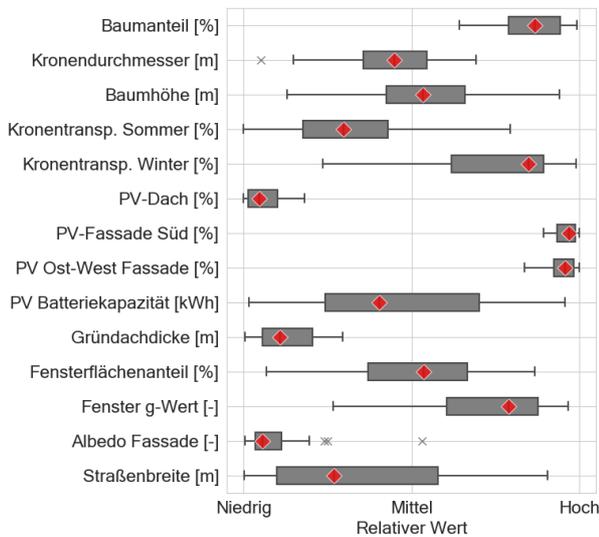
Cluster 1



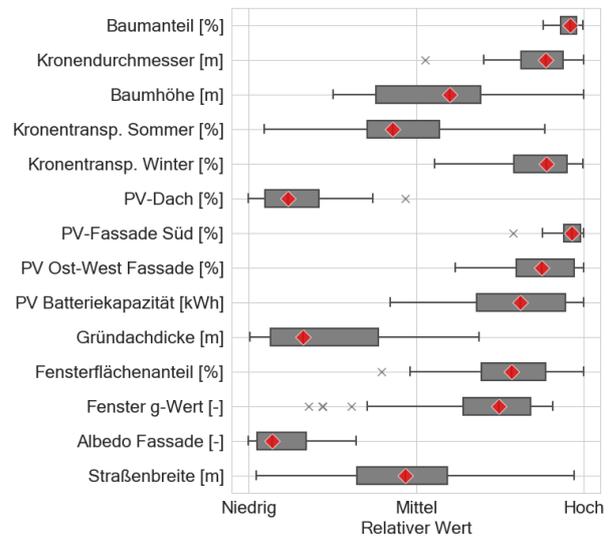
Cluster 2

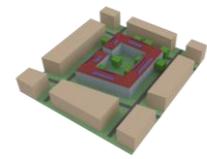


Cluster 3



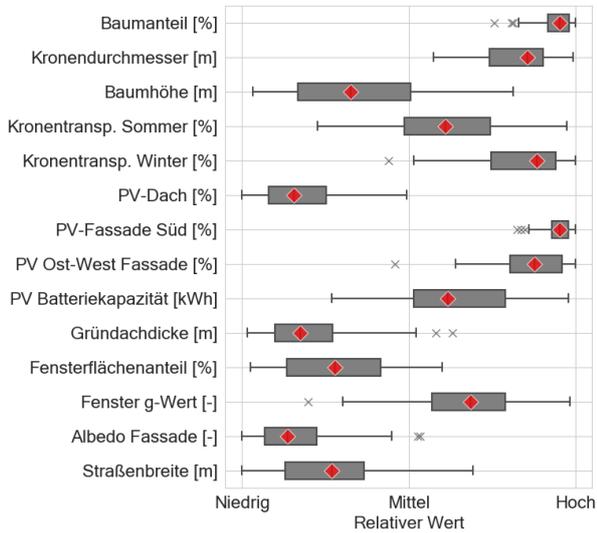
Cluster 4



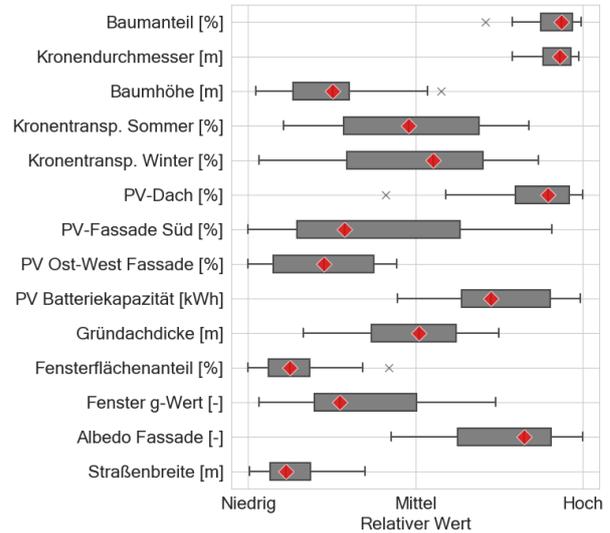


Designparameter der Cluster (Fortsetzung)

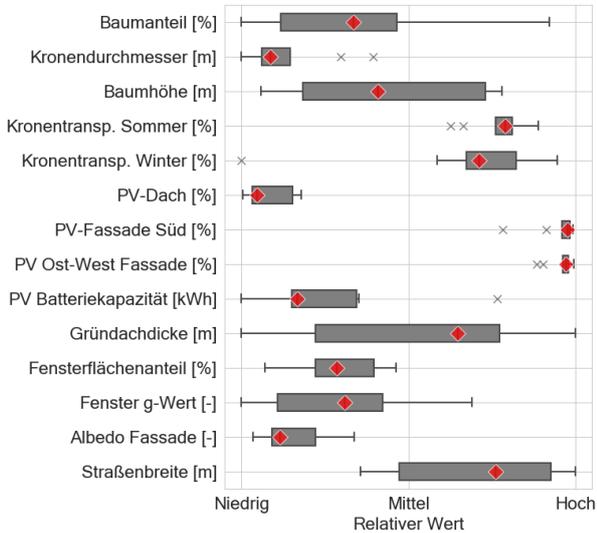
Cluster 5



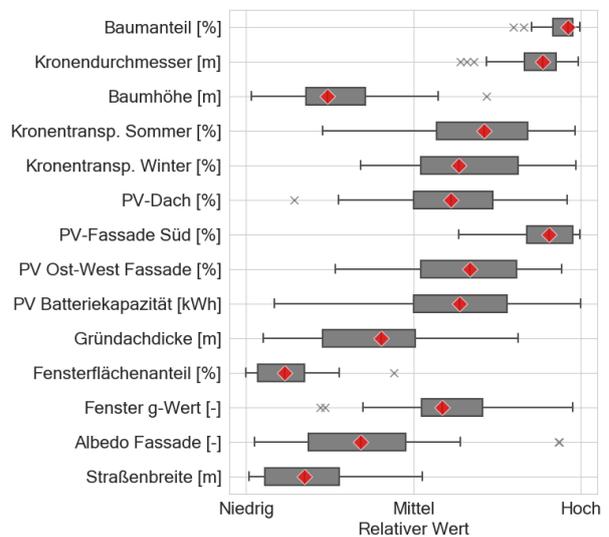
Cluster 6

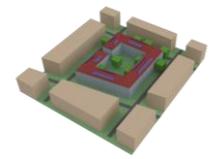


Cluster 7



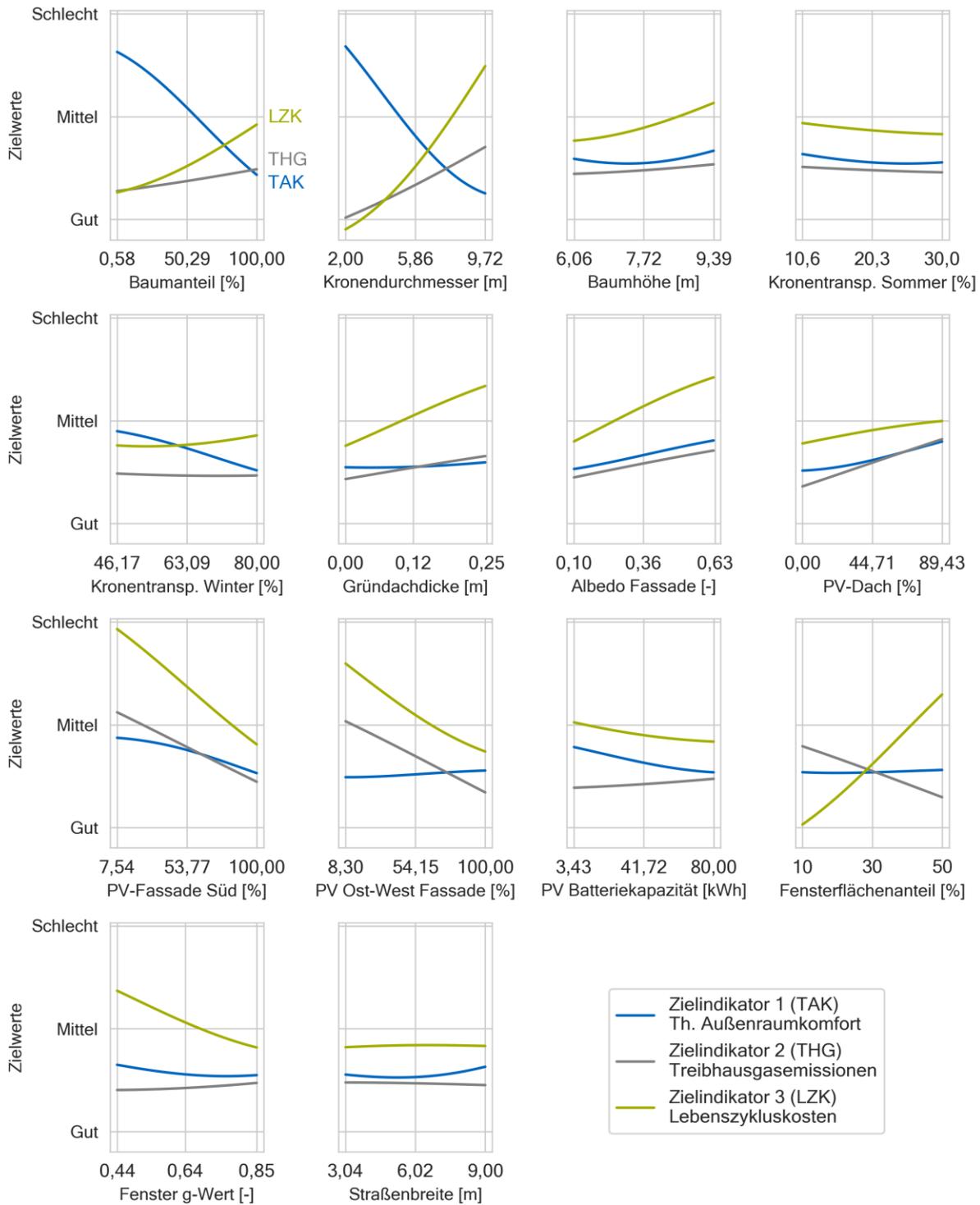
Cluster 8





Auswirkungen von Planungsvariablen auf die Zielaspekte

Nachfolgende Abbildung gibt einen qualitativen Eindruck zur Veränderung der Zielaspekte (**Thermischer Außenraumkomfort**, **Treibhausgasemissionen**, **Lebenszykluskosten**) bei der Änderung einzelner Planungsvariablen. Dadurch können die Auswirkung jeder Stellschraube auf die drei Zieldimensionen im Einzelnen eingeschätzt werden. Bleiben Linien annähernd horizontal, deutet dies auf wenig Einfluss der betrachteten Variable hin. Linien mit hoher Steigung verändern ihre Werte dagegen stark, wenn an den einzelnen Variablen Änderungen vorgenommen werden.



E Anhang - Datentabellen zu den Quartiersteckbriefen

Dieser Anhang enthält die in den Quartiersteckbriefen qualitativ dargestellten Daten in quantitativer Form. Wie in Kapitel 5 geschildert (sh. Seite 87), dienen diese als Unterstützung zur Umsetzung der multikriteriell optimierten Stadtplanung in Wettbewerbs- und Bauleitplanverfahren. Die Tabellen geben jeweils das 25 % Quartil, den Median sowie das 75 % Quartil der Designvariablen an und sind als Ergänzung zu den in Anhang D enthaltenen Quartiersteckbriefen zu verwenden (sh. Seite 158).

Inhalt des Anhangs E:

1. Datentabelle: Zeilenbebauung
2. Datentabelle: Punktbebauung
3. Datentabelle: Blockbebauung

Cluster 1

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	65,88	73,63	80,59
Kronendurchmesser [m]	7,22	8,39	8,71
Baumhöhe [m]	7,54	8,20	8,81
Kronentransp. Sommer [%]	20,68	23,86	26,95
Kronentransp. Winter [%]	58,78	73,73	76,12
PV-Dach [%]	51,84	68,20	85,20
PV-Fassade Süd [%]	29,19	46,85	61,43
PV Ost-West Fassade [%]	83,85	91,62	96,26
PV Batteriekapazität [kWh]	10,39	22,94	32,06
Gründachdicke [m]	0,10	0,15	0,18
Fensterflächenanteil [%]	40,05	45,85	47,58
Fenster g-Wert [-]	0,49	0,55	0,65
Albedo Fassade [-]	0,33	0,51	0,56
Straßenbreite [m]	3,99	4,35	5,03

Cluster 2

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	56,52	67,62	79,15
Kronendurchmesser [m]	4,26	4,75	5,58
Baumhöhe [m]	7,21	7,73	8,31
Kronentransp. Sommer [%]	19,47	22,93	25,05
Kronentransp. Winter [%]	58,59	61,36	66,43
PV-Dach [%]	81,03	86,05	95,58
PV-Fassade Süd [%]	32,88	40,16	48,92
PV Ost-West Fassade [%]	85,95	91,78	94,27
PV Batteriekapazität [kWh]	28,36	34,50	49,40
Gründachdicke [m]	0,03	0,07	0,12
Fensterflächenanteil [%]	13,24	16,29	21,64
Fenster g-Wert [-]	0,78	0,80	0,82
Albedo Fassade [-]	0,47	0,55	0,58
Straßenbreite [m]	3,37	3,61	4,03

Cluster 3

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	69,49	81,69	88,93
Kronendurchmesser [m]	5,31	6,20	6,71
Baumhöhe [m]	7,75	8,03	9,06
Kronentransp. Sommer [%]	23,75	26,05	27,80
Kronentransp. Winter [%]	56,45	61,76	71,06
PV-Dach [%]	55,01	70,57	89,37
PV-Fassade Süd [%]	54,18	75,88	85,68
PV Ost-West Fassade [%]	83,25	91,87	97,50
PV Batteriekapazität [kWh]	16,44	28,61	37,63
Gründachdicke [m]	0,03	0,08	0,11
Fensterflächenanteil [%]	33,87	39,04	43,90
Fenster g-Wert [-]	0,68	0,73	0,78
Albedo Fassade [-]	0,20	0,34	0,40
Straßenbreite [m]	3,97	5,09	5,76

Cluster 4

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	13,82	20,73	30,37
Kronendurchmesser [m]	3,91	4,56	5,24
Baumhöhe [m]	7,94	8,36	8,66
Kronentransp. Sommer [%]	21,41	23,22	25,67
Kronentransp. Winter [%]	52,65	58,67	61,77
PV-Dach [%]	81,70	87,33	94,49
PV-Fassade Süd [%]	58,49	67,55	74,53
PV Ost-West Fassade [%]	94,42	96,68	98,32
PV Batteriekapazität [kWh]	20,30	26,43	35,13
Gründachdicke [m]	0,01	0,02	0,04
Fensterflächenanteil [%]	36,98	43,67	46,88
Fenster g-Wert [-]	0,82	0,83	0,84
Albedo Fassade [-]	0,31	0,39	0,49
Straßenbreite [m]	3,45	3,76	4,48

Cluster 5

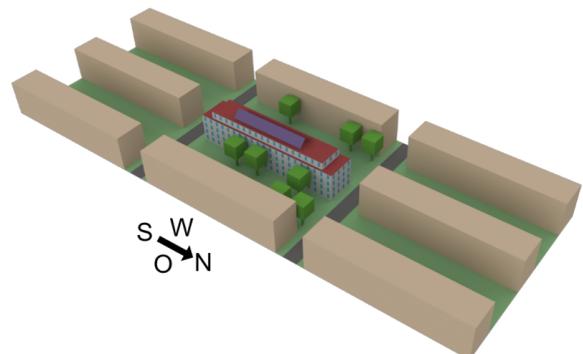
	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	45,03	60,18	71,17
Kronendurchmesser [m]	4,63	5,16	5,63
Baumhöhe [m]	7,64	8,08	8,65
Kronentransp. Sommer [%]	23,93	26,11	27,04
Kronentransp. Winter [%]	58,54	64,70	71,26
PV-Dach [%]	77,40	85,34	91,52
PV-Fassade Süd [%]	49,30	69,98	77,78
PV Ost-West Fassade [%]	86,85	92,49	96,91
PV Batteriekapazität [kWh]	8,88	15,99	21,69
Gründachdicke [m]	0,02	0,04	0,08
Fensterflächenanteil [%]	36,95	41,66	45,29
Fenster g-Wert [-]	0,77	0,80	0,82
Albedo Fassade [-]	0,42	0,50	0,56
Straßenbreite [m]	3,63	4,21	4,59

Cluster 6

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	67,11	77,88	90,76
Kronendurchmesser [m]	6,18	6,86	7,64
Baumhöhe [m]	7,72	8,11	8,78
Kronentransp. Sommer [%]	19,79	21,78	26,44
Kronentransp. Winter [%]	63,39	68,61	73,29
PV-Dach [%]	66,32	84,42	91,54
PV-Fassade Süd [%]	25,08	33,23	52,93
PV Ost-West Fassade [%]	64,61	76,41	91,48
PV Batteriekapazität [kWh]	17,90	36,12	42,92
Gründachdicke [m]	0,05	0,11	0,13
Fensterflächenanteil [%]	12,91	15,01	19,79
Fenster g-Wert [-]	0,63	0,67	0,75
Albedo Fassade [-]	0,46	0,54	0,59
Straßenbreite [m]	4,33	5,28	6,95

Cluster 7

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	66,17	76,99	85,83
Kronendurchmesser [m]	5,15	5,59	6,20
Baumhöhe [m]	6,63	7,33	7,70
Kronentransp. Sommer [%]	13,44	17,51	21,32
Kronentransp. Winter [%]	59,47	63,50	68,05
PV-Dach [%]	89,85	93,70	96,91
PV-Fassade Süd [%]	20,41	28,30	45,81
PV Ost-West Fassade [%]	25,15	44,47	61,39
PV Batteriekapazität [kWh]	58,27	63,87	68,68
Gründachdicke [m]	0,05	0,11	0,15
Fensterflächenanteil [%]	11,17	13,09	15,53
Fenster g-Wert [-]	0,74	0,78	0,82
Albedo Fassade [-]	0,42	0,52	0,60
Straßenbreite [m]	3,63	3,95	4,83



Cluster 1

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	49,22	55,48	63,99
Kronendurchmesser [m]	8,34	9,12	9,52
Baumhöhe [m]	6,88	7,59	7,75
Kronentransp. Sommer [%]	21,71	22,98	26,43
Kronentransp. Winter [%]	66,11	68,75	72,35
PV-Dach [%]	35,52	46,76	62,33
PV-Fassade Süd [%]	64,32	74,31	91,91
PV Ost-West Fassade [%]	86,22	93,89	97,40
PV Batteriekapazität [kWh]	5,05	17,42	29,93
Gründachdicke [m]	0,01	0,02	0,04
Fensterflächenanteil [%]	33,10	35,93	40,03
Fenster g-Wert [-]	0,60	0,64	0,69
Albedo Fassade [-]	0,28	0,36	0,39
Straßenbreite [m]	6,18	7,25	8,00

Cluster 2

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	11,88	18,28	26,22
Kronendurchmesser [m]	8,53	9,34	9,58
Baumhöhe [m]	7,13	8,15	8,47
Kronentransp. Sommer [%]	21,28	22,78	26,16
Kronentransp. Winter [%]	56,29	59,83	65,93
PV-Dach [%]	49,42	69,45	76,62
PV-Fassade Süd [%]	73,35	84,41	93,13
PV Ost-West Fassade [%]	92,25	96,73	98,78
PV Batteriekapazität [kWh]	18,02	30,77	40,31
Gründachdicke [m]	0,01	0,03	0,04
Fensterflächenanteil [%]	31,24	38,60	43,16
Fenster g-Wert [-]	0,72	0,77	0,81
Albedo Fassade [-]	0,31	0,38	0,49
Straßenbreite [m]	6,70	7,53	8,29

Cluster 3

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	46,43	50,64	55,13
Kronendurchmesser [m]	8,69	9,18	9,42
Baumhöhe [m]	6,50	6,77	7,19
Kronentransp. Sommer [%]	20,21	22,76	25,24
Kronentransp. Winter [%]	66,75	70,69	72,20
PV-Dach [%]	60,54	68,95	79,87
PV-Fassade Süd [%]	82,52	90,39	95,71
PV Ost-West Fassade [%]	76,90	82,52	92,44
PV Batteriekapazität [kWh]	13,72	21,39	29,55
Gründachdicke [m]	0,01	0,02	0,03
Fensterflächenanteil [%]	16,97	24,02	26,93
Fenster g-Wert [-]	0,69	0,75	0,79
Albedo Fassade [-]	0,22	0,28	0,36
Straßenbreite [m]	5,42	6,01	6,49

Cluster 4

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	29,50	35,20	40,73
Kronendurchmesser [m]	8,51	8,98	9,52
Baumhöhe [m]	6,69	6,90	7,53
Kronentransp. Sommer [%]	18,47	21,53	23,19
Kronentransp. Winter [%]	64,00	66,65	71,69
PV-Dach [%]	65,89	79,54	87,16
PV-Fassade Süd [%]	59,48	68,29	86,53
PV Ost-West Fassade [%]	78,93	89,96	95,80
PV Batteriekapazität [kWh]	3,27	8,81	19,81
Gründachdicke [m]	0,01	0,05	0,08
Fensterflächenanteil [%]	15,39	17,65	21,03
Fenster g-Wert [-]	0,72	0,75	0,80
Albedo Fassade [-]	0,36	0,43	0,49
Straßenbreite [m]	5,04	5,71	6,59

Cluster 5

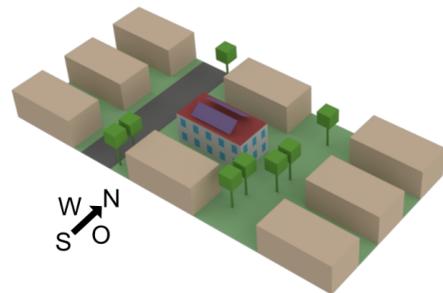
	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	43,07	51,86	56,60
Kronendurchmesser [m]	9,05	9,41	9,67
Baumhöhe [m]	6,38	6,75	7,16
Kronentransp. Sommer [%]	17,35	18,19	20,65
Kronentransp. Winter [%]	67,64	70,55	72,62
PV-Dach [%]	55,65	62,73	81,17
PV-Fassade Süd [%]	30,50	48,09	75,29
PV Ost-West Fassade [%]	37,61	49,61	64,95
PV Batteriekapazität [kWh]	6,80	11,88	20,41
Gründachdicke [m]	0,01	0,02	0,03
Fensterflächenanteil [%]	11,25	11,56	13,16
Fenster g-Wert [-]	0,68	0,73	0,79
Albedo Fassade [-]	0,18	0,24	0,28
Straßenbreite [m]	4,24	4,66	5,65

Cluster 6

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	31,83	36,41	40,16
Kronendurchmesser [m]	7,62	8,64	9,16
Baumhöhe [m]	6,55	6,90	7,49
Kronentransp. Sommer [%]	22,96	24,21	26,24
Kronentransp. Winter [%]	62,37	67,02	70,59
PV-Dach [%]	61,72	71,42	82,58
PV-Fassade Süd [%]	83,19	90,28	95,07
PV Ost-West Fassade [%]	87,68	93,80	96,87
PV Batteriekapazität [kWh]	4,34	12,39	22,37
Gründachdicke [m]	0,01	0,03	0,06
Fensterflächenanteil [%]	30,13	34,66	40,03
Fenster g-Wert [-]	0,71	0,77	0,80
Albedo Fassade [-]	0,40	0,45	0,51
Straßenbreite [m]	6,05	6,71	7,54

Cluster 7

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	4,16	7,35	14,50
Kronendurchmesser [m]	5,78	7,27	8,85
Baumhöhe [m]	6,79	7,28	7,86
Kronentransp. Sommer [%]	24,34	25,92	28,74
Kronentransp. Winter [%]	56,23	58,40	61,63
PV-Dach [%]	57,57	67,75	80,47
PV-Fassade Süd [%]	69,39	84,63	91,35
PV Ost-West Fassade [%]	94,78	97,64	99,02
PV Batteriekapazität [kWh]	6,02	8,82	13,28
Gründachdicke [m]	0,06	0,08	0,11
Fensterflächenanteil [%]	33,68	39,13	42,94
Fenster g-Wert [-]	0,73	0,75	0,79
Albedo Fassade [-]	0,27	0,32	0,45
Straßenbreite [m]	5,56	6,26	7,05



Cluster 1

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	84,28	87,78	93,25
Kronendurchmesser [m]	5,34	6,08	6,61
Baumhöhe [m]	6,41	6,81	7,31
Kronentransp. Sommer [%]	24,48	26,78	27,92
Kronentransp. Winter [%]	65,50	71,56	76,97
PV-Dach [%]	3,39	6,93	9,35
PV-Fassade Süd [%]	93,01	96,09	98,33
PV Ost-West Fassade [%]	91,67	95,85	98,39
PV Batteriekapazität [kWh]	35,99	51,57	62,89
Gründachdicke [m]	0,01	0,02	0,03
Fensterflächenanteil [%]	23,55	28,70	33,70
Fenster g-Wert [-]	0,60	0,70	0,77
Albedo Fassade [-]	0,11	0,13	0,17
Straßenbreite [m]	4,45	5,98	7,24

Cluster 2

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	90,42	95,02	98,00
Kronendurchmesser [m]	8,90	9,34	9,54
Baumhöhe [m]	7,24	7,50	7,79
Kronentransp. Sommer [%]	15,93	18,33	19,55
Kronentransp. Winter [%]	68,92	72,43	76,12
PV-Dach [%]	22,27	32,31	40,58
PV-Fassade Süd [%]	86,86	92,74	96,52
PV Ost-West Fassade [%]	29,20	49,50	65,35
PV Batteriekapazität [kWh]	56,60	62,35	69,11
Gründachdicke [m]	0,07	0,11	0,15
Fensterflächenanteil [%]	17,98	24,12	29,85
Fenster g-Wert [-]	0,61	0,66	0,72
Albedo Fassade [-]	0,21	0,34	0,40
Straßenbreite [m]	3,39	3,61	4,70

Cluster 3

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	79,03	86,70	94,32
Kronendurchmesser [m]	4,76	5,47	6,21
Baumhöhe [m]	7,47	7,84	8,25
Kronentransp. Sommer [%]	14,02	16,36	18,93
Kronentransp. Winter [%]	67,12	74,84	76,39
PV-Dach [%]	1,22	4,12	9,02
PV-Fassade Süd [%]	93,85	97,09	98,99
PV Ost-West Fassade [%]	93,04	96,02	98,42
PV Batteriekapazität [kWh]	21,97	34,31	57,19
Gründachdicke [m]	0,01	0,03	0,05
Fensterflächenanteil [%]	24,85	31,43	36,68
Fenster g-Wert [-]	0,69	0,76	0,80
Albedo Fassade [-]	0,12	0,13	0,16
Straßenbreite [m]	3,63	4,65	6,48

Cluster 4

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	93,18	95,90	97,87
Kronendurchmesser [m]	8,28	8,85	9,25
Baumhöhe [m]	7,32	8,06	8,36
Kronentransp. Sommer [%]	17,47	18,95	21,67
Kronentransp. Winter [%]	72,92	76,19	78,34
PV-Dach [%]	4,31	10,55	18,84
PV-Fassade Süd [%]	94,48	96,79	99,06
PV Ost-West Fassade [%]	81,52	88,45	97,48
PV Batteriekapazität [kWh]	55,59	65,43	75,80
Gründachdicke [m]	0,02	0,04	0,10
Fensterflächenanteil [%]	37,79	41,41	45,46
Fenster g-Wert [-]	0,70	0,75	0,78
Albedo Fassade [-]	0,11	0,14	0,19
Straßenbreite [m]	4,96	5,83	6,58

Cluster 5

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	91,71	95,14	97,94
Kronendurchmesser [m]	7,73	8,59	8,96
Baumhöhe [m]	6,61	7,14	7,74
Kronentransp. Sommer [%]	20,04	22,42	25,03
Kronentransp. Winter [%]	71,41	76,05	77,93
PV-Dach [%]	7,01	13,83	22,55
PV-Fassade Süd [%]	93,38	95,46	97,96
PV Ost-West Fassade [%]	81,93	88,59	96,10
PV Batteriekapazität [kWh]	42,75	50,60	63,82
Gründachdicke [m]	0,02	0,04	0,07
Fensterflächenanteil [%]	15,34	21,08	26,57
Fenster g-Wert [-]	0,67	0,72	0,76
Albedo Fassade [-]	0,14	0,17	0,22
Straßenbreite [m]	3,81	4,64	5,22

Cluster 6

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	87,56	93,66	97,01
Kronendurchmesser [m]	8,80	9,19	9,44
Baumhöhe [m]	6,50	6,89	7,06
Kronentransp. Sommer [%]	16,15	19,88	23,97
Kronentransp. Winter [%]	56,16	64,84	69,89
PV-Dach [%]	71,34	80,05	85,74
PV-Fassade Süd [%]	21,02	34,04	66,07
PV Ost-West Fassade [%]	15,07	28,96	42,73
PV Batteriekapazität [kWh]	52,29	59,04	72,52
Gründachdicke [m]	0,09	0,13	0,15
Fensterflächenanteil [%]	12,39	14,98	17,36
Fenster g-Wert [-]	0,52	0,55	0,65
Albedo Fassade [-]	0,43	0,53	0,58
Straßenbreite [m]	3,44	3,71	4,14

Cluster 7

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	12,35	33,96	46,93
Kronendurchmesser [m]	2,48	2,66	3,12
Baumhöhe [m]	6,67	7,41	8,49
Kronentransp. Sommer [%]	25,35	25,91	26,34
Kronentransp. Winter [%]	68,94	70,23	74,02
PV-Dach [%]	2,92	4,14	13,78
PV-Fassade Süd [%]	96,27	97,89	98,36
PV Ost-West Fassade [%]	96,43	97,31	98,08
PV Batteriekapazität [kWh]	15,00	16,22	29,85
Gründachdicke [m]	0,05	0,16	0,19
Fensterflächenanteil [%]	18,84	21,42	25,88
Fenster g-Wert [-]	0,48	0,57	0,61
Albedo Fassade [-]	0,15	0,16	0,22
Straßenbreite [m]	5,86	7,57	8,56

Cluster 8

	25 %	Median	75 %
Baumanteil [%]	91,86	96,15	97,66
Kronendurchmesser [m]	8,42	8,84	9,16
Baumhöhe [m]	6,66	6,87	7,25
Kronentransp. Sommer [%]	21,66	24,38	26,91
Kronentransp. Winter [%]	63,80	67,68	73,70
PV-Dach [%]	44,78	54,73	65,85
PV-Fassade Süd [%]	85,13	91,23	97,76
PV Ost-West Fassade [%]	56,11	69,70	82,36
PV Batteriekapazität [kWh]	41,85	52,35	63,22
Gründachdicke [m]	0,06	0,10	0,12
Fensterflächenanteil [%]	11,42	14,61	16,96
Fenster g-Wert [-]	0,66	0,68	0,73
Albedo Fassade [-]	0,20	0,28	0,35
Straßenbreite [m]	3,38	4,09	4,70

