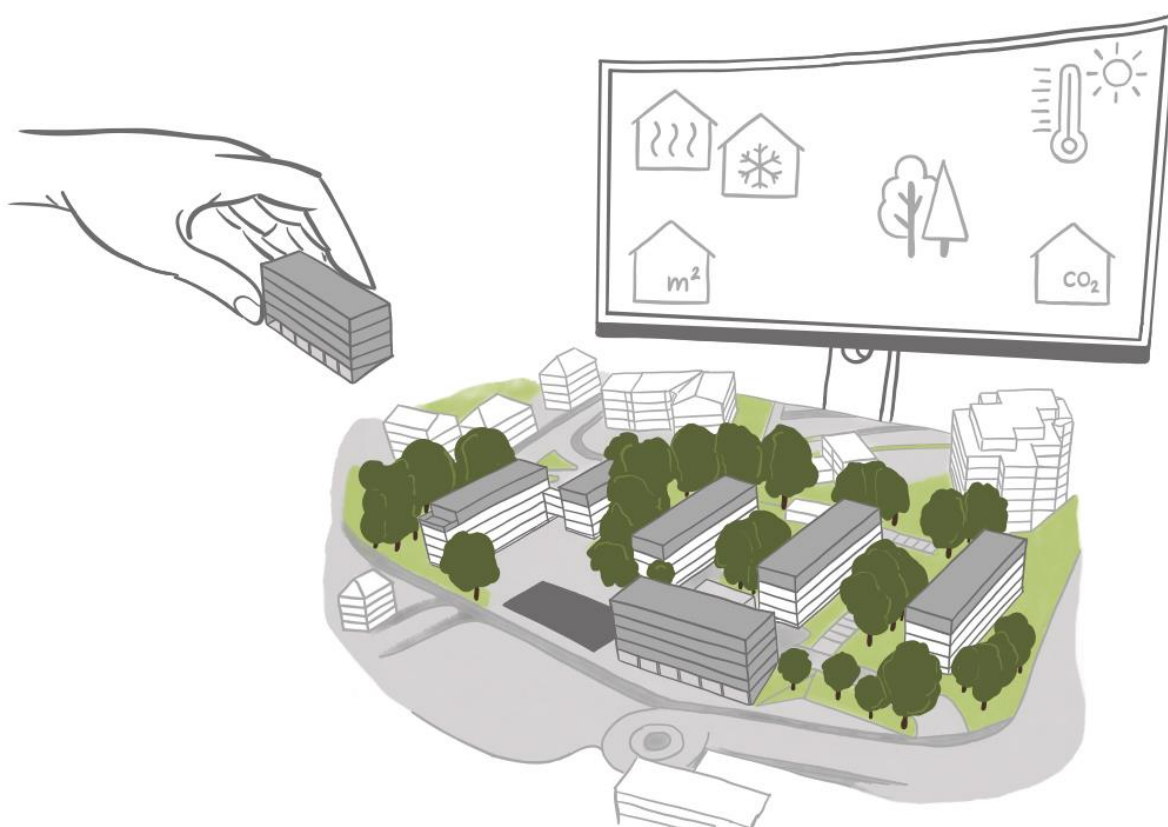


# Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung

## Teilprojekt 11: Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels

### Schlussbericht



Technische Universität München

Arcisstraße 21  
80333 München  
Tel.: +49 89 289 23990  
Fax: +49 89 289 23991  
E-Mail: sekretariat.enpb.bgu@tum.de

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK)  
TP 11: Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels

Gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz

Abgabe: München, 20. Dezember 2022


**Verfasser:innen**

Farzan Banihashemi  
Sabrina Erlwein  
Jakob Fellner  
Juliane Meister  
Roland Reitberger  
Carsten Schade

**Wissenschaftliche Hilfskräfte**


Theresa Demel  
Ruxandra-Ioana Eftenie  
Andrés Espinosa  
Laura Lerner

**Wissenschaftliche Leitung**




---

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang



---

Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit



---

Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

**Zitierweise**

Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung – ZSK (2022): *Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels – Schlussbericht*. Online verfügbar unter <https://www.zsk.tum.de/zsk/die-teilprojekte-des-zsk/abgeschlossene-projekte/nachverdichtung-im-kontext-des-klimawandels/>

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	6
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	10
Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels.....	11
1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	11
2 Voraussetzungen und Ablauf der Arbeiten .....	13
3 Grundlagen.....	15
3.1 Nachverdichtung als Konzept der Quartiersentwicklung.....	15
3.1.1 Formen der baulichen Nachverdichtung und Siedlungscharakteristik .	15
3.1.2 Bau- und planungsrechtliche Rahmenbedingungen bei Nachverdichtungsvorhaben.....	17
3.1.3 Datenbank kommunaler Stadtplanungsstrategien.....	18
3.2 Klimaschutz und Klimaanpassung bei Nachverdichtungsvorhaben .....	20
3.2.1 Mikroklimatische Auswirkungen und Potenziale zur Klimaanpassung	20
3.2.2 Klimaschutz bei Nachverdichtungsvorhaben.....	21
3.2.3 Kühlfunktion von Stadtgrün bei Nachverdichtungsvorhaben .....	22
3.3 Kollaborative Planung .....	25
3.3.1 Anwendungsfelder .....	25
3.3.2 Bestehende digitale Planungsmethoden.....	26
3.3.3 Vorarbeiten COLLABORATIVE DESIGN PLATFORM.....	27
3.3.4 Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte.....	28
4 Anforderungen und Erprobung des Planungstools .....	29
4.1 Analyse der Anforderungen an die CDP .....	29
4.1.1 Onlinebefragung.....	29
4.1.2 Expert:inneninterviews .....	29
4.1.3 Ermittelte Anwendungsbereiche der CDP.....	31
4.1.4 Zwischenfazit Anforderungen CDP .....	35
4.2 Erprobung des Planungstools in Workshops .....	35
4.2.1 Interner Workshop mit Projektteam.....	37
4.2.2 Externer Workshop mit Expert:innen aus der Praxis.....	38
4.2.3 Ergebnisse des externen Workshops.....	38
5 Weiterentwicklung des Planungstools .....	40
5.1 Methodenentwicklung Außenraum.....	40

5.1.1	Vorberechnung und Überlagerung von Verschattungsvoxeln .....	40
5.1.2	Integration der Evapotranspiration .....	43
5.1.3	Bewertung des thermischen Außenraumkomforts .....	45
5.2	Methodenentwicklung Komfort und Energie.....	46
5.2.1	Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse Klimamodelle .....	47
5.2.2	Aufbau Energie- / Innenraummodell.....	48
5.2.3	Validierung des Energiemodells.....	50
5.3	Kombination von Energie- und Voxelmethode .....	51
5.3.1	Einfluss der Lage der Verschattungsfläche.....	51
5.3.2	Vergleich von Transparenz und Verschattung .....	52
5.3.3	Informationsaustausch zwischen Voxelmethode und Energiemodell..	54
5.4	Methodenentwicklung ökologische Lebenszyklusanalyse.....	55
5.4.1	Methodik und Systemgrenzen.....	55
5.4.2	Aufbau der Datengrundlage für Baukonstruktion .....	56
5.4.3	Aufbau der Datengrundlage für Sanierungsszenarien .....	58
5.4.4	Lebenszyklusanalyse von Grün .....	62
5.5	Anwendung der CDP .....	67
5.5.1	Anforderungen für die Erweiterung der CDP .....	67
5.5.2	Plug-In zur Übertragung von geometrischen Kennzahlen .....	68
5.5.3	Plug-In für den Datenaustausch und Schnittstellen.....	68
5.5.4	Plug-In für die Dateneingabe.....	69
5.5.5	Darstellung von Analysen und Berechnungsergebnissen .....	69
5.6	Technische Zusammenführung der entwickelten Methoden .....	71
6	Analyse von Nachverdichtungsszenarien .....	74
6.1	Vorstellung der Fallstudie.....	74
6.1.1	Datenverfügbarkeit zur Fallstudie.....	74
6.1.2	Charakteristika von Zeilenbebauungen der 1950er Jahre hinsichtlich Nachverdichtung .....	76
6.1.3	Ziel der Untersuchungen .....	77
6.2	Vorstellung der Szenarien.....	77
6.3	Außenraumkomfort und Tageslichtversorgung .....	79
6.4	Energiebedarfe und Einfluss des Klimawandels .....	83
6.5	Ökobilanzierung .....	88
6.6	Abwägung von Synergien und Kompromissen .....	91

6.7	Grenzen der Untersuchung.....	92
6.8	Übertragbarkeit der Ergebnisse .....	94
7	Abschlusskonferenz des Forschungsprojekts.....	96
8	Fazit und Handlungsempfehlungen .....	100
8.1	Rahmenbedingungen für klimaresiliente Nachverdichtung .....	100
8.2	Einsatz digitaler Werkzeuge in der Quartiersplanung .....	101
8.3	Untersuchung von Nachverdichtungsszenarien .....	102
8.4	Praxistransfer .....	104
9	Ausblick .....	107
	Literaturverzeichnis .....	110
	Abkürzungsverzeichnis .....	124
	Glossar .....	126
	Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts .....	128
	Anhang.....	130

## Kurzfassung

Der anhaltende Zuzug in bayerische Städte geht mit einer gesteigerten Nachfrage nach Wohnraum und hohem Druck auf Freiflächen einher. Parallel dazu steigt die Dringlichkeit von Klimaschutz und Klimaanpassung. Insbesondere die Sicherung und Entwicklung von Grüner Infrastruktur (Vegetation im Freiraum und an Gebäuden) bietet Potenziale zur Verbesserung der Klimaresilienz. Die Flächenkonkurrenz zwischen diesen Handlungsfeldern stellt eine wesentliche Herausforderung für Kommunen und Planer:innen dar.

Das Projekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“ strebt daher die Entwicklung und Erprobung kollaborativer Planungsmethoden für ressourceneffiziente und klimaresiliente Lösungen in der Stadtplanung an. Dafür wurden Anforderungen aus der kommunalen und planerischen Praxis erhoben und ausgewertet. Die praxisorientierte Anwendung wurde durch die Entwicklung neuer Simulationsmethoden sowie deren prototypische Umsetzung in einem vorhandenen Planungswerkzeug evaluiert.

Onlinebefragungen und Interviews haben die große Nachfrage nach einem Entscheidungsunterstützungstool für Planer:innen bestätigt und vier Anwendungsbereiche aufgezeigt: Bereitstellung und Verknüpfung von Informationen, Analyse von Planungsentwürfen, Visualisierung und Simulationsvergleiche von Planungsalternativen. In diesen Anwendungsbereichen wurden neue Simulationsmethoden entwickelt, etwa zur echtzeitnahen Berechnung des thermischen Außenraumkomforts und des Energieverbrauchs von Gebäuden unter Einbezug von Nachbarbebauung und Grüner Infrastruktur. Weiterhin wurden Abstandsflächen, jährliche Sonnenstunden, Klimawandelauswirkungen auf Heiz- und Kühlenergiebedarfe sowie ökologische Lebenszyklusanalysen integriert. Die Umsetzung am Planungstool sowie die praktische Anwendbarkeit wurden im Zuge eines Workshops mit Beteiligten aus der Praxis getestet.

Die aus der Diskussion gewonnenen Erkenntnisse, Sensitivitätsanalysen und die Untersuchung von Nachverdichtungsszenarien sowie ein Leitfaden zur Anwendung digitaler Methoden bei Nachverdichtungsprojekten dienen als übertragbare Ergebnisse. Darüber hinaus wurden eigenständige Simulationsbausteine veröffentlicht, wodurch Nutzung und Weiterentwicklung der Projektergebnisse gestärkt werden. Zudem konnte weiterer Forschungsbedarf auf den Gebieten der Bürger:innenbeteiligung sowie der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Nachverdichtungsmaßnahmen, Gebäudebestand und Außenraum identifiziert werden.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektablauf und Zusammenwirken der Arbeitspakete. ....	12
Abbildung 2: Meilensteinplan des Projekts nach Arbeitspaketen. ....	14
Abbildung 3: Nachverdichtungskategorien (Abbildung nach BBSR 2014). ....	16
Abbildung 4: Beispiele für bau- und planungsrechtliche Rahmenbedingungen auf Bundes-, Länder- und kommunaler Ebene.....	18
Abbildung 5: Übersicht der vorhandenen Strategien in 29 bayerischen Kommunen (Stand Juni 2021).....	19
Abbildung 6: Wirkungsgeflechte im Policy Arrangement Approach (Arts et al. 2006) anhand des Beispiels Landverfügbarkeit.....	24
Abbildung 7: Collaborative Design Platform – etablierte Entwurfswerkzeuge und digitale Analyse nahtlos (z.B. Schattenanalyse im Jahresverlauf) verbunden. ....	28
Abbildung 8: Übersicht der geführten Expert:inneninterviews .....	31
Abbildung 9: Darstellung der vier Anwendungsfelder der CDP basierend auf den Expert:inneninterviews. ....	33
Abbildung 10: Einbezug der Workshops in die CDP Entwicklung. ....	36
Abbildung 11: Eindruck aus dem internen Workshop.....	37
Abbildung 12: Methodik zur Trennung des Simulationsverfahrens in Initialisierungs- und Interaktionsphase. ....	40
Abbildung 13: Erste Validierung der Voxelmethode in einem generischen Stadtquartier.....	41
Abbildung 14: Simulationsgebiet mit variierender Zahl von Verschattungselementen (Bäumen) zur Prüfung der Rechenzeiten der Voxelmethode. ....	42
Abbildung 15: Vergleich der Rechenzeiten eines bestehenden Tools zur Verschattungssimulation und der Voxelmethode. ....	42
Abbildung 16: Vorgehen zur Integration der Evapotranspiration in die Voxelmethode. ....	43
Abbildung 17: Anordnung von Bäumen (grün) zur Validierung der Vorberechnung von Evapotranspiration .....	44
Abbildung 18: Resultierender Temperaturunterschied bei Simulation der Baumanordnung mithilfe der Voxelmethode, Vogelperspektive.....	44
Abbildung 19: Resultierender Temperaturunterschied bei Simulation der Baumanordnung in ENVI-met, Vogelperspektive. ....	44

Abbildung 20: UTCI Ergebnisse aus ENVI-met für das Gebiet Moosach (Ergebnisse aus Erlwein et al., 2021).....	46
Abbildung 21: UTCI Ergebnisse der Voxelmethode für das Gebiet Moosach. ....	46
Abbildung 22: Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse des Urban Weather Generators. ....	48
Abbildung 23: Vergleich verschiedener Simulationsmöglichkeiten zur Ermittlung des Energiebedarfs von Gebäuden. ....	49
Abbildung 24: Zusammenfassung der Methodik zur Energiesimulation als Teil des Planungstools. ....	50
Abbildung 25: Validierungsplots des Energiemodells für 2020 (links: Heizwärmebedarf, rechts: Potenzieller Kühlbedarf). ....	51
Abbildung 26: Parametrische Platzierung einer Verschattungsfläche zur Prüfung des Einflusses der Lage auf den Energiebedarf. ....	52
Abbildung 27: Vorgehensweise zur Prüfung der Hypothese „Verschattung = Transparenz“ zur Vereinfachung der Kontextverschattung im Energiemodell. ....	53
Abbildung 28: Ergebnisse der parametrischen Untersuchung zur Vereinfachung der Kontextverschattung im Energiemodell.....	54
Abbildung 29: Darstellung des Treibhausgaspotenzials nach Baualtersklassen (BAK) und Bauteilen je m <sup>2</sup> Bauteilfläche für die betrachteten Lebenszyklusphasen der Entsorgung (C3 + C4) für Mehrfamilienhäuser.....	57
Abbildung 30: Dämmstoffen und deren benötigte graue Energie (Primärenergie total, PET) pro funktioneller Einheit (Functional Unit – FU). Eigene Darstellung nach (Longo et al., 2019) bzw. (Asdrubali, 2009). ....	59
Abbildung 31: Dämmstoffmaterialien sortiert nach dem Indikator Global Warming Potential (GWP) [kg CO <sub>2</sub> -eq. / m <sup>3</sup> ] für die Lebenszyklusbilanz-Phasen A1-A3, B4, C3-C4. ....	60
Abbildung 32: Dämmstoffmaterialien sortiert nach der Summe des Indikators PENRT [MJ/ m <sup>3</sup> ], Modul A-C.....	61
Abbildung 33: Aufbau des extensiven Gründachs für die Ökobilanzierung, Darstellung nach (FLL, 2018).....	62
Abbildung 34: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -eq. Emissionen für einen beispielhaften Gründachaufbau (extensiv) über 50 Jahre.....	64
Abbildung 35: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -eq. Emissionen für einen beispielhaften Stadtbaum.....	66



Abbildung 36: Darstellung von städtebaulichen Kennwerten, klimatischen Analysen und Simulationsergebnissen mithilfe von Grafana. ....	70
Abbildung 37: Erste Version des Grafana Dashboards. ....	71
Abbildung 38: Systembild entwickelter Methoden zu Energie, Komfort und Ökobilanzierung. ....	72
Abbildung 39: Luftaufnahme Fallstudiengebiet Kempten und angrenzende Nutzungen. ....	75
Abbildung 40: Skizze des Fallstudienquartiers mit notwendigen Abstandsflächen bei Aufstockung aller Wohngebäude (Kühner, 2022). ....	78
Abbildung 41: Erarbeitete Szenarien für den Vergleich verschiedener Bewertungsaspekte. ....	78
Abbildung 42: Ergebnisse des thermischen Außenraumkomforts (UTCI) für den Szenarienvergleich. ....	80
Abbildung 43: Durchschnittliche Sonnenstunden im Januar zwischen zwei Zeilenbauten des Szenarienvergleichs. ....	82
Abbildung 44: Zielkonflikt zwischen thermischen Außenraumkomfort und Tageslicht für Szenarienvergleich. ....	83
Abbildung 45: Energiebedarfe der Szenarien (alle saniert nach GEG) für Heizen und Kühlen im heutigen Klima. ....	85
Abbildung 46: Prozentuale Differenz der Energiebedarfe der Szenarien 2070 zu 2020, jeweils mit saniertem Bestand. ....	86
Abbildung 47: Spezifische Untersuchung des Zeilenschlusses hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf den Kühlenergiebedarf. ....	87
Abbildung 48: Ergebnisse Ökobilanzierung Szenarienvergleich bezogen auf gesamte Nutzfläche des jeweiligen Szenarios. ....	88
Abbildung 49: Klimazonenklassifikation nach Köppen-Geiger für Bayern, erstellt nach (Kottek et al., 2006). ....	94
Abbildung 50: Räumliche Verteilung der Anmeldungen für die Abschlusskonferenz. ....	96
Abbildung 51: Teilnehmergruppen der Abschlussveranstaltung. ....	97
Abbildung 52: Abfrage bekannter Tools im Teilnehmer:innenkreis der Abschlussveranstaltung (je größer eine Antwort erscheint, desto häufiger wurde sie in der Umfrage genannt). ....	98
Abbildung 53: Abfrage bekannter Kennzahlen zur Szenarienbewertung. (je größer eine Antwort erscheint, desto häufiger wurde sie in der Umfrage genannt). ....	98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse des externen Workshops.....	39
Tabelle 2: UTCI und PET Bereiche und jeweiliges Temperaturempfinden (Matzarakis et al., 2015).....	45
Tabelle 3: Verwendete Datengrundlagen für die Erstellung von Neubaukonstruktionen. ....	58
Tabelle 4: Zusammenstellung der zur Ökobilanzierung eines beispielhaften Gründachaufbaus (extensiv) herangezogenen Quellen. ....	63
Tabelle 5: Zusammenstellung der zur Ökobilanzierung eines beispielhaften Stadtbaums herangezogenen Quellen.....	65
Tabelle 6: Eingangsparameter für das Energiemodell zur Bestandsbewertung. ....	84
Tabelle 7: Treibhausgasemissionen der Nachverdichtungsszenarien bezogen auf neu geschaffene Nutzfläche (In graue Emissionen einbezogene LCA – Phasen: A1-3; B4; C3-4). ....	89
Tabelle 8: Qualitative Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem Szenarienvergleich.....	91
Tabelle 9: LCA Datensätze für Global Warming Potenzial (GWP) von Dämmstoffen.....	135
Tabelle 10: LCA Datensätze für erneuerbare Primärenergie (PERT) von Dämmstoffen.....	135
Tabelle 11: LCA Datensätze für nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) von Dämmstoffen.....	135

# Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels

## 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Städte sind aufgrund ihrer Bevölkerungsdichte und der Konzentration von Infrastruktur und überbauter Fläche gegenüber den Folgen des Klimawandels besonders vulnerabel. Das Projekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“ am Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) verfolgt das Ziel, Nachverdichtungsmaßnahmen und Klimaresilienz in Städten zu vereinen. Die Entwicklung von Simulations- und Visualisierungsmethoden auf der Grundlage digitaler 3D-Stadtmodelle soll Kommunen und Städte dabei unterstützen, bauliche Nachverdichtungsmaßnahmen aus einer ganzheitlichen, klimaresilienten und ressourcenschonenden Perspektive zu planen. Mikroklimate-, Energiesimulationen und ökologische Lebenszyklusanalysen (LCA) sowie die Bewertung von Grünflächengestaltung und Materialeinsatz sollten daher in ein Entscheidungsunterstützungstool integriert werden. Die entwickelten Methoden wurden innerhalb des Forschungsprojekts prototypisch, aufbauend auf der Collaborative Design Platform (CDP)<sup>1</sup>, umgesetzt. Ziel der CDP ist es, die gegenwärtige Diskrepanz zwischen den analogen Arbeitsweisen in den frühen Phasen des Architekturentwurfs und dem immer stärkeren Einsatz digitaler Werkzeuge zu überwinden (Schubert, 2014).

Mit der CDP können Nutzer:innen analoge Eingriffe in eine virtuelle Bebauung vornehmen. Deren Auswirkungen auf die Umgebung werden in Echtzeit simuliert, bewertet und in einem digitalen 3D-Modell dargestellt. Die Informationen sowie relevante Kennzahlen für Planungs- und Nachverdichtungsvorhaben werden gebündelt und leicht verständlich visualisiert. Dies ermöglicht eine praxisrelevante Abschätzung von Auswirkungen unterschiedlicher Nachverdichtungsszenarien zusammen mit einer veränderten Freiraumgestaltung auf Klimaschutz (Treibhausgas-Emissionen (THG), Energiebedarf) und Klimaanpassung (Mikroklima, thermischer Komfort im Außenraum). Somit bieten die entwickelten Methoden Planer:innen und Kommunen die Möglichkeit zur Bewertung von Planungsalternativen und erleichtern kommunale Abwägungsprozesse. Die Integration von Schlüsselakteur:innen und eine reibungslose Umsetzung in die Praxis wurden dabei durch Expert:inneninterviews und Workshops gewährleistet.

Die nachfolgende Grafik stellt eine schematische Übersicht der Methodik und der relevanten Inhalte des Projekts dar.

---

<sup>1</sup> Diese Plattform wurde am Lehrstuhl für Architekturinformatik der Technischen Universität München (TUM) entwickelt und dient als Schnittstelle für die zu konzipierenden Plug-Ins.

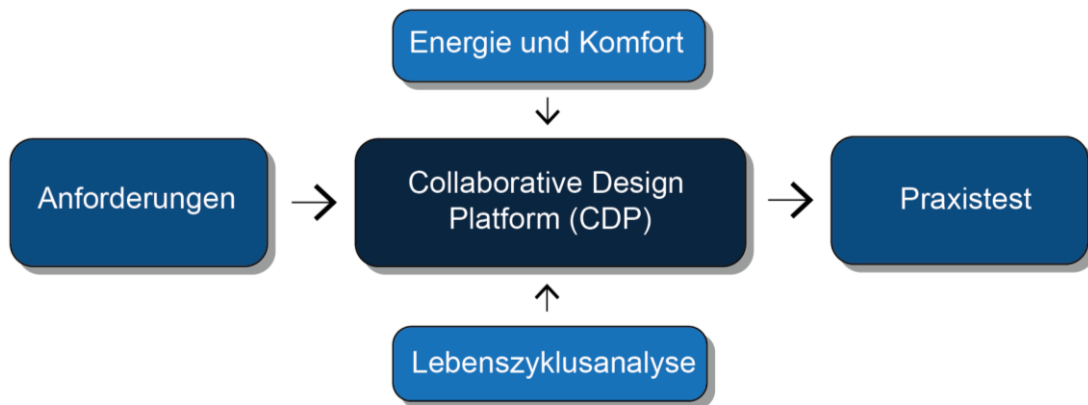


Abbildung 1: Projekttablauf und Zusammenwirken der Arbeitspakete.

Im Mittelpunkt des Projekts stand die Weiterentwicklung des Tools zu einem Instrument, das Klimaresilienz in der Stadtplanung unterstützt. Dazu wurden folgende Schwerpunkte untersucht:

- Rahmenbedingungen für Nachverdichtungsprozesse in Wohnquartieren
- Analyse der Schlüsselakteur:innen und deren Erwartungen
- Anwendungsmöglichkeiten und gewünschte Funktionen eines Entscheidungsunterstützungstools
- Echtzeitsimulationen der Themenbereiche Klimaschutz und Klimaanpassung
- Prototypische Implementierung auf der CDP
- Übertragbarkeit in die Praxis

Die Funktionsweisen der entwickelten Erweiterungen für die CDP wurden im Laufe des Projekts anhand einer Fallstudie untersucht, die einen typischen Nachverdichtungsfall in einer bayerischen Kommune darstellt.

## 2 Voraussetzungen und Ablauf der Arbeiten

Die Fragestellung des Forschungsvorhabens ist wesentlich auf die Vorarbeiten im Teilprojekt 1 (TP 1) „Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt“ am ZSK zurückzuführen (ZSK, 2017) und soll nun mit digitalen Werkzeugen zur Entscheidungsunterstützung verzahnt werden. Dazu konnte neben den Arbeiten am ZSK auch auf Vorarbeiten am Lehrstuhl für Architekturinformatik aufgebaut werden, insbesondere auf das Forschungsprojekt „CDP || Collaborative Design Platform“. Im Rahmen des CDP-Forschungsprojekts wurde eine digitale Plattform konzipiert, die es ermöglichen soll, intuitiv unterschiedliche Planungsstrategien zu entwickeln und anhand verschiedener Kriterien zu vergleichen.

Das TP 1 am ZSK beschäftigte sich mit den Synergieeffekten von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen und stellte die Bedeutung der grünen Infrastruktur sowohl für die Regulationsleistungen im Außenraum als auch für die Auswirkungen auf den thermischen Komfort des Innenraums heraus. Eine besondere Herausforderung stellte in methodischer Hinsicht die automatisierte Kopplung der unterschiedlichen Software für die Simulationen im Außenraum bzw. für den Gebäudeenergiebedarf dar (ZSK, 2017). Auf den hierzu erarbeiteten Erkenntnissen und Anforderungen baut dieses Projekt auf.

Die Durchführung der Arbeiten erfolgte im Rahmen von fünf Arbeitspaketen (APs), deren jeweilige Bearbeiter:innen durch regelmäßige Treffen Inhalte sowie Methoden ausgetauscht haben. Im Folgenden werden die in Abbildung 2 dargestellten Arbeitsinhalte der einzelnen APs erläutert.

In AP 1 wurden die bau- und planungsrechtlichen Rahmenbedingungen für Nachverdichtungsvorhaben ermittelt sowie über eine Onlineumfrage unter bayerischen Kommunen die Bewertung und Steuerung von Nachverdichtung abgefragt. Eine Datenbank mit kommunalen Strategien zu Klimaschutz, Klimaanpassung und Nachverdichtung wurde aufgebaut. Auf der Basis von Expert:inneninterviews mit relevanten Akteur:innen wie Stadt- und Grünplaner:innen konnten in AP 5 die Erwartungen an das Tool ermittelt werden. Nach einer Analyse der dafür notwendigen Handlungsfelder wurde ein interner Workshop durchgeführt. Im Zuge dessen wurden die bisherigen Ergebnisse der einzelnen Aufgabenbereiche und deren Verschränkung besprochen sowie die Anwendung der bis dahin umgesetzten Simulationsbausteine auf der CDP erprobt. Die daraufhin vorgenommenen Anpassungen dienten als Grundlage für den Workshop mit Praxispartner:innen zur Evaluation des Planungstools.

In AP 2 wurden Methoden zur echtzeitnahen Simulation des Innen- und Außenraums entwickelt und die Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und deren Umgebung untersucht. Der Fokus lag dabei auf Energiebedarfen sowie dem thermischen Komfort am Tag. Die notwendige Datengrundlage zur Ökobilanzierung der Baukonstruktion für Bestand und Neubau wurde im Rahmen von AP 3 aufgebaut. Die Bestandsdaten wurden mit Informationen zur Umweltwirkung von Materialien angereichert. Im Neubaubereich wurden typische Konstruktionsaufbauten und Energiestandards

erarbeitet und verschiedene Kombinationsmöglichkeiten im Ökobilanzierungstool eLCA erfasst (BBSR, 2021). Die Integration der Methoden aus AP 2 und 3 erfolgte dabei in Abstimmung mit AP 4, welches sich mit Datenschnittstellen und der Visualisierung auf dem Planungstool auseinandersetzt.

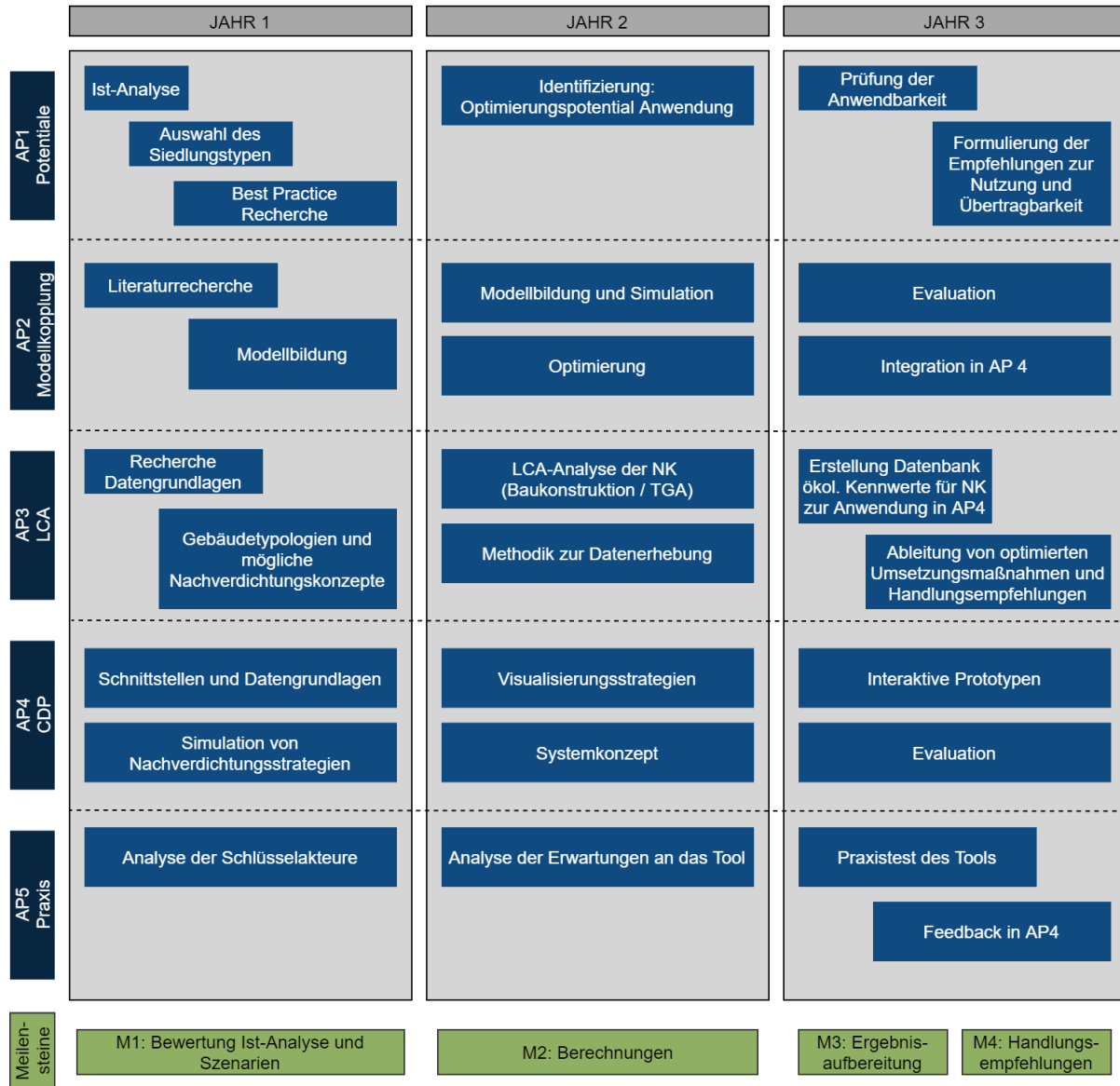


Abbildung 2: Meilensteinplan des Projekts nach Arbeitspaketen.

### 3 Grundlagen

Die folgenden Abschnitte führen in das Thema Nachverdichtung ein und geben einen Überblick über mögliche Formen der baulichen Nachverdichtung, Nachverdichtungspotenziale verschiedener Siedlungstypen, bau- und planungsrechtliche Rahmenbedingungen für Planungsvorhaben sowie Planungsinstrumente und stadtklimatische Auswirkungen von Nachverdichtung.

#### 3.1 Nachverdichtung als Konzept der Quartiersentwicklung

Die Nachhaltigkeitsstrategie der deutschen Bundesregierung mit dem Ziel der Senkung der Flächenneuanspruchnahme auf 30 Hektar pro Tag sowie das Leitbild der doppelten Innenentwicklung stellen die maßgeblichen übergeordneten Leitlinien zur Nachverdichtung in Deutschland dar (Bundesregierung 2016). Doppelte Innenentwicklung impliziert, dass neben einer Priorisierung der Innen- vor Außenentwicklung im Siedlungsbau gleichzeitig eine Sicherung und Qualifizierung der innerörtlichen Grünflächen stattfinden soll. Dadurch sollen Zersiedelung und steigende Emissionen durch größere Distanzen vermieden werden sowie die Lebensqualität innerhalb der Städte erhalten werden (UBA, 2018). Der anhaltend hohe Wohnraumbedarf, Probleme bei dem Zugriff auf Flächen und hohe Grundstückspreise stellen Herausforderungen für Kommunen bei der Umsetzung dieser Leitbilder dar, die ein strategisches Handeln erfordern. Durch eine kompakte Bauweise können Ressourcen effizienter genutzt werden und Außenräume aufgewertet werden (Umweltbundesamt, 2018). Im Zuge des Projektes wird Nachverdichtung als bauliche Nachverdichtung, also als eine bauliche Anpassung oder Änderung des Gebäudebestandes im Außenraum verstanden, wodurch die Bebauungsdichte erhöht wird. Andere Formen der Nachverdichtung, wie eine Änderung der Wohnungszuschnitte oder die Verkleinerung von Wohnungsgrößen, die zu einer erhöhten Bewohner:innendichte führen, standen nicht im Fokus des Projektes. Bauliche Nachverdichtung soll zu einer flächensparenden, energieeffizienten und sozialen Stadtentwicklung beitragen. Dabei müssen die Folgen des Klimawandels berücksichtigt werden.

##### 3.1.1 Formen der baulichen Nachverdichtung und Siedlungscharakteristik

Bei den baulichen Möglichkeiten der Nachverdichtung kann zwischen Aufstockung, Anbau, Blockrandschließung, Verdichtung im Blockinnenbereich und Umstrukturierung unterschieden werden (BBSR, 2014) (s. Abbildung 3). Unter Umstrukturierung ist beispielsweise der Ersatz von Einfamilienhausbebauung durch mehrgeschossige Bauten zu verstehen oder auch die Umwandlung von ehemaligen Militär- oder Bahnflächen in Siedlungsgebiete.

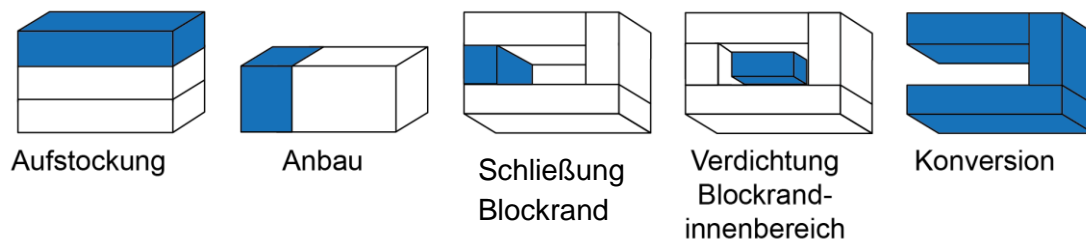


Abbildung 3: Nachverdichtungskategorien (Abbildung nach BBSR 2014).

Eine deutschlandweite Studie zur Ermittlung der Nachverdichtungspotenziale durch Aufstockung ergab, dass bei einem Bestand von 18,24 Mio. Wohngebäuden in Deutschland (Stand 2015) ein Potenzial von 1,1 Mio. zusätzlichen Wohnungen besteht. Dies entspricht 84,2 Mio. m<sup>2</sup> zusätzlicher Wohnfläche und einem vermiedenen Flächenbedarf von 102-246 Mio. m<sup>2</sup> (Tichelmann et al., 2016). In der Studie wurde dabei angenommen, dass die konstruktiven Voraussetzungen zur Aufstockung von Mehrfamilienhäusern aus den 1950er bis 1980er Jahren gegeben sind. Diese Nachverdichtungsform hat den geringsten Flächenverbrauch, ist aber auch am planungsintensivsten, da verhältnismäßig nur wenig Wohnraum auf einmal geschaffen wird. Bei der Nachverdichtung von Bestandsgebäuden weisen innerstädtische Siedlungstypen unterschiedliche Verdichtungspotenziale auf. Zeilenbauten aus den 50er bis 60er Jahren stellen eine häufige Bebauungsstruktur in deutschen Städten dar (ZSK, 2017). Die Anlagen verfügen häufig über eine gute Anbindung an den ÖPNV sowie relativ hohe Grünflächenanteile (bis zu 50 %). In dem Konzept „Langfristige Siedlungsentwicklung“ der Landeshauptstadt München wird ihnen daher ein großes Nachverdichtungspotenzial zugeschrieben (LHM, 2011). Dies deckt sich auch mit Untersuchungen in Berlin (SenStadt, 2016). Das Konzept der „qualifizierten Nachverdichtung“ der Landeshauptstadt München sieht vor, dass geeignete Gebiete zur Nachverdichtung sowohl eine gute Anbindung an den öffentlichen Personennahverkehr als auch eine angemessene Grünausstattung in der Umgebung aufweisen sollen (LHM, 2011).

Nachverdichtungen in Einfamilienhausgebieten oder Quartieren mit Gartenstadtypologie bergen dagegen die Gefahr, den Charakter des Viertels zu verändern und schlecht kontrollierbar zu sein. Ein Ausgleich zwischen dem Identitätserhalt der Siedlung und der Ermöglichung von baulichen Entwicklungen muss geschaffen werden. Die Stadt Augsburg hat etwa in einem Gestaltungshandbuch für Siedlungsentwicklung Richtlinien für die Verdichtung von Siedlungsgebieten aus der Zwischenkriegszeit festgelegt und definiert, welche Nachverdichtungsvariante erwünscht ist (Stadtplanungsamt Augsburg, 2018).



### 3.1.2 Bau- und planungsrechtliche Rahmenbedingungen bei Nachverdichtungsprojekten

Die Aufstellung von Flächennutzungsplänen (§5 BauGB) und Bebauungsplänen (§9 BauGB) stellen zwei wesentliche formelle Planungsinstrumente zur Steuerung von Nachverdichtung für Kommunen dar. Die bau- und planungsrechtlichen Gestaltungsmöglichkeiten hierfür werden im Wesentlichen durch das Baugesetzbuch (BauGB), die Baunutzungsverordnung (BauNVO) und die Bauordnungen der Länder geregelt (s. Abbildung 4). Während die Vorgaben auf Bundes- und Länderebene die maßgeblichen Leitplanken vorgeben, besitzen Kommunen die Möglichkeit, einzelne Bestimmungen auf kommunaler Ebene anzupassen. Der Stellplatzschlüssel aus der Bayerischen Bauordnung (BayBO) kann etwa durch Stellplatzsatzungen modifiziert werden, ebenso der Schwellenwert für die Anwendung des §13a BauGB ("vereinfachtes Verfahren") (Böhm et al., 2016). Außerhalb von Bebauungsplänen, d. h. in unbeplanten Gebieten im Innenbereich, richtet sich die Zulässigkeit einer baulichen Entwicklung nach §34 BauGB. Die kommunalen Steuerungs- und Gestaltungsmöglichkeiten sind dort stark eingeschränkt. Schrittweise, unkontrollierte Nachverdichtung stellt in der Folge ein Problem für viele Kommunen dar.

Städtebauliche Entwicklungssatzungen, Gestaltungssatzungen, Baumschutzverordnungen und Freiflächensatzungen sowie städtebauliche Verträge (§11 BauGB) stellen Möglichkeiten dar, außerhalb von Bebauungsplänen Einfluss zu nehmen. Informelle Planungsinstrumente wie kommunale Leitbilder oder städtebauliche Entwicklungsmaßnahmen können weitere Rahmenbedingungen schaffen. Insbesondere kommt integrierten Stadtentwicklungskonzepten, Freiraumentwicklungskonzepten und Biotopverbundkonzepten eine wichtige Rolle für die doppelte Innenentwicklung zu (Böhm et al., 2016). In diesem Zusammenhang spielen gesamtstädtische Nachverdichtungsstrategien und eine vorausschauende Bodenpolitik eine wichtige Rolle.

Mit der Änderung der Bayerischen Bauordnung 2021 (BayBO) haben sich neue Regelungen zu Abstandsflächen ergeben. Bundesweit gilt eine Abstandsverkürzung auf 0,4 H beim Wohnen bzw. bei Industrie und Gewerbe auf 0,2 H. Nach wie vor ist jedoch ein Mindestabstand von 3 Metern zwischen den Gebäuden einzuhalten. Ausnahmen können für Gemeinden ab einer Größe von 250.000 Einwohner:innen gelten. Neben weiteren Änderungen in der Bauweise ist das Ziel der neuen Bauordnung ein einfacheres, kostengünstiges und nachhaltiges, flächensparendes Bauen (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, 2022).

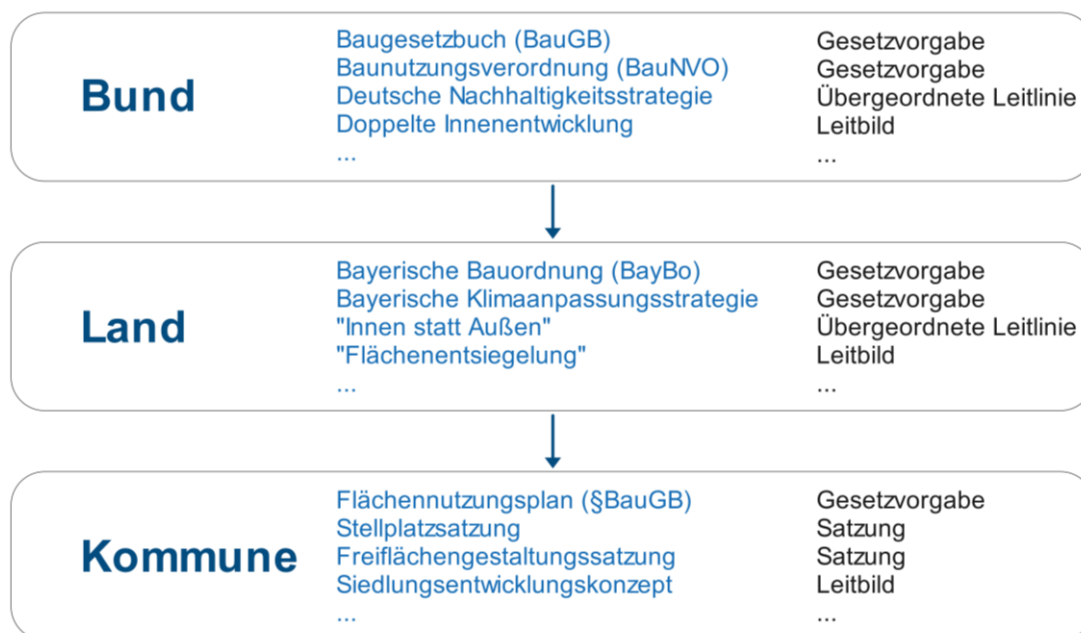


Abbildung 4: Beispiele für bau- und planungsrechtliche Rahmenbedingungen auf Bundes-, Länder- und kommunaler Ebene.

### 3.1.3 Datenbank kommunaler Stadtplanungsstrategien

Kommunen können unterschiedliche Strategien zur Stadtentwicklung und zum Umgang mit dem Klimawandel anwenden (s. vorheriger Abschnitt). Da jede Kommune sich zwar mit den eigenen spezifischen Herausforderungen auseinandersetzen muss, aber gleichzeitig auch übertragbare Ansätze und Konzepte in den kommunalen Strategien enthalten sind, war ein Ziel der vorhergehenden Grundlagenermittlung, diese in einer Datenbank übersichtlich zusammenzufassen. Für die Datenbank wurden Fachpläne, Konzeptpapiere, Leitlinien und Berichte der 29 größten wachsenden Städte in Bayern gesammelt, die sich mit den Themen Klimaschutz, Klimaanpassung, Stadtgrün oder Siedlungsentwicklung beschäftigen. Die Recherche erfolgte über den Internetauftritt der Kommunen. Durch eine systematische Sortierung in der Datenbank lässt sich schnell abrufen, mit welchen Themen sich die Städte in welcher Tiefe beschäftigen. Einige Strategien behandeln die Themen Klimaschutz, Klimaanpassung und Nachverdichtung einzeln, andere in unterschiedlicher Kombination. Oft taucht Klimaschutz auch im Zuge anderer Themen, wie z.B. Mobilität auf.

Festzustellen ist, dass es häufiger Konzepte zum Klimaschutz als zur Klimaanpassung gibt (s. Abbildung 5). Dies stimmt mit einer deutschlandweiten Studie überein, die die Ausrichtung deutscher Städte hinsichtlich Klimaschutz und -anpassung untersucht hat (Otto et al., 2021). Die Gründe hierfür sind vielfältig: Während Programme zum Klimaschutz schon länger Bestand haben und Förderstrukturen dafür aufgebaut sind, trifft dies für Klimaanpassung erst in den letzten Jahren zu. Klimaanpassungsstrategien müssen zudem viele unterschiedliche Handlungsfelder berücksichtigen und erfordern eine komplexe Strategieentwicklung unter Beteiligung interdisziplinär ausgerichteter Akteur:innen. Hier besteht angesichts bereits bestehender Klimawandelfolgen dringender Handlungsbedarf. Explizite Strategien zur Regulierung oder Gestaltung von Nachverdichtung waren nur in einigen wenigen Städten vorhanden, ebenso wie Regelungen zum Stadtgrün. Dafür liegen in fast allen untersuchten bayerischen Städten integrierte Stadtentwicklungskonzepte vor. Einige Kommunen nutzen auch die Neuaufstellung von Flächennutzungsplänen zur Regulierung von Nachverdichtung und zur Sicherung von Grünflächen.

Stadt	KS	KA	NachV	Stadtgrün	ISEK
Ansbach	x			x	x
Aschaffenburg	x	x	x	x	
Augsburg	x	o	x		x
Bamberg		x			
Bayreuth	x			o	x
Coburg	x			x	x
Dachau	x		x		x
Erding	x			x	x
Erlangen	x	x	x		
Freising	x	o			x
Fürstenfeldbruck	x				
Fürth	o			F	
Germering	x				x
Ingolstadt	x		x		x
Kaufbeuren		x			x
Kempten	x				x
Landshut	x			x	
Memmingen	x				x
München	x	x	x	x	x
Neumarkt in der Oberpfalz					x
Neu-Ulm	x				x
Nürnberg	x	x	x	x	x
Passau	x			x	x
Regensburg	x	o	x		
Rosenheim	x	o		x	
Schwabach	x				
Schweinfurt	x			x	
Straubing					
Würzburg	x	x	x	x	

Abbildung 5: Übersicht der vorhandenen Strategien in 29 bayerischen Kommunen (Stand Juni 2021).  
 X = Strategie vorhanden, o = in Aufstellung, F = Förderprogramm. KS = Klimaschutz, KA = Klimaanpassung,  
 NachV = Nachverdichtung, ISEK = Integriertes Stadtentwicklungskonzept.

## **3.2 Klimaschutz und Klimaanpassung bei Nachverdichtungsvorhaben**

Nachverdichtungsvorhaben sind stets mit einem Eingriff in bestehende urbane Strukturen verbunden. Dies kann erhebliche Folgen für das lokale Mikroklima und die Bevölkerung hervorrufen. Gleichzeitig bietet Nachverdichtung neben der Schaffung neuen Wohnraums auch eine Möglichkeit, bestehende Strukturen zu transformieren und so zu Klimaschutz und Klimaanpassung im Bestand beizutragen. Diese Auswirkungen und das Potenzial von Nachverdichtung hinsichtlich Klimaschutz und Klimaanpassung werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### **3.2.1 Mikroklimatische Auswirkungen und Potenziale zur Klimaanpassung**

Die Nachverdichtung des Gebäudebestandes hat lokalklimatische Auswirkungen zur Folge, die sich je nach Art und Weise der Nachverdichtung voneinander unterscheiden.

Die Aufstockung von Gebäuden oder neue Gebäuderiegel können Kaltluftzuflüsse in das Gebiet abschwächen oder im ungünstigsten Fall vollständig blockieren. Entscheidend hierfür ist die Ausrichtung der Gebäude zur dominanten Windrichtung (Lobaccaro et al., 2019; Emmanuel & Steemers, 2018). Neben dem Quartier selbst können dabei auch benachbarte Gebiete beeinträchtigt sein (Erlwein et al., 2021). Erhöhte Tag- und Nachttemperatur, gesteigerter Hitzestress sowie eine erhöhte Schadstoffbelastung stellen mögliche Folgen dar (Harlan et al., 2011).

Eine Erhöhung der Gebäudedichte und des Versiegelungsgrades (Anteil überbaute Fläche) steigert die Strahlungsenergie, die während des Tags gespeichert und nachts in die Umgebung in Form von Wärme abgegeben wird. Dies führt vor allem nachts zu einer erhöhten Temperatur im Vergleich zum Umland (Deilami et al., 2018; Onomura et al., 2016). Während Hitzeperioden ist vor allem die nächtliche Erholung für die menschliche Gesundheit bedeutsam, die durch eine erhöhte Temperatur beeinträchtigt wird (Beckmann et al., 2021). Auf stadtweiter Ebene verstärkt eine zunehmende Versiegelung den städtischen Wärmeinseleffekt (Deilami et al., 2018).

Ein erhöhter Versiegelungsgrad steigert zudem den Anteil des Niederschlagswassers, der nicht lokal versickert werden kann. Bei Starkregenereignissen kann es in verdichteten Gebieten zu einer Überlastung der Kanalisation und entsprechenden Schäden an der Infrastruktur kommen. Weiterhin wird die Grundwasserneubildung eingeschränkt (GERICS, 2021).

Der Verlust von bestehenden Grün- und Freiflächen im Zuge von Nachverdichtung erhöht den Hitzestress im Außenraum durch den Wegfall von Verschattung und Verdunstungskühlung. Während Großbäume vor allem relevant für die Verschattung am Tag sind (Zölch et al. 2016), sind offene Wiesenflächen bedeutsam für die Entstehung und Lenkung von Kaltluft während der Nacht (Upmanis et al., 1998; Erell, 2017). Der Verlust von Frei- und Grünflächen ergibt sich nicht nur durch die Entwicklung des neuen Gebäudebestands selbst, sondern auch durch weitere Bestimmungen zu anderen Belangen wie Stellplatzsatzungen, Rettungswegzufahrten und Müllentsorgungsstellen. Besonders der Nachweis von Stellplätzen kann zu einer

vermehrten Über- oder Unterbauung führen. So sieht die bayerische Bauordnung etwa vor, dass für jede neue Wohneinheit ein Stellplatz geschaffen werden muss. Vor diesem Hintergrund fordern mehrere Autor:innen eine Einigung auf bundesweit einheitliche, verbindliche Richtwerte für die Versorgung mit Grün- und Freiflächen pro Kopf sowie deren Erreichbarkeit und Mindestgröße, um städtisches Grün in der Siedlungsentwicklung zu stärken (Hansen et al., 2018; Böhm et al., 2016).

Allerdings sind Nachverdichtungsvorhaben nicht ausschließlich mit negativen Auswirkungen verbunden, sondern können auch Potenziale zur Klimaanpassung aufweisen:

- Einsatz von Dach- und Fassadenbegrünung (positiver Einfluss auf Wärme- und Kühlenergiebedarf sowie auf Mikroklima und Starkregentrückhalt)
- Entsiegelung von Innenhöfen durch Flächenneuordnung, dadurch Verbesserung Mikroklima und Starkregentrückhalt sowie Steigerung der Aufenthaltsqualität für die Bewohner:innen
- Neugestaltung von Grünflächen und Pflanzung klimaresilienter Arten
- Berücksichtigung von Frischluftschneisen bei Neuordnung von Gebäuden
- Qualifizierung des vorhandenen Grüns und nutzerorientierte Umgestaltung
- Anlage von Regengärten und -mulden zur Verbesserung des Starkregentrückhaltes

### 3.2.2 Klimaschutz bei Nachverdichtungsvorhaben

Der Gebäudesektor verantwortet ca. 40 % der deutschlandweiten Treibhausgasemissionen (BBSR, 2020). Dabei spielen neben Emissionen zum Betrieb von Gebäuden auch die sogenannten „grauen Emissionen“ für Herstellung und Entsorgung von Baustoffen eine entscheidende Rolle. Während Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit dem Gebäudebetrieb durch energetische Sanierung nach und nach gesenkt werden, führen steigender Wohnraumbedarf und damit verbundene Neubautätigkeiten zu hohen grauen Emissionen (Röck et al., 2019). In der Nachverdichtung wird daher auch Potenzial zum Klimaschutz und der Reduzierung von Flächen- und Ressourcenverbrauch gesehen (Hafner et al., 2019; Everding, 2017).

Verbesserungen können dabei auf verschiedenen Ebenen erreicht werden. In Bezug auf Materialien wurde die Holzbauweise als ökologisch vorteilhaft nachgewiesen (Schneider-Marin et al., 2020; Braune et al., 2021). Da vor allem für Gebäudeaufstockungen leichte Bauweisen erforderlich sind, kann der Holzbau auch aus konstruktiver Sicht als besonders geeignet angeführt werden (Fath et al., 2019). In der Betrachtung auf Gebäudeebene bieten Aufstockungen und Anbauten eine Möglichkeit, die Kompaktheit von Gebäuden zu erhöhen, was deren Energiebilanz verbessern kann (Hemsath et al., 2015). Zudem bietet sich in Kombination mit Gebäudeerweiterungen eine energetische Sanierung an, wodurch eine Einsparung

grauer Emissionen erzielbar ist (Sundling, 2019). In Bezug auf die Quartiersebene bieten Nachverdichtungen zusätzlich Möglichkeiten zur optimierten Ausnutzung bestehender Infrastruktur (Lehmann, 2019). Zudem besteht die Chance, das Quartier gezielt den voranschreitenden Klimawandel anzupassen. Strategisch platziert, können Gebäude sich beispielsweise gegenseitig verschatten und dadurch zu einer Reduktion der Kühllasten beitragen.

### **3.2.3 Kühlfunktion von Stadtgrün bei Nachverdichtungsvorhaben**

Städtisches Grün trägt auf vielfältige Weise zur Klimawandelanpassung bei: Gezielt eingesetzt reduziert es die Hitze in der Stadt sowie im Quartier und hilft bei der Regulierung von Starkregenereignissen (Rosenberger et al. 2021; Norton et al., 2015). Verschiedene Formen von Grün wirken dabei auf unterschiedliche Weise durch Verschattung und Verdunstungskühlung (siehe auch ZSK TP 1 Leitfaden „Klimaorientierte Kommunen in Bayern“). Während Bäume das effektivste Mittel zur Reduzierung des menschlichen Hitzestresses am Tag darstellen (Zölch et al., 2016), sind offene Wiesenflächen bedeutsam für die nächtliche Abkühlung (Konarska et al., 2016). Fassaden- und Dachbegrünungen kühlen durch Verschattung und Evapotranspiration die Oberflächen von Gebäuden und bergen so Potenzial für Verbesserungen des thermischen Innenraumkomforts (Buchin et al., 2016; Perez et al., 2014). Darüber hinaus können Dachbegrünungen mit mehr als 20 cm Substratauflage einen wesentlichen Anteil des Niederschlagswassers bei Starkregenereignissen zurückhalten und damit die Kanalisation entlasten (Rosenberger et al., 2021).

Durch Nachverdichtung gehen oft unbebaute Grün- und Freiflächen verloren. Um die negativen Folgen für Mikroklima und Starkregenrückhalt zu begrenzen, ist es wichtig, Grünflächen und grüne Infrastruktur frühzeitig (vor den ersten Planungsentwürfen) in der Quartiersentwicklung zu berücksichtigen. Ein frühzeitiger Einbezug in die Planung ermöglicht es, Rücksicht auf Frischluftschneisen zu nehmen und Nachverdichtung so zu planen, dass möglichst viele vitale Großbäume erhalten bleiben und strategische Standorte für neues Grün geschaffen werden. Um die bestmögliche Kühlwirkung zu erzielen, ist eine durchdachte Platzierung von Grün und die Schaffung von guten Wuchsbedingungen essenziell (Zölch et al., 2019; Erlwein et al., 2021). Ausreichend Wurzelraum und Wasserversorgung sind entscheidend, damit Bäume ihre Kühlwirkung entfalten können und langfristig erhalten bleiben (Moser-Reischl et al., 2019). Wenn die Möglichkeiten genutzt werden, besonders heiße Orte durch Bäume zu verschatten, Nebenflächen nach Möglichkeit entsiegelt werden und Dach- sowie Fassadenbegrünungen zum Einsatz kommen, kann ein Quartier trotz Nachverdichtung klimaangepasst gestaltet werden. Besonders die Aufwertung von wenig genutzten Grünflächen (klassischem Abstandsgrün) und die Nutzung von Dächern bieten großes Potenzial für die Klimaanpassung, aber auch die Umgestaltung des Straßenraumes, wie etwa das Forschungsprojekt „BlueGreenStreets“ aufzeigt (HCU, 2022).

### 3.2.4 Integration von Stadtgrün in Nachverdichtungsprozesse

In der Praxis hängt die Umsetzung der oben beschriebenen Strategien von mehreren Faktoren (wie Verfügbarkeit von Ressourcen und politischem Willen) ab, die darüber entscheiden, wie erfolgreich Stadtgrün in Nachverdichtungsprozesse integriert werden kann. Um den Einfluss und das Zusammenwirken dieser Faktoren besser zu verstehen, wurden im Zuge des Projektes Expert:inneninterviews mit Stadt- und Grünplaner:innen vier verschiedener bayerischer Städte geführt. Die vier ausgewählten Städte Regensburg, Straubing, Dachau und Kempten stehen alle vor der Herausforderung, Klimawandel und hohe Wohnraumnachfrage in Einklang zu bringen, haben aber unterschiedliche Rahmenbedingungen hinsichtlich Einwohner:innenzahl, räumlichem Kontext und Zusammensetzung der Stadtstrukturen. Für eine ausführlichere Beschreibung der Erhebung siehe Kapitel 4.1.

Um die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Faktoren zu analysieren, wurde der Ansatz des Policy Arrangement Approach von Arts et al. 2006 verwendet. Bei diesem Modell aus der Governance-Forschung unterscheiden die Autoren zwischen den vier Dimensionen:

- I) Akteure & Koalitionen
- II) Spielregeln
- III) Macht & Ressourcen
- IV) Diskurse

Akteure stellen etwa Mitglieder aus Politik und Verwaltung auf verschiedenen Ebenen dar, Spielregeln sind zum Beispiel in Satzungen und Beschlüssen definiert oder werden durch Arbeitsroutinen manifestiert. Macht & Ressourcen bezieht sich auf Finanz-, Sach-, und Personalausstattung, aber auch persönliche Fähigkeiten. Diskurse entsprechen Leitmotiven, Weltanschauungen und individuellen Interpretationsschemata. Alle genannten Faktoren stehen dabei in Wechselwirkungen zueinander, sodass die Ursache von Barrieren in der Planung nicht nur auf einen einzelnen Faktor zurückzuführen ist, sondern eine tiefere Analyse erfordert. Diese Verbindungen liefern wertvolle Hinweise für die Planungspraxis und sollen im Folgenden anhand eines Beispiels aus den Interviewergebnissen demonstriert werden (s. Abbildung 6).

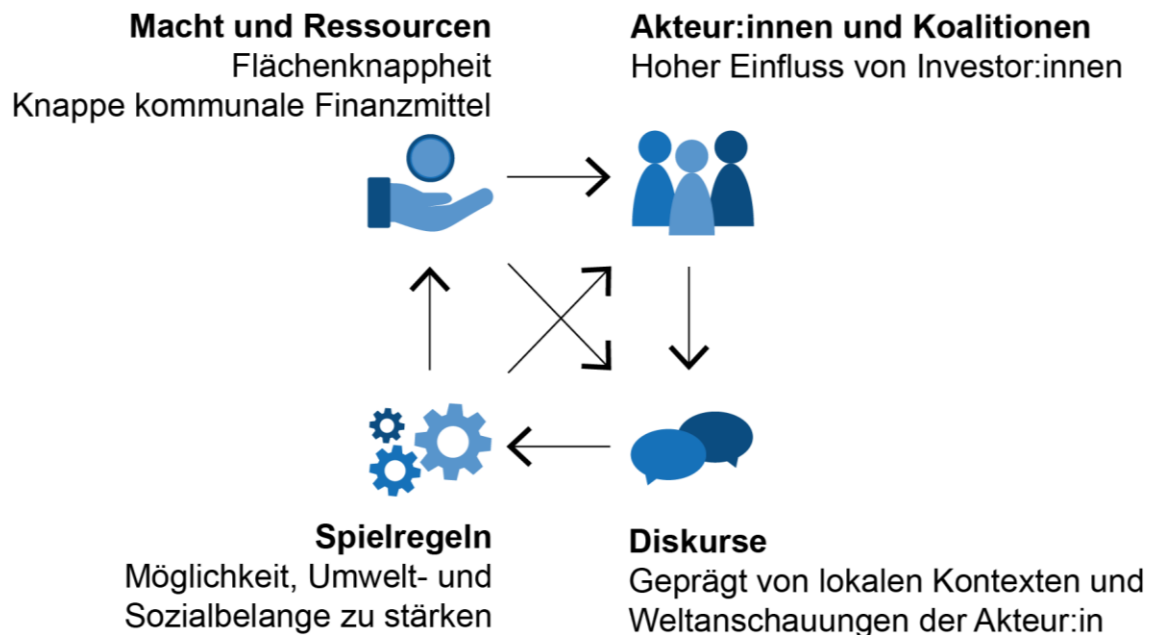


Abbildung 6: Wirkungsgeflechte im Policy Arrangement Approach (Arts et al. 2006)  
anhand des Beispiels Landverfügbarkeit.

In allen interviewten Kommunen ist die Ressource „Land“ knapp, Flächen stehen nicht zur Verfügung oder sind nicht im Rahmen der vorhandenen Finanzmittel erwerb- und entwickelbar (Dimension Ressourcen). Der Großteil der Siedlungsentwicklung liegt damit in der Hand von Investor:innen, von denen in der Folge eine teilweise Abhängigkeit besteht (Akteure & Koalitionen). Je nach vorhandenem Diskurs kann unterschiedlich mit dieser Ausgangssituation umgegangen werden - z.B. besteht die Möglichkeit, Beschlüsse zu verabschieden, die gemeinwesenorientierte Leistungen von Investor:innen verlangen (Spielregeln). Während in einem Teil der befragten Kommunen das Narrativ vorlag, dass Investor:innen durch Auflagen nicht abgeschreckt werden dürfen bzw. Kommunen nur Regeln zu Flächen aufstellen sollten, die in ihrem Eigentum liegen, herrschte in anderen Verwaltungen die Einschätzung vor, dass es Pflicht der Kommune ist, Investor:innen an den Folgekosten für soziale Infrastruktur zu beteiligen und eine Berücksichtigung von Umweltaspekten zu verlangen. Diese Einstellungen beeinflussen, ob entsprechende Regelungen aufgestellt werden oder ausbleiben. Regelwerke mit klaren Vorgaben beeinflussen wiederum die Verteilung von Macht und Ressourcen. Auch zwischen den anderen Dimensionen bestehen Wechselbeziehungen. So kann eine Verfügbarkeit von Ressourcen den Diskurs beeinflussen und Regelwerke können darüber entscheiden, welche Akteure im Planungsprozess beteiligt werden.

Im Hinblick auf die Integration von Stadtgrün in Nachverdichtungsprozesse hat die Analyse der Interviews gezeigt, dass simple Konfliktlösungsansätze (z.B. alleinige Erhöhung der Ressourcen) oft nicht ausreichend sind. Stattdessen ist auch das Zusammenspiel zwischen den kommunalen Akteur:innen entscheidend. Bei einer



gemeinsamen Haltung von Politik und Verwaltung können Anliegen gegenüber Investor:innen leichter um- und durchgesetzt werden. Die Festlegung von klaren Spielregeln, wie Grundsätze für die Entwickler:innen von Bauland oder Freiflächengestaltungssatzungen beschleunigen Verhandlungsprozesse, wenn sie klar kommuniziert werden. Die Entwicklung von Leitbildern und Zielvorstellungen für die Stadtplanung unter Beteiligung betroffener Akteure und der Zivilgesellschaft tragen dazu bei, eine Akzeptanz dieser Regelwerke zu erreichen. Eine Erfolgsstrategie ist das Nutzen von externen Ressourcen, wie eine Beteiligung in Forschungsprojekten, die Mitgliedschaft in kommunalen Austauschnetzwerken oder eine Zusammenarbeit mit gegebenenfalls vorhandenen Initiativen vor Ort. Eine ausführlichere Darstellung von Barrieren und Erfolgsfaktoren befindet sich in Anhang 12. Zu den Erkenntnissen aus Expert:inneninterviews wurde zudem ein wissenschaftlicher Artikel verfasst (siehe Veröffentlichungen).

### **3.3 Kollaborative Planung**

Fortschreitende Digitalisierung in der Planung ermöglicht, immer komplexere Daten schnell miteinander in Beziehung zu setzen, in Echtzeit zu modifizieren und zu diskutieren. Mit der stetigen Verbesserung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (Billinghurst, 1999), kann die Zusammenarbeit unterschiedlicher Planungsdisziplinen gefördert werden. Dies bringt neue technische und soziale Herausforderungen mit sich, die von unterschiedlichen Forschergruppen zuerst analysiert und prototypisch implementiert werden. Das Hauptproblem in der Umsetzung besteht darin, dass die Transformation von analogen Arbeitsweisen in eine digitale Umgebung kognitive Defizite erzeugt. Um diese Defizite zu kompensieren, wird eine Lernkurve des Nutzers vorausgesetzt (Grudin 1988; Billinghurst, 1999). Bei erfolgreicher Umsetzung können Planungsentscheidungen datenbasiert und informationsgestützt getroffen werden. Das bietet die Möglichkeit, vielfältige Informationen zusammenzuführen und in einfach verständlicher Form zu vermitteln. Im Zusammenhang mit einer zunehmenden Spezialisierung von Planungsdisziplinen besteht somit die Chance, durch Planungsunterstützungstools kollaborativ Lösungen für komplexe Probleme zu entwickeln. Indem Planungsprozesse aktiv selbst mitgestaltet werden, können eigene Erfahrungen eingebracht und im Zusammenspiel mit anderen Beteiligten auch ungewöhnliche Lösungen effektiver entwickelt werden. Neben einer wissenschaftsgestützten Verarbeitung der Daten ist die Darstellung der Ergebnisse wichtig, um eine gemeinsame Sprache unter den Planungsbeteiligten zu schaffen.

#### **3.3.1 Anwendungsfelder**

Um den komplexen Herausforderungen von Nachverdichtung zu begegnen, werden unter anderem die Potenziale der Digitalisierung genutzt. Sie können dabei unterstützen, Planungs- und Entscheidungsprozesse anzupassen und Alternativen zu Planungsgewohnheiten bis hin zu einem veränderten Planungsverständnis zu etablieren. So kann beispielsweise in der Verwaltung eine sektorenübergreifende Planung aufgrund von digitalen Methoden vereinfacht werden. Im direkten Dialog

können informationsgestützt und disziplinen-übergreifend gemeinsame Lösungen für die Herausforderungen in komplexen urbanen Strukturen erarbeitet werden. Hier setzt das Forschungsprojekt an, indem kollaborativ Szenarien entwickelt werden. Die relevanten Informationen und komplexen Zusammenhänge stehen dann als Entscheidungsgrundlage für Planende und Verwaltung zur Verfügung.

Eine Erweiterung kollaborativer, digitaler Methoden wird auch durch den Trend vorangetrieben, dass interaktive Beteiligungsprozesse zunehmend in Planungsprozesse integriert werden. Digitale Planungsmethoden gewinnen insbesondere bei Eingriffen in bestehende Stadtstrukturen an Bedeutung. Mit interaktiven Karten können beispielsweise Bedürfnisse und Ängste frühzeitig abgefragt werden, indem Betroffene gezielt zu Beginn des Planungsprozesses einbezogen werden. Dies ermöglicht es den Betroffenen im Idealfall sich mit den Baumaßnahmen und angestrebten Entwicklungen zu identifizieren. Hindernisse und Barrieren können somit frühzeitig überwunden und spätere Konflikte vermieden werden. Jedoch liegt der Fokus in diesem Forschungsprojekt nicht auf Beteiligungsprozessen. Die Erforschung von interaktiven Beteiligungsprozessen mithilfe digitaler Planungswerkzeuge bietet jedoch Potenzial für Folgeprojekte (s. Kapitel 9).

### 3.3.2 Bestehende digitale Planungsmethoden

Die Dissertation „Interaktionsformen für das digitale Entwerfen“ von Schubert (2014) zeigte, dass der Einsatz von rechnerunterstützter Software durch Planer:innen üblicherweise erst in späten Planungsphasen zum Einsatz kommt. In seiner Defizitanalyse kommt Schubert zum Schluss, dass bestehende Entwurfswerkzeuge nicht die Anforderungen als Denkwerkzeug für kollaboratives Planen im städtebaulichen Maßstab erfüllen. Die Entwicklung der CDP schafft die Grundlage für kollaboratives Arbeiten mithilfe der Einbindung des Rechners, ohne die kreative Tätigkeit der Planer:innen zu stören. Eine Forschungsgruppe vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) hat dieses Potenzial ebenfalls erkannt und im Jahr 2018 mit CityScope eine weitere kollaborative Plattform mit Fokus auf städtische Ökosysteme in Kombination mit ökonomischen Parametern geschaffen (Larson et al., 2018). Im Folgenden wird diese Plattform und einige weitere Instrumente zur kollaborativen Planung vorgestellt, die Klima- und Umweltfaktoren in die Stadtplanung integrieren:

#### *CityScope (MIT)*

Die primären Zielgruppen von CityScope sind Teilnehmer:innen und Preisgerichte von städtebaulichen Wettbewerben. CityScope bietet das Potenzial, Planer:innen und Entwickler:innen neue Erkenntnisse zu liefern, die sich aus der Wechselwirkung von Sozialwissenschaften und Stadtplanung ergeben, und soll bei der objektiven Bewertung von Entwurfsvarianten unterstützen. Das Werkzeug bietet eine sofortige Analyse der Umwelt- und Raumauswirkungen in Bezug auf ausgewählte Zielkriterien. Erkenntnisse im Bereich Thermodynamik und agentenbasierter Simulationen bieten

vielversprechende Ansatzpunkte bei der Erweiterung des Werkzeugs zu einem noch robusteren System (Baeza, 2021).

### *DIPAS für digitale Bürger:innenbeteiligung (Hafen City Universität Hamburg)*

Die Bürger:innenbeteiligung ist ein Bestandteil des Stadtplanungsprozesses, der zunehmend an Bedeutung gewinnt. Bisherige informelle Beteiligungsprozesse sind meist analog und verzichten auf eine parallele digitale Datenverarbeitung. Das intuitive Nutzer:inneninterface von DIPAS und des zugehörigen Online-Tools erlauben Nutzer:innengruppen den Zugang zu Beteiligungsprozessen, die bisher nicht erreichbar waren. Für diese wachsende Community ist ein gut strukturiertes "Backend" in der Lage, große Mengen an eingehenden Zugriffen und Daten effizient zu verarbeiten. DIPAS ist eine einheitliche Geodateninfrastruktur (GDI), deren Entwicklung durch die INSPIRE-Richtlinie angestoßen wurde. Alle Daten und die Repository sind Open Source und können kostenlos heruntergeladen werden (Lieven, 2017).

### *CONSUL*

Consul ist eine digitale Open Source Plattform und kann als frei modifizierbares Beteiligungsinstrument eingesetzt werden. Consul unterstützt partizipative Prozesse wie Debatten, Bürger:innenhaushalte, kollaborative Gesetzesverfahren, Interviews, Umfragen und Abstimmungen. Komplexe Beteiligungsprozesse für die Stadtentwicklung oder umfassende institutionelle Pläne können aufgrund der Flexibilität der Plattform umgesetzt werden. In verschiedenen Threads können Bürger:innen und Politiker:innen zu unterschiedlichen Themen diskutieren. Das öffentlich frei-zugängliche Repository kann auf GitHub heruntergeladen werden <https://github.com/consul/consul>.

### **3.3.3 Vorarbeiten COLLABORATIVE DESIGN PLATFORM**

Die Forschungsgruppe Collaborative Design Platform (CDP) konzentriert sich auf sinnvolle und nützliche Einsatzmöglichkeiten des Computers in frühen Phasen der architektonischen Planung im städtebaulichen Maßstab. Basierend auf einer Analyse des Entwurfs-, Planungs- und Kommunikationsprozess wurden die Anforderungen an eine neue Entwurfsplattform untersucht und als prototypische Implementierung „Proof of Concept“ umgesetzt. Vor allem die etablierten Methoden im architektonischen Designprozess wie Arbeitsmodelle und Handskizzen werden von der CDP unterstützt. Durch die Rekonstruktion eines auf einer Tischplatte platzierten Arbeitsmodells als digitalen 3D-Körper, werden physische Interaktionen wie Positionsänderungen und Veränderungen wie Schnitte oder Verformungen direkt in der Szene aktualisiert und in Echtzeitberechnungen berücksichtigt. Dies ermöglicht direkte und objektive Rückschlüsse und bietet die Möglichkeit der Variantenoptimierung (Schubert 2014; Petzold 2017).



Abbildung 7: Collaborative Design Platform  
– etablierte Entwurfswerkzeuge und digitale Analyse nahtlos (z.B. Schattenanalyse im Jahresverlauf) verbunden.

### 3.3.4 Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte

Das Forschungsprojekt „Grüne Stadt der Zukunft“ (2018-2021, Fördermittelgeber BMBF) untersuchte aus der Perspektive von verschiedenen Disziplinen Möglichkeiten zur Integration von Klimaorientierung in die Stadtplanung von wachsenden Städten. Dabei wurden unter anderem Planungsprozesse und –instrumente auf ihre Eignung zur Klimaorientierung geprüft und verschiedene Nachverdichtungsformen (Aufstockung und Zeilenschluss) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Mikroklima untersucht und ökobilanziell bewertet. Die Ergebnisse des Projektes wurden in Broschüren und Factsheets veröffentlicht, welche die gewonnenen Erkenntnisse der Praxis zugänglich machen (SMLE, 2021).

Das Forschungsprojekt Crowd Safety wurde auf der CDP // Collaborative Design Platform aufgebaut und verband digitale und physische Planungstools in frühen Entwurfsphasen. Die Plattform wurde mit dem crowd:it Personenstrommodell des Forschungspartners accu:rate GmbH verknüpft. Basierend auf diesem Testaufbau wurden Konzepte der intuitiven Interaktion, Echtzeit-Simulationstechniken und Ad-hoc-Visualisierungsstrategien untersucht und prototypisch umgesetzt. Der Simulationsaufbau wurde auf geometrische Interaktionen mit farbcodierten Designobjekten und einer Auswahl von Benchmark-Szenarien verknüpft. Zudem wurde die Simulation an dynamische Entscheidungsprozesse in frühen Entwurfsphasen angepasst. Dieses Simulations-Setup in Kombination mit entwickelten Visualisierungsstrategie reagierte direkt auf Entwurfsanpassungen und sorgte für eine Überlagerung der Ergebnisse in Echtzeit für geometrische und numerische Modellen (Petzold et al., 2022).

## 4 Anforderungen und Erprobung des Planungstools

Alle am Bau beteiligten Akteur:innen müssen eine klare Vorstellung von den Umweltauswirkungen durch Herstellung, Betrieb und Rückbau der Gebäude haben, bevor die Planung beginnt. Daher ist es notwendig, entsprechende Analysen für frühe Entwurfsphasen in Echtzeit bereitzustellen. Für dieses Vorhaben eignet sich die CDP, um die Bewertung von Planungsentscheidungen für die Projektentwicklung und bei Stadtentwicklungsprozessen zu verbessern. Der Schwerpunkt der Erweiterung der CDP liegt auf der Berücksichtigung von klimatischen und energetischen Auswirkungen bei Nachverdichtungsvorhaben (Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und städtisches Mikroklima).

Zur Erweiterung des CDP Planungstools wurden unterschiedliche Methoden angewandt. Umfragen und Interviews mit Expert:innen aus dem Planungsbereich dienten zur Abfrage des Wissens, des Bedarfs und der Anforderungen hinsichtlich eines Planungstools. Zur technischen Entwicklung und Erweiterung der CDP wurden diese und weitere Anforderungen diskutiert und auf verschiedenen Ebenen bearbeitet.

### 4.1 Analyse der Anforderungen an die CDP

Im Folgenden werden die durchgeführten Befragungen und Interviews vorgestellt sowie hinsichtlich ihrer Relevanz für die Entwicklung des Planungstools analysiert.

#### 4.1.1 Onlinebefragung

Unter den 29 bayerischen Kommunen mit über 35.000 Einwohner:innen und einer positiven Bevölkerungswachstumsprognose wurde eine Onlineumfrage zur Bewertung und Steuerung von Nachverdichtung durchgeführt. Aus insgesamt 16 vollständig ausgefüllten Fragebögen (55 % der angeschriebenen Kommunen) geht ein besonderer Informationsbedarf hinsichtlich der Handlungsmöglichkeiten des Planungs- und Baurechts in Nachverdichtungsprozessen hervor. Flächenknappheit und die hohe Nachfrage nach Wohnbauland sind die wichtigsten Gründe, warum das Thema Nachverdichtung in den befragten Kommunen in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Darüber hinaus ergaben sich folgende Fragen: Wie soll mit Grünflächen in der Nachverdichtung umgegangen werden? Welche Vorgaben können von Kommunen getroffen werden, die auch juristisch Bestand haben? Wie können Entschädigungsklagen vermieden werden? Eine gelungene Kommunikation mit Bürger:innen und Eigentümer:innen stellt für die befragten Kommunen eine weitere wichtige Herausforderung dar. Wie kann mit Ängsten und Vorbehalten in Zusammenhang mit Nachverdichtung umgegangen werden? Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Onlinebefragung befindet sich im Anhang.

#### 4.1.2 Expert:inneninterviews

Ziel der Expert:inneninterviews war es, das Anwendungspotenzial des Entscheidungstools zu ermitteln und dabei die Perspektiven aller Schlüsselakteur:innen aus den Bereichen Planung, Wohnungsbau, Politik und

Zivilgesellschaft abzudecken. Die Auswahl der kommunalen Interviewpartner:innen erfolgte über die geschilderte Onlinebefragung. Dort hatten sich Mitarbeiter:innen der Stadtverwaltungen aus Dachau, Kempten, Regensburg und Straubing zu weiterführenden Gesprächen bereit erklärt. Die Interviewpartner:innen besetzten eine Leitungsposition in der Stadt- oder Grünplanung. Des Weiteren wurden Gespräche mit dem Planungsbüro WGF und den Wohnungsbaugesellschaften GEWOFAG und GWG (als Vertretung der Perspektive der Eigentümer:innen) durchgeführt. Während GWG und GEWOFAG die beiden größten Wohnungsgesellschaften in München sind, arbeitet das in Würzburg und Nürnberg ansässige Landschaftsplanungsbüro WGF für Kommunen verschiedener Größenordnungen in Bayern und NRW. Das Landesamt für Umwelt (LfU) wurde als Träger:in öffentlicher Belange gewählt. Es ist die zentrale Fachbehörde für Umweltbelange jeglicher Art und dient u. a. als Beratungsstelle für Kommunen, beispielsweise mithilfe der Flächenmanagement-Datenbank und dem Folgekostenschätzer.

Als Stellvertreter für die zivilgesellschaftliche Perspektive wurden Gespräche mit Organisator:innen von Bürger:innenbeteiligungen und genossenschaftlichen Wohnprojekten (mitbauzentrale münchen, mgs Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung mbH, Green City e.V., wagnis eG) geführt. Zudem fand ein Interview mit einer Vertreterin des Bezirksausschusses Schwabing-West (München) und Vorsitzenden der Mietergemeinschaft AnDeKaT statt, um die Sichtweise von Bewohner:innen in Nachverdichtungsprozessen einzubringen.

Die Interviewleitfäden wurden für verschiedene Akteursgruppen jeweils leicht angepasst, um vertieft auf spezifische Inhalte einzugehen. Interviewpartner:innen aus der Stadtverwaltung wurden etwa verstärkt nach Prozessen und Abläufen von Nachverdichtungsverfahren befragt, während Vertreter:innen der Zivilgesellschaft detaillierter zum Thema Partizipation und Kommunikation interviewt wurden. Alle Leitfäden hatten einen Fragenblock zur Gestaltung von unterstützenden Visualisierungswerkzeugen. Dabei wurde unter anderem erfragt, in welchen Phasen ein solches Planungswerkzeug am wirkungsvollsten eingesetzt werden kann und welche Funktionen wünschenswert wären. Im Zeitraum September 2020 bis Juni 2021 wurden insgesamt 17 Expert:inneninterviews geführt (s. Abbildung 8).

<b>Stadtverwaltung</b>	Dachau Kempten Regensburg Straubing
<b>Politik/Stadtrat</b>	Bürgermeister Regensburg Bezirksausschuss Schwabing-West*
<b>Planungsbüro, externe Expert:innen</b>	WGF Nürnberg
<b>Träger:innen öffentlicher Belange/Fachplaner</b>	Bayerisches Landesamt für Umwelt
<b>Bürger:innen</b>	mitbauzentrale münchen mgs Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung Green City e.V. Mietergemeinschaft AnDeKaT*
<b>Eigentümer:innen/ Investor:innen</b>	GEWOFAG GWG *dieselbe Person

Abbildung 8: Übersicht der geführten Expert:inneninterviews  
(ausführliche Tabelle s. Anhang 2).

Alle Interviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und mittels der Software MAXQDA codiert und ausgewertet. Die Interviewergebnisse der kommunalen Befragungen wurden in einem wissenschaftlichen Aufsatz aufgearbeitet, der vertieft die Rolle von Akteuren, den Einsatz von Ressourcen, vorhandenen Diskursen und etablierten Regeln und Routinen für die Integration von grüner Infrastruktur in die Stadtplanung analysiert hat. Alle Interviews wurden darüber hinaus besonders hinsichtlich des möglichen Einsatzes der CDP ausgewertet.

#### 4.1.3 Ermittelte Anwendungsbereiche der CDP

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über mögliche Einsatzzeitpunkte, Anwendungsbereiche und Zielgruppen, die aus den Expert:inneninterviews ermittelt wurden.

##### *Einsatzzeitpunkt der CDP*

Sowohl die Befragungen als auch die Ermittlung der Einflussmöglichkeiten verschiedener Beteiligter im Planungsprozess zeigen, dass die CDP in möglichst frühen Planungs-/ Projektphasen eingesetzt werden sollte. Zu diesem Zeitpunkt sind die Handlungsspielräume größer als wenn etwa schon ein Wettbewerbsergebnis oder konkrete Gebäudestellungen vorliegen. Konflikte können frühzeitig erkannt werden

und verschiedene Lösungsmöglichkeiten ausprobiert werden. In späteren Entwurfsphasen nimmt die Flexibilität und Offenheit dagegen deutlich ab.

Im Fall von formeller, durch die Aufstellung eines Bebauungsplans gesteuerter Nachverdichtung, sind dabei die rechtlich vorgesehenen Schritte nach dem Baugesetzbuch (BauGB) maßgebend. Anhang 3 zeigt die Schritte des Regelverfahrens sowie die Personen(gruppen) mit Schlüsselfunktionen und ihre Beteiligung in den einzelnen Phasen nach den rechtlichen Vorgaben. Die Größe der Kreise zeigt das Ausmaß des Einflusses, die Pfeile zeigen mögliche Einsatzzeitpunkte der CDP im Planungsprozess.

### *Zielgruppe CDP*

Die Analyse von Interviews mit Vertreter:innen zivilgesellschaftlicher Organisationen hat gezeigt, dass die CDP zwar als Grundlage für ein frühzeitiges Informieren der Zivilgesellschaft dienen kann, allerdings in der jetzigen Form aufgrund der Komplexität der Auswahloptionen und Informationen kein geeignetes Instrument für eine Bürger:innenbeteiligung ist. Die vorliegende Informationstiefe ist jedoch als Entscheidungsunterstützung für die Fachplanung wichtig. Die Verwendung der CDP zur Bürger:innenbeteiligung wird aber als Idee für zukünftige Forschung aufgegriffen. Die Interviewpartner:innen hielten beispielsweise einen Auszug der CDP-Ergebnisse in Form von Bildern als Diskussionsgrundlage bei Beteiligungen für sinnvoll.

Die Hauptzielgruppe der CDP sind Kommunen und Fachplanende aus den Bereichen Stadt- und Grünplanung, Klimaschutz bzw. -anpassung, sodass die CDP-Anwendung für diese Bedarfe optimiert wird. Diese Gruppe benötigt Informationen bei städtebaulichen und gebäudespezifischen Planungen zur Verbesserung der Klimaanpassung und zur Berücksichtigung des Klimaschutzes.

### *Anwendungsbereiche der CDP*

In den Interviews wurden vier verschiedene Anwendungsbereiche der CDP identifiziert (s. Abbildung 9). Darüber hinaus wurde ein weiteres Handlungsfeld aus projektinternen Abstimmungen ergänzt.





Abbildung 9: Darstellung der vier Anwendungsfelder der CDP basierend auf den Expert:inneninterviews.

### *Anwendungsbereich 1: Darstellung und Verknüpfung von Informationen*

Die CDP soll dazu dienen, Informationen aus unterschiedlichen Quellen darzustellen und diese mit Bezug auf das Planungsgebiet zusammenzuführen, um den Anwender:innen weitere Hinweise für Planungsentscheidungen zu geben. Dies können Grundlagendaten sein, wie etwa Grundwasservorkommen, unterirdische Leitungen, Altlastenkartierungen oder Schutzgebiete; aber auch demographische Daten, um eine Häufung von empfindlichen Nutzer:innengruppen anzuzeigen oder soziale Infrastruktur wie Kindergärten, Schulen und Krankenhäuser. Potenzialflächen für Photovoltaik oder Analysekarten aus Klimagutachten können weitere relevante Layer sein. Zur Umsetzung ist es erforderlich, dass ein Import von Vektor- und Rasterdaten in die CDP möglich ist und Layer überlagert werden können.

### *Anwendungsbereich 2: Entwurfsanalyse*

Die CDP soll darüber hinaus zur Analyse von Planungsentwürfen genutzt werden können. In den Interviews wurden drei Themencluster für die Entwurfsanalyse identifiziert: Außenraum, Gebäudeebene und Kosten.

Das Themencluster „Außenraum“ umfasst die thermische Aufenthaltsqualität im Freien (Schlagwort Hitzestress), die Durchlüftung (Berücksichtigung von Kaltluftschneisen für die nächtliche Abkühlung), Regenwassermanagement (Umgang mit Starkregenereignissen), die Kühlwirkung grüner Strukturen sowie Verschattung von Straßen, Plätzen und Gebäuden. Für eine klimaangepasste Planung spielt auch der Anteil der unter- bzw. überbauten Fläche sowie der Stellplatzbedarf eine wichtige Rolle.

Das Themencluster „Gebäudeebene“ umfasst Energie- und Lebenszyklusbilanzen (Schlagworte graue Energie, Stoffkreisläufe, CO<sub>2</sub>-Fußabdruck), thermischen Innenraumkomfort aufgrund der Relevanz für die nächtliche Erholung und den Heiz- und Energiebedarf sowie Tageslichtsimulationen. Für Stadtplaner:innen waren zudem Angaben über die erzielten m<sup>2</sup> Wohnfläche und Geschossflächenzahlen relevant.

Das Themenfeld Kosten zielt einerseits auf die Folgekosten von neu geplanter Infrastruktur und andererseits auf die (Unterhalts-)Kosten einzelner Grünmaßnahmen im Vergleich zu den Kosten einer technischen Ausstattung (z. B. Verschattungssysteme) ab.

### *Anwendungsbereich 3: Vergleiche von Planungen*

Vergleiche von Planungen in verschiedenster Form waren eine häufig gewünschte Funktion in den Interviews. Eine hohe Bedeutung hat der Vergleich verschiedener Planungsvarianten oder auch der Abgleich zwischen dem Status Quo und der vorgesehenen Planung, etwa in Form einer Gegenüberstellung oder durch Differenzkarten. Einige Befragte wünschten sich einen Abgleich bzw. eine visuelle Rückmeldung, in welchem Maß interne Zielvorgaben oder Kriterien durch die Planung eingehalten werden. Hier wäre eine Maske für die Eingabe solcher Zielwerte erforderlich. Ein Befragter hat auch Vergleiche mit anderen Kommunen angeregt, um einen neutralen Bewertungsmaßstab zu erhalten, im Sinne von „*Szenario A ist besser als Szenario B, aber ist Szenario A deswegen wirklich gut?*“

### *Anwendungsbereich 4: Visualisierung*

Hinsichtlich gewünschter Visualisierungsmöglichkeiten wurden vier Funktionen identifiziert:

- I) Darstellung der Lage im Quartier  
Was ist der lokale Kontext?
- II) Visualisierung von Blickbeziehungen in 3D  
Wie lassen sich die neuen / veränderten Gebäude integrieren?  
Wie werden sie aus Fußgänger:innenperspektive wahrgenommen?
- III) Darstellung von Einzelelementen mithilfe von Symbolen  
z. B. Baum, Brunnen
- IV) Visuelle Interpretationshilfen für die Ergebnisauswertung  
z. B. in Form von Farbskalen, Ampeln, Symbolgrößen

### *Anwendungsbereich 5: Ergebnisverwendung*

Bei projektinternen Abstimmungen hat sich zudem die Frage der Ergebnisverwendung und -speicherung gestellt. Wie lassen sich die Ergebnisse einer CDP-Planung weiter- und wiederverwenden, ist eine Speicherfunktion vorhanden? Ist es möglich, eine noch nicht abgeschlossene Planung zu einem späteren Zeitpunkt fortzuführen? Die Möglichkeit, Karten auszugeben und die Berechnung nachvollziehen zu können, ist wünschenswert.

#### 4.1.4 Zwischenfazit Anforderungen CDP

Der Großteil der gewünschten Anforderungen konnte im Zuge des Forschungsprojektes umgesetzt und in die CDP implementiert werden. Aufgrund des Prototypencharakters besteht allerdings in manchen Bereichen noch Optimierungsbedarf. Die CDP ermöglicht etwa grundsätzlich eine Hinterlegung von Vektor- und Rasterdaten zur Anzeige von Informationen, der Maßstab ist jedoch nicht frei wählbar, sondern starr voreingestellt, was eine Betrachtung des größeren Umfeldes erschwert. Hinsichtlich der Entwurfsanalyse wurden Methoden zur Echtzeitsimulation von verschiedenen Faktoren im Innen- und Außenraum entwickelt. Auf eine automatische Anzeige von möglichen Kosten wurde jedoch verzichtet. Zum einen fehlte dazu im Rahmen des Forschungsprojektes die Expertise, zum anderen wurden Kosten als nicht maßgebend relevant in der frühen Planungsphase, in der es um die Entwicklung von Ideen gehen soll, angesehen. Zudem schwanken die Kosten für einzelne Maßnahmen in Abhängigkeit von der Lage der Kommune, der Wahl der ausführenden Firmen sowie der allgemeinen politischen und wirtschaftlichen Lage, sodass pauschale Angaben wenig belastbar wären.

#### 4.2 Erprobung des Planungstools in Workshops

Um die Einsatzfähigkeit und die Funktionalität der CDP zu testen, wurden zwei Methoden angewandt: Zum einen wurden Workshops an der CDP durchgeführt, zum anderen wurden die Anwendungsmöglichkeiten anhand eines Fallbeispiels vertieft untersucht (Fallstudie Kempten, s. Kapitel 6).

Insbesondere die vielfältigen Anforderungen an das Tool, die aus den Befragungen in AP 5 hervorgegangen sind, haben die Relevanz von Workshops verdeutlicht, um die CDP als praxisnahes Entscheidungsunterstützungstool weiterzuentwickeln. Der direkte Austausch von Wissen, Meinungen und Befindlichkeiten im Rahmen eines Workshops sollte helfen, Herausforderungen und Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren und gemeinsam Lösungen zu entwickeln.

In dem Projekt fanden zwei Arten von Workshops statt (s. Abbildung 10): Ziel des ersten, internen Workshop war es, die Funktionalität der Plug-Ins für die CDP zu testen, Hinweise zur Bedienung der CDP zu erhalten, die benötigten Planungsinformationen und deren Darstellung zu prüfen sowie Erkenntnisse für die Planung des zweiten Workshops mit externen Akteur:innen zu generieren. Der zweite Workshop mit externen Expert:innen aus Verwaltung und Planungspraxis diente als Test für die Praxistauglichkeit des Tools und sammelte Verbesserungsvorschläge für die finalen Anpassungen der CDP.

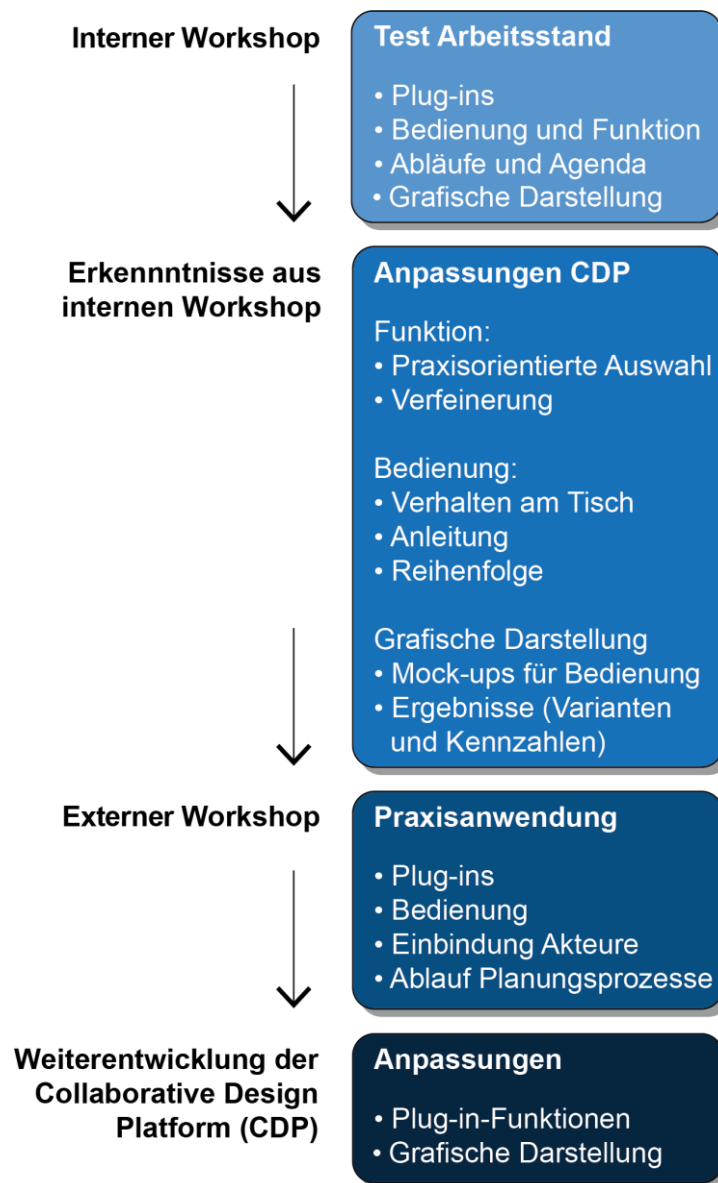


Abbildung 10: Einbezug der Workshops in die CDP Entwicklung.

#### 4.2.1 Interner Workshop mit Projektteam

Am 05. November 2021 fand ein vorbereitender Workshop statt, an dem alle Mitarbeiter:innen der unterschiedlichen APs beteiligt waren. Für die Planung des internen Workshops wurde eine Liste an Parametern erstellt, welche die zu erprobenden Funktionen umfasste. Zudem wurden Fragen bzw. Aufgaben formuliert, die von den Gästen beantwortet werden sollten.

Zur Dokumentation des Testlaufs wurden Notizen, Fotos und Videomitschnitte angefertigt. Aus diesem internen Testlauf ergaben sich für die Verbesserungen der CDP und für die Vorbereitung des Workshops mit externen Akteur:innen folgende Erkenntnisse:

- Vorbereitung einer Auswahl an Analysen und Verfeinerung von praxisrelevanten Funktionen (z.B. Darstellung des Baumbestandes), um die Diskussion anzuregen und den Anwendungsnutzen zu erhöhen
- Erstellung einer Anleitung für die Bedienung und das Verhalten an der CDP, um einen möglichst reibungslosen Ablauf sicherzustellen
- Erarbeitung von Szenarienvarianten und Mock-Ups für die grafische Gegenüberstellung, um Hemmnissen bei der Erprobung zu begegnen und die Analyse zu erleichtern
- Anpassung des zeitlichen und inhaltlichen Ablaufs für den Folgeworkshop, um eine Überfrachtung und Überforderung zu vermeiden



Abbildung 11: Eindruck aus dem internen Workshop.

Im Vordergrund die Projektion des Lageplans mit zusätzlichen analogen Klötzchen, die als fiktive Gebäude eines Nachverdichtungsszenarios dienen. Im Hintergrund eine erste Visualisierung der Analysen und Berechnung für dieses Szenario.

#### 4.2.2 Externer Workshop mit Expert:innen aus der Praxis

Am 05. Mai 2022 wurde ein zweiter Workshop mit externen Akteur:innen durchgeführt. Dieser hatte zum Ziel, das Entscheidungsunterstützungstool mit Vertreter:innen aus der Planungspraxis an einem Fallbeispiel (s. Kapitel 6) zu testen. Die teilnehmenden Akteur:innen sind in verschiedenen Planungsbereichen tätig, wodurch unterschiedliche, sektorenübergreifende Anforderungen an das Tool im unmittelbaren Einsatz getestet werden konnten. Die Vertreter:innen kamen aus folgenden Bereichen:

- Stadtplanung: Stadtplanungsamt (Kommune, in der das Fallbeispiel verortet ist)
- Grünplanung/Klimaanpassung: Expert:in aus dem Bereich Grünplanung und Ökologie (Universität)
- Wohnungsbau: Privates, nationales Wohnungsbauunternehmen (ca. 500.000 Wohnungen, Immobilieneigentümerin des Fallbeispiels, Erbpacht)
- Architektur: National tätiges Planungsbüro für Architektur und Stadtplanung (ca. 50 Mitarbeitende)
- Klimaschutz: Expert:in aus dem Bereich Energiekonzepte

Der Ablauf des Workshops kann Anhang 13 entnommen werden. Bestandteil des Workshops waren ein inhaltlicher Input von Mitarbeiter:innenseite zur Methodik und den Funktionen der CDP sowie eine Erprobungsphase der externen Akteur:innen anhand des Fallbeispiels Kempten.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden abschließend gemeinsam reflektiert. Zur Dokumentation wurden Notizen, Fotos und Videomitschnitte angefertigt.

#### 4.2.3 Ergebnisse des externen Workshops

Der Workshop wurde anhand von vier wesentlichen Themenfelder reflektiert: 1) Darstellung, 2) Kennwerte und Funktionen, 3) Interaktion, und 4) Anwendungsfelder.

Insgesamt gaben die Praxisexpert:innen eine positive Rückmeldung zu den entwickelten Funktionen der CDP. Der potenzielle Nutzen für die Praxis wurde von allen Teilnehmer:innen als sehr hoch eingeschätzt. Schwierigkeiten stellen derzeit die Störungsanfälligkeit der CDP und die ungewohnte neue Darstellungsart dar. Tabelle 1 stellt die einzelnen Ergebnisse des Workshops mit Kommentierungen zum Neuheitsgrad der Erkenntnisse und der weiteren Verwertung im Projekt dar.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse des externen Workshops.

	Erkenntnisse / Anregungen	Bemerkung
Darstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vereinfachte Klötzchendarstellung der Gebäude ausreichend für frühe Planungsphasen</li> </ul>	Bestätigung bisheriger Annahmen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wunsch nach mehr Darstellungsvarianten für Begrünung (z.B. verschied. Baumalter)</li> </ul>	Bestätigung bisheriger Annahmen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Farbliche Differenzierung von Bestand, Aufstockung und Neubau</li> </ul>	Umsetzung im Projekt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ergänzung Maßstabsleiste</li> </ul>	Umsetzung im Projekt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zielgruppenabhängige Detaillierungstiefe für Plug-Ins und Ergebnisdarstellungen</li> </ul>	Erstrebenswert, jedoch nicht im Rahmen des Projektes umsetzbar
	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 D Ansicht für alle modifizierbaren Elemente (Aufstockungen, Bäume), um umfassendes Bild des Entwurfes zu vermitteln</li> </ul>	Erstrebenswert, jedoch nicht im Rahmen des Projektes umsetzbar, Grundfunktionalität der CDP betreffend
Kennwerte und Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grund- und Geschossflächenzahl sowie Versiegelungsgrad als relevante Entwurfsparameter</li> </ul>	Umsetzung im Projekt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzeige von topographischen Informationen (Höhenlinien)</li> </ul>	Möglichkeit zur Darstellung, falls Daten vorhanden
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorher/Nachherabgleiche von Entwurfsvarianten</li> </ul>	Umsetzung im Projekt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exportfunktion zum Weiterbearbeiten der Szenarien</li> </ul>	Umsetzung im Projekt über Excel-Export
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusätzliche Klimafunktionen: detaillierte Windströmungen, Niederschlagssimulationen</li> </ul>	Außerhalb des Projektrahmens
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Darstellung von Herstellungs- und Betriebskosten</li> </ul>	Von Expert:innen eher für Investor:innen als für Kommunen als relevant angesehen
Interaktion	Benutzerfreundlichkeit entspricht Protoyp	Stabiles Werkzeug wichtig
	Intuitive Bedienung von hoher Wichtigkeit um Austausch und Diskussion zwischen den Planungsbeteiligten zu unterstützen	Eindeutige Darstellung, Handreichungen
Anwendungsfelder	<ul style="list-style-type: none"> <li>Städtebauliche Wettbewerbe</li> </ul>	Relevantes Anwendungsfeld
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Objektsanierung</li> </ul>	Vor allem Energiemodul
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwurfsanalyse und -optimierung</li> </ul>	Einsatz von Planungsbüros
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beteiligungsverfahren</li> </ul>	Zur Veranschaulichung von Entwürfen und zur faktenbasierten Kommunikation

## 5 Weiterentwicklung des Planungstools

Aufbauend auf der Bedarfsanalyse wurden neue Simulationsbausteine konzipiert und prototypisch auf dem Planungstool umgesetzt. Dies umfasste insbesondere die Aspekte Außenraum (Verschattung / thermischer Komfort), Energie und Ökobilanzierung. Die hierfür entwickelten Methoden werden im Folgenden erläutert.

### 5.1 Methodenentwicklung Außenraum

Aus der Interviewauswertung ging ein hoher Informationsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen geplanter Nachverdichtungsvorhaben auf den Außenraumkomfort hervor. Ein wichtiges Kriterium für die angestrebte Interaktivität auf der Planungsplattform ist die Simulation in Echtzeit, um den Entscheidungsprozess durch eine unmittelbare Quantifikation informiert gestalten zu können. Um dies zu erreichen, wurde der Simulationsprozess in Initialisierungsphase und Interaktionsphase aufgeteilt (s. Abbildung 12). Dies soll sowohl dem Anspruch nach Echtzeit als auch einer ausreichend hohen Genauigkeit gerecht werden.

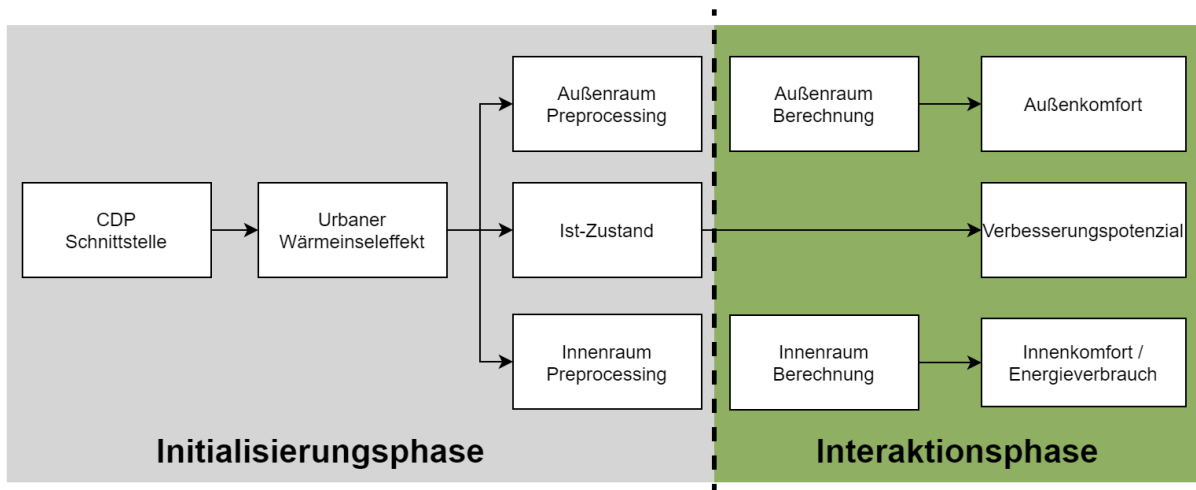


Abbildung 12: Methodik zur Trennung des Simulationsverfahrens in Initialisierungs- und Interaktionsphase.

In der Initialisierungsphase werden zeitintensive Simulationsschritte vorberechnet, um die Rechenzeit während der Interaktion mit den Nutzer:innen zu minimieren. Dies umfasst die Generierung von Stadtklimaszenarien, eine Analyse des Ist-Zustands und eine Vorprozessierung von Außen- und Innenraumsimulationen. Im Folgenden werden die für den Außenraumkomfort relevanten Schritte erläutert und die zugrundeliegende Methodik zur Simulation in der Interaktionsphase dargestellt.

#### 5.1.1 Vorberechnung und Überlagerung von Verschattungsvoxeln

Die Simulation der Verschattung im Außenraum basiert auf einer neu entwickelten Voxelmethode. Ein Voxel bildet ein diskretes Raumvolumen ab, welches durch seine x-, y- und z-Koordinaten eindeutig beschrieben wird. Simulationsergebnisse, beispielsweise für Verschattung oder Lufttemperatur, lassen sich für jeden Voxelpunkt bestimmen und können in einer mehrdimensionalen Matrix gespeichert werden. Dabei



kann jeder der Voxelpunkte mehrere Informationen beinhalten, beispielsweise Zeitserien oder Angaben zu Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte. Anstatt in der Interaktionsphase eine Neuberechnung des kompletten Betrachtungsgebietes bei jeder Änderung durchzuführen, werden nur im Umfeld der Änderung die Voxel-Matrizen neu berechnet. Entsprechend notwendige Methoden zur Berücksichtigung von Überschneidungen wurden im Rahmen des Projekts ebenfalls entwickelt und werden im Folgenden für die Aspekte Verschattung und Verdunstungskühlung erläutert. Die Anwendung zur Verschattungssimulation wurde im Rahmen der SimAUD Konferenz 2021 veröffentlicht (Gabriel et al., 2021).

Eine erste Implementierung der Voxelmethode für die Verschattung durch Bäume in stündlicher Auflösung über das Gesamtjahr konnte umgesetzt und validiert werden. Dies wurde am Beispiel von zwei Häuserblocks am Standort München durchgeführt. Die Kantenlänge des Untersuchungsgebietes betrug 50 x 100 Meter. Als beispielhafte Maßnahme zur Aufwertung der grünen Infrastruktur wurden in die Innenhöfe der Blöcke Bäume eingesetzt und ihre Verschattungswirkung untersucht. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der konventionellen Simulation (links) und der Voxelmethode (rechts) zu sehen. Im Mittel konnte eine Übereinstimmung von 99,2 % zur konventionellen Simulationsmethode erreicht werden. Die Zeitersparnis betrug dabei 97,6 %.

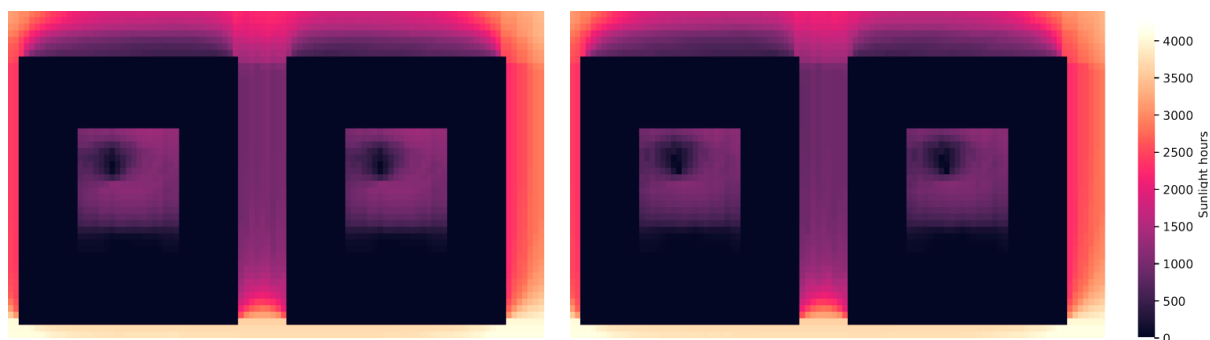


Abbildung 13: Erste Validierung der Voxelmethode in einem generischen Stadtquartier. Die Abbildung zeigt die Verschattung durch jeweils einen Baum in zwei Innenhöfen. Links bei konventioneller Simulation durch Ray-Tracing und rechts bei Anwendung der neuen Voxelmethode.

Weitere Erläuterungen zur Umsetzung der Methodik sowie den erzielten Ergebnissen können der entsprechenden Veröffentlichung (Gabriel et al., 2021) entnommen werden. Darüber hinaus wurden die Simulationszeit bei einer zunehmenden Zahl von Verschattungsobjekten untersucht. Hierfür wurde die beschriebene Methode mit einem konventionellen Tool zur Analyse von Sonnenstunden (Ladybug Tools; (Roudsari & Pak, 2013)) verglichen.

Es wurde ein generisches Gebiet von 100 x 100 m in einer Auflösung von 1 x 1 m mit einer zunehmenden Zahl an Verschattungsgeometrien (Winderlinde, T. Cordata, Abmessungen gem. (Rötzer et al., 2018)<sup>2</sup>) simuliert (s. Abbildung 14).

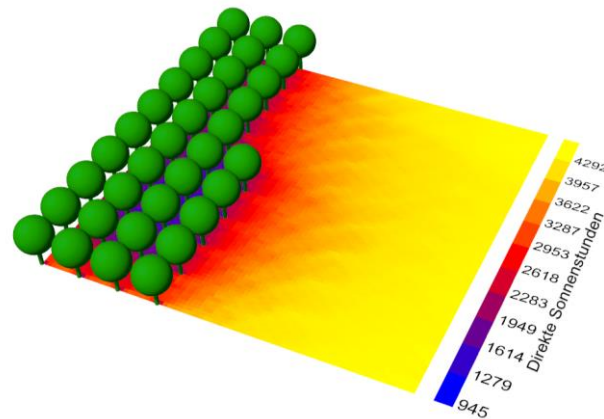


Abbildung 14: Simulationsgebiet mit variierender Zahl von Verschattungselementen (Bäumen) zur Prüfung der Rechenzeiten der Voxelmethode.

Die Simulationen wurden mit unterschiedlichen Rechenkapazitäten durchgeführt (1 Rechenkern / 4 Rechenkerne). Die Simulation der Voxelmethode wurde nur mit einem Rechenkern vorgenommen, da die Aufteilung auf mehrere Rechenkerne eigens in den Softwarecode implementiert werden müsste. Hier besteht künftig weiteres Optimierungspotenzial (s. Kapitel 9). Bereits mit der Anwendung auf nur einem Rechenkern konnten jedoch deutlich kürzere Simulationszeiten im Vergleich zu *Ladybug Tools* erzielt werden (s. Abbildung 15). Die Dauer zur Vorbereitung der Verschattungsmasken wurde in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da der Fokus auf der Simulation während der Interaktion mit dem Modell lag.

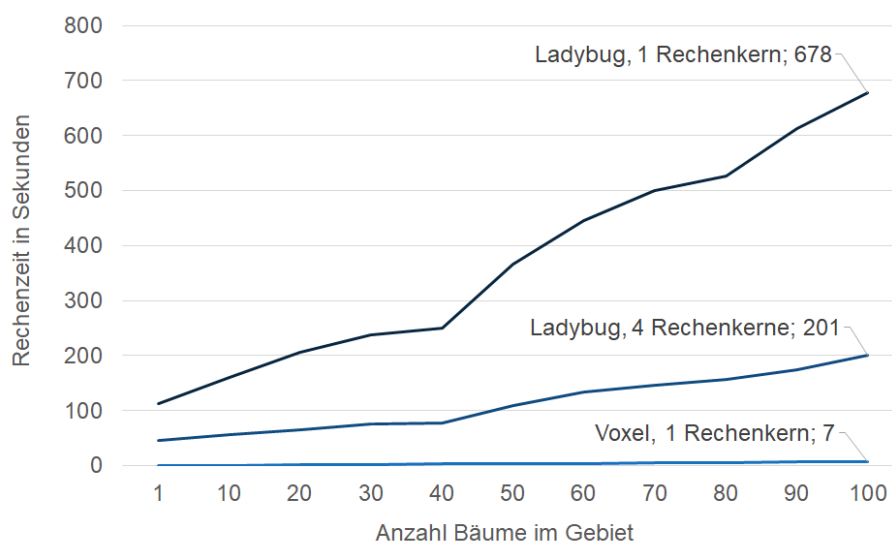


Abbildung 15: Vergleich der Rechenzeiten eines bestehenden Tools zur Verschattungssimulation und der Voxelmethode.

<sup>2</sup> Baumalter = 50 Jahre; Baumhöhe = 14,2 m; Kronendurchmesser = 9,0 m

Die entwickelte Methode ermöglicht zudem eine Berücksichtigung von Belaubungszuständen der Bäume über das Gesamtjahr. Dafür wurden im Rahmen der Implementierung auf der Planungsplattform Verschattungsmasken für belaubte (vereinfachter Zeitraum April bis Oktober) und unbelaubte (vereinfachter Zeitraum November bis März) Zustände vorsimuliert und anschließend manuell zu einer neuen Gesamtjahresmaske zusammengeführt. Die neu entstehende Maske konnte anschließend zur vereinfachten Berücksichtigung von Belaubungszuständen auf der Planungsplattform integriert werden.

### 5.1.2 Integration der Evapotranspiration

Neben der Verschattung durch Bäume und Gebäude beeinflussen mikroklimatische Veränderungen durch Verdunstungskühlung (Evapotranspiration) den Außenraumkomfort. Diese geht auf latente Wärmeströme bei der Verdunstung von Wasser über Oberflächen zurück. Dabei können besonders Großbäume Wassermengen von bis zu 340 Liter pro Tag verdunsten und dadurch zur Kühlung ihrer Umgebung beitragen (Rötzer et al., 2019). Zur Berücksichtigung der resultierenden Einflüsse auf Lufttemperatur und Luftfeuchte soll die dargestellte Voxelmethode um diese beiden Parameter erweitert werden. Die Umsetzung folgt dabei dem Grundgedanken der Vorberechnung und ist in Abbildung 16 zusammenfassend dargestellt.

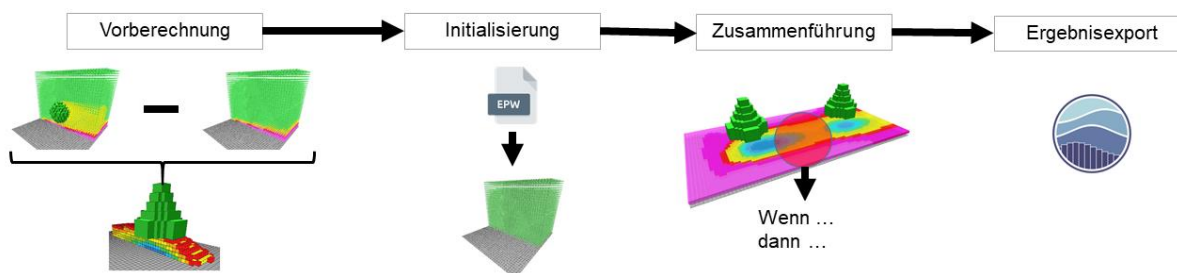


Abbildung 16: Vorgehen zur Integration der Evapotranspiration in die Voxelmethode.

Da die zur Vorberechnung von Verschattung verwendeten Tools nur eine eingeschränkte Bewertung von Evapotranspiration erlauben, wird auf die in diesem Arbeitsfeld verbreitete Software ENVI-met zurückgegriffen (Bruse & Fleer, 1998; Simon et al. 2018). ENVI-met wurde speziell für Außenraumsimulationen entwickelt und bildet Prozesse zwischen Vegetation und Mikroklima detailliert ab. Problematisch ist dabei die benötigte Simulationszeit von mehreren Stunden bis Tagen, die nicht für eine echtzeitnahe Bewertung vorgesehen ist. Die Vorteile dieses validierten Tools sollen jedoch in der Vorberechnung eingesetzt werden, um lokale Einflussmasken von Grünobjekten zu ermitteln. Dafür wird ein generisches Simulationsgebiet sowohl mit dem zu betrachtenden Objekt (z.B. einem Großbaum), als auch ohne dieses berechnet. Die Differenz der beiden Simulationen wird für jeden Koordinatenpunkt ermittelt und als Temperatur- bzw. Luftfeuchtemaske abgespeichert (vgl. Abbildung 16 - Vorberechnung). Für die Integration auf der Planungsplattform werden anschließend einheitliche Temperatur- und Luftfeuchtwerte aus der verwendeten Wetterdatei initialisiert. Somit liegt nach der Initialisierung für jeden Koordinatenpunkt

im dreidimensionalen Raum (Voxel) ein einheitlicher Wert vor. Die Phase der Vorberechnung ist damit abgeschlossen und es können Interaktionen erfolgen. Die vorberechneten Grünobjekte werden dabei auf dem Planungsgebiet platziert. Die initialisierten Voxelmasken mit einheitlichen Werten für Temperatur- und Luftfeuchte werden dann an den entsprechenden Koordinatenpunkten um die errechnete Differenz vermindert bzw. erhöht (Abbildung 16 - Zusammenführung). Nach Berücksichtigung der platzierten Grünobjekte können Lufttemperatur- und Luftfeuchte-Karten für das Gesamtgebiet erzeugt und auf dem Planungstool visualisiert sowie für weitere Berechnungen (s. Kapitel 5.1.3) verwendet werden (Abbildung 16 - Ergebnisexport). Zur Validierung dieser Methode wurde eine Ansammlung von Bäumen zunächst in ENVI-met simuliert und die verursachten Temperaturunterschiede im Betrachtungsgebiet erfasst. Anschließend wurde ein Einzelbaum simuliert und dessen Differenzmaske entsprechend der Anordnung in Abbildung 17 nach der beschriebenen Methodik mit den initialen Temperatur- und Luftfeuchtwerten verrechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 gegenübergestellt. Insgesamt wird ein Prognosefehler (Root Mean Squared Error, RMSE) von 0.38 K für die Temperatur sowie 0.67 % für die relative Luftfeuchte erreicht.

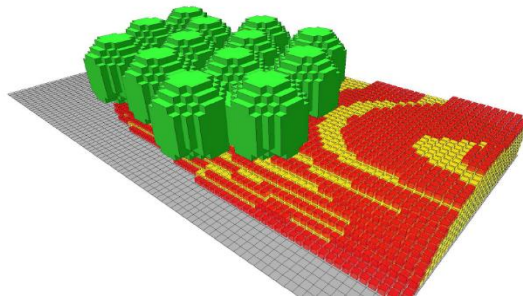


Abbildung 17: Anordnung von Bäumen (grün) zur Validierung der Vorberechnung von Evapotranspiration gelb-rote Punkte repräsentieren eine durch die Bäume hervorgerufene Differenz in der Lufttemperatur.

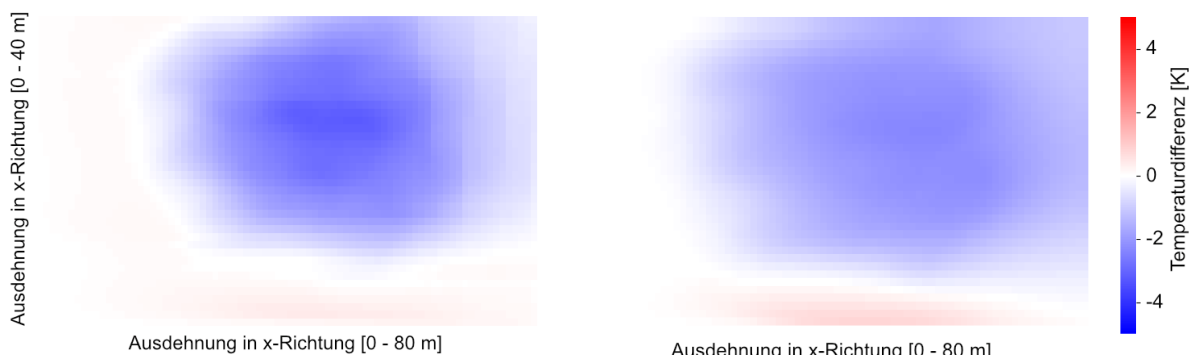


Abbildung 18: Resultierender Temperaturunterschied bei Simulation der Baumanordnung mithilfe der Voxelmethode, Vogelperspektive.

Abbildung 19: Resultierender Temperaturunterschied bei Simulation der Baumanordnung in ENVI-met, Vogelperspektive.

Die Simulationszeit betrug für die detaillierte Simulation in ENVI-met ca. 27 Stunden. Nach Vorberechnung erforderte die Summierung der Differenzmasken ca. 1 Minute. Dabei wurden mehrere Tagesstunden parallel betrachtet. Wird der Betrachtungsrahmen auf eine Stunde mit hoher Hitzebelastung reduziert, sinkt der Simulationsaufwand weiter.

Als weiteres Entwicklungspotenzial wurde in diesem Zusammenhang insbesondere der Effekt von Baumgruppen auf die Absenkung der Lufttemperatur bzw. die Erhöhung der Luftfeuchte identifiziert. Dieser kann nicht linear überlagert werden, sondern hängt sowohl von den Umgebungsbedingungen, als auch von der Gruppenkonstellation der Bäume ab (Zhao et al., 2020). Diese könnte durch Überlagerungsfaktoren in die Methodik integriert werden, welche allerdings in weitergehenden Untersuchungen definiert werden müssen. In diesem Zusammenhang ist auch ein Abgleich mit Messdaten zu empfehlen.

### 5.1.3 Bewertung des thermischen Außenraumkomforts

Die bislang dargestellten Berechnungsschritte können im Einzelnen als Anhaltspunkte für den thermischen Komfort im Außenraum herangezogen werden. Basierend auf den Interviewanforderungen soll jedoch eine zusammengeführte Bewertungskennzahl für den Außenraumkomfort ausgegeben werden. Hierfür wurde der Universal Thermal Climate Index (UTCI) gewählt, da dieser den Einbezug der bislang dargestellten Parameter ermöglicht (Błażejczyk et al., 2010). Zudem bietet der UTCI eine Skala zur Einordnung unkomfortabler Werte, welche in der Umsetzung des Planungstools als Orientierung für die Benutzer:innen verwendet werden kann. Einen Vergleich mit der ebenso gängigen Kennzahl Physiological Equivalent Temperature (PET) zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: UTCI und PET Bereiche und jeweiliges Temperaturempfinden (Matzarakis et al., 2015).

UTCI Bereich [°C]	PET Bereich [°C]	Temperaturempfinden
über +46	über 41	Extremer Hitzestress
+38 bis +46	35 bis 41	Sehr hoher Hitzestress
+32 bis +38	29 bis 35	Hoher Hitzestress
+26 bis +32	23 bis 29	Moderater Hitzestress
+9 bis +26	18 bis 23	Kein thermischer Stress
0 bis +9	13 bis 18	Leichter Kältestress
-13 bis 0	8 bis 13	Moderater Kältestress
-27 bis -13	4 bis 8	Hoher Kältestress
-40 bis -27	unter 4	Sehr hoher Kältestress
unter -40		Extremer Kältestress

Zur Berechnung des UTCI werden die Voxelmasken für Verschattung, Lufttemperatur sowie Luftfeuchte herangezogen. Zusätzlich fließt die Windgeschwindigkeit aus der hinterlegten Wetterdatei ein. Die Berechnung des UTCI erfolgt anschließend für jeden Voxelpunkt auf einer vorgegebenen Schnitthöhe. Diese muss dem Rastermaß der Voxel entsprechen (Minimum = 1 m) und wird zunächst auf 1 m gesetzt. Zur Validierung wird ein Vergleich von Berechnungsergebnissen aus der Voxelmethode mit den Ergebnissen aus Erlwein et al. (2021) herangezogen. Diese wurden mittels des Tools ENVI-met generiert sowie mit Messdaten abgeglichen. Zur Vergleichbarkeit wurden die bislang mit PET bewerteten Bedingungen mithilfe des Moduls „BioMet“ als UTCI ausgegeben (s. Abbildung 20).

Aus den dargestellten Ergebnissen kann eine gute Eignung der Voxelmethode zur Identifikation von Hitzeinseln festgestellt werden (s. Abbildung 21). Allerdings werden Abweichungen in der absoluten Höhe der Ergebnisse sichtbar. Diese sind unter anderem auf die verwendeten Tools und Berechnungsansätze für die Ermittlung der Mean Radiant Temperature (Strahlungstemperatur, MRT) zurückzuführen, welche in die UTCI Bewertung mit einfließt. Hierzu haben Naboni et al. (2017) gezeigt, dass verschiedene Tools zu teils erheblichen absoluten Abweichungen führen, innerhalb der jeweiligen Bewertung jedoch konsistent bleiben. Insbesondere die im Rahmen dieses Projekts verwendeten Tools (ENVI-met und Ladybug) weisen in diesen Untersuchungen eine hohe absolute Abweichung auf. Da die MRT als wesentlicher Parameter in die UTCI Berechnung einfließt, kann die absolute Abweichung der UTCI Ergebnisse zumindest teilweise darauf zurückgeführt werden. Für eine abschließende Bewertung wäre der weitere Abgleich mit vor Ort gemessenen Strahlungsdaten erforderlich.

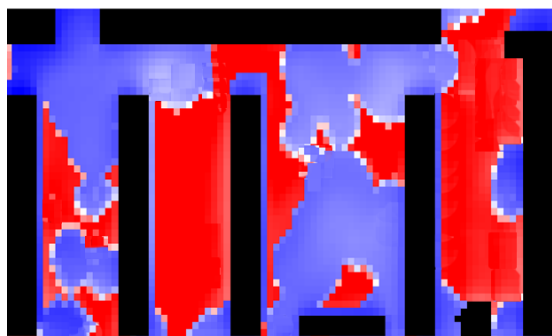


Abbildung 20: UTCI Ergebnisse aus ENVI-met für das Gebiet Moosach (Ergebnisse aus Erlwein et al., 2021).

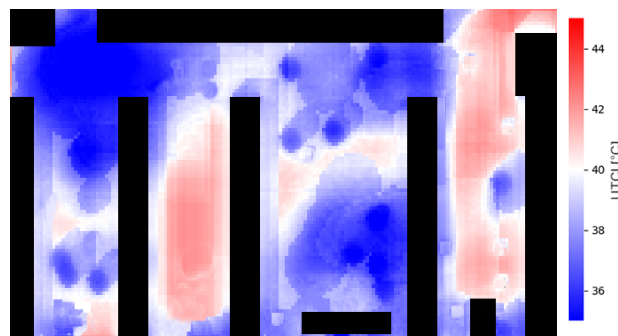


Abbildung 21: UTCI Ergebnisse der Voxelmethode für das Gebiet Moosach.

## 5.2 Methodenentwicklung Komfort und Energie

Neben der Berücksichtigung des Außenraumkomforts sollen auch Auswirkungen auf den Innenraumkomfort sowie den Energieverbrauch auf Gebäudeebene im Planungstool erfasst werden. Die folgenden Forschungsfragen müssen beantwortet werden, um das Energiemodul für die Integration in die CDP zu entwickeln:

- Wie groß ist der Einfluss des städtischen Wärmeinseleffekts (Urban Heat Island - UHI) und der Vegetation auf den Energieverbrauch und den Innenraumkomfort von Gebäuden?
- Ändert sich die Empfindlichkeit des UHI unter dem Einfluss des Klimawandels?
- Wie kann das Energiemodul entwickelt werden, um UHI- und Vegetationseffekte zu integrieren und Ergebnisse in Echtzeit bereitzustellen?

Auf der Grundlage der oben genannten Forschungsfragen wurde die Methodik entwickelt, die in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

### 5.2.1 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse Klimamodelle

Unter dem Einfluss des Klimawandels gewinnt der UHI an Bedeutung. Zur Untersuchung des UHI und Vegetationseffekten gibt es verschiedene Mikroklimasimulationstools. Diese Modelle unterscheiden sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie in der Simulationsmethodik, stationär vs. dynamisch.

In frühen Planungsphasen von Neubauten, Sanierungen oder Nachverdichtungen in Stadtteilen sind viele Einflussparameter (z.B. Vegetationsanteil, Oberflächen, Energiestandards) noch nicht definiert. Daher wird ein Werkzeug benötigt, das Erkenntnisse über die Relevanz dieser Parameter für das Außen- und Innenklima von Gebäuden liefert. Der Urban Weather Generator (UWG) ist ein mesoskaliges Simulationswerkzeug, das einen kompletten Stadtbezirk mit begrenzten Parameterdefinitionen simulieren kann (Bueno et al., 2012). Im UWG wird eine Methode namens Morphing angewandt, die Wetterdaten für thermische Gebäudesimulationen erzeugt und Klimaänderungen integriert (Belcher et al., 2005). Das UWG-Tool ist in der Lage, Vegetations- und Gebäudeparameter durch die Eingabe prozentualer Anteile zu berücksichtigen, um gemorphte<sup>3</sup> Wetterdaten für Stadtteile zu erzeugen. Im Rahmen des Projekts wurde eine Methodik entwickelt, die in frühen Planungsphasen integriert werden kann. Die Methodik ermöglicht Entscheidungsträger:innen sich im ersten Schritt auf die relevantesten Parameter zu konzentrieren und diese einzugrenzen. Die Methode und der Nachweis des Konzepts wurden im Zuge der CAADRIA-Konferenz 2022 veröffentlicht (Banihashemi et al., 2022).

Die Methode nutzt eine zufallsbasierte Monte-Carlo-Simulation für Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen. Die Unsicherheitsanalyse zeigt das Optimierungspotenzial, das durch die Festlegung von relevanten Parametern (Bebauungsdichte, Vegetationsanteil, etc.) erreicht werden kann. Die entwickelte Methodik kann iterativ im Entwurfsprozess von Stadtteilen und für verschiedene Klimaszenarien und Jahre eingesetzt werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Gebäudehöhe, der Albedo-Wert der Fassade, die Dichte und der Vegetationsanteil des gesamten Stadtteils einen

---

<sup>3</sup> Gemorpht bezeichnet in diesem Kontext die Veränderung von Wetterdaten unter Berücksichtigung der vorhandenen Baustrukturen. Die gemorphte Wetterdatei spiegelt dadurch die Effekte des UHI wider.

wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf der Gebäude haben, insbesondere auf den potenziellen Kühlbedarf (s. Abbildung 22).

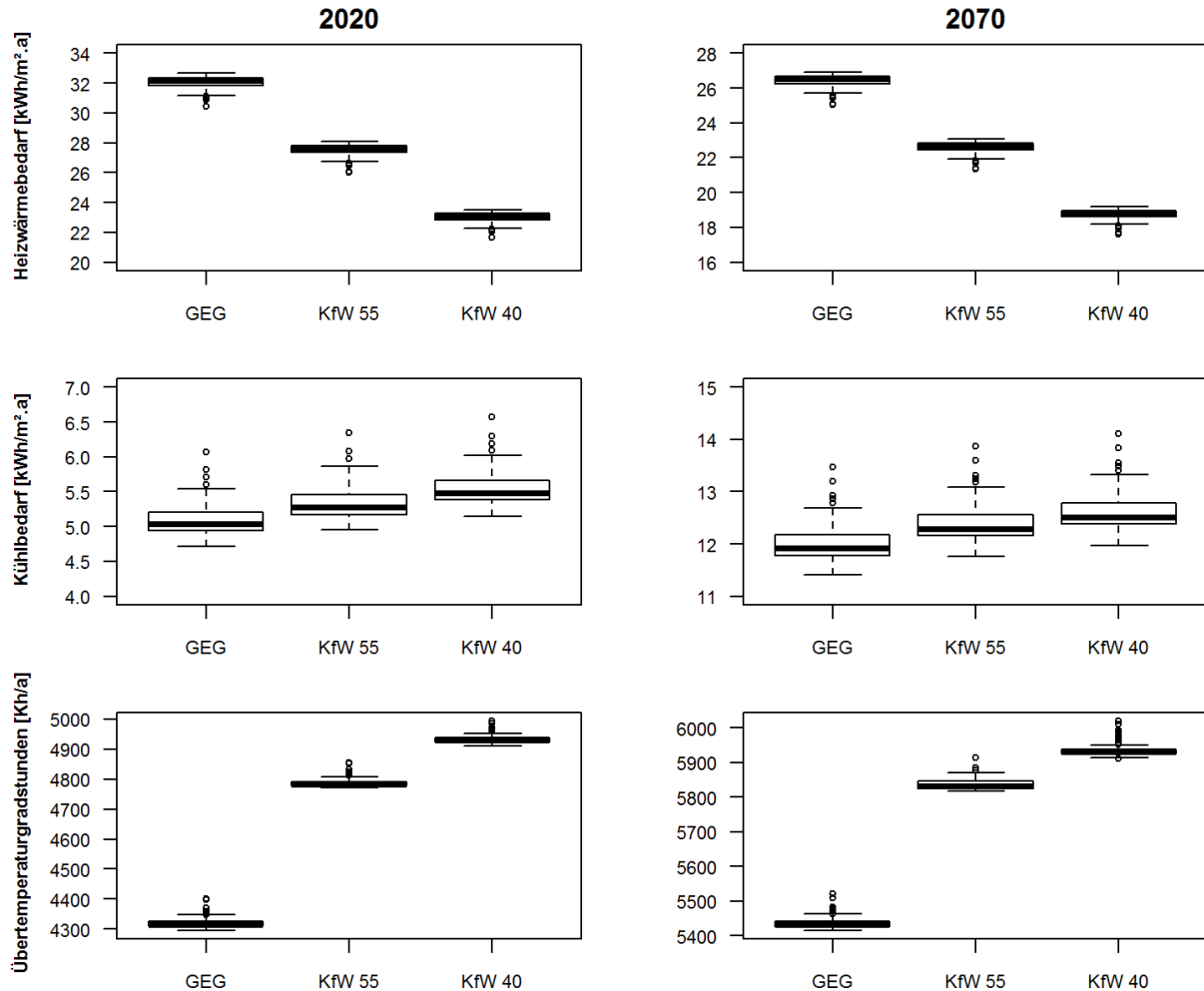


Abbildung 22: Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse des Urban Weather Generators.

Die Erkenntnisse des entwickelten Ansatzes wurden in das Energiemodul integriert, indem die ermittelten Stellhebel im Aufbau des Energiemodells berücksichtigt wurden (s. Kapitel 5.2.2).

## 5.2.2 Aufbau Energie- / Innenraummodell

Es gibt verschiedene Ansätze für Energiemodelle. Im Allgemeinen werden sie in drei Kategorien unterteilt: White-Box-, Grey-Box- und Black-Box-Modelle. White-Box-Modelle beruhen auf mathematischen und physikalischen Beziehungen zwischen Ein- und Ausgabeparametern. Energetische Gebäudesimulationen sind ein Beispiel dafür. Diese Modelle sind jedoch rechenintensiv und erfordern hohe Simulationszeiten. Da für die CDP Echtzeitsimulationen erforderlich sind, wurde dieser Ansatz nicht verfolgt. Black-Box-Modelle sind Modelle, bei denen die Beziehung zwischen Eingabe- und Ausgabeparametern nicht bekannt ist. Typische Beispiele im Bereich der



Energiesimulationen sind Metamodelle oder Ergänzungsmodelle, die auf Machine Learning (ML) basieren. Diese Modelle werden in der Regel anhand von Daten aus Energiesimulationen oder Energieverbrauchsdaten trainiert. Das Problem bei diesen Modellen ist, dass die Entscheidungsträger:innen nicht nachvollziehen können, was in dem Black-Box-Modell geschieht. Eine Lösung ist die Grey-Box-Modellierung, die eine Kombination aus White- und Black-Box-Modellen darstellt. Mit diesem Ansatz kann ein allgemeines Verständnis des Modells erlangt werden. Abbildung 23 fasst die unterschiedlichen Methoden zusammen.

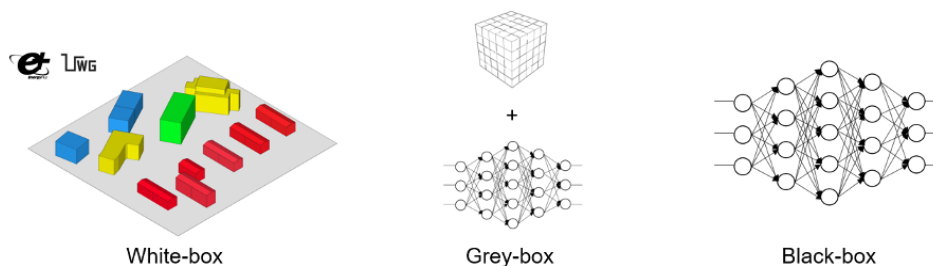


Abbildung 23: Vergleich verschiedener Simulationsmöglichkeiten zur Ermittlung des Energiebedarfs von Gebäuden.

Das Energiemodul basiert auf dem Ansatz der Grey-Box-Modellierung, bei dem die Simulationen mittels der Voxelmethode mit einem auf Machine Learning basierenden Metamodell kombiniert werden. Um das Metamodell zu erstellen (bzw. zu trainieren), werden synthetische Daten aus einer parametrischen Energiesimulation erzeugt. Die Eingangsparameter der Energiesimulation variieren hinsichtlich Geometrie, Orientierung, Fensterflächenanteile, Verschattung, Albedowerten und Baukonstruktion. Ziel ist eine möglichst breite Abdeckung möglicher Gebäudekonfigurationen. Diese wird durch die Latin Hypercube Sampling Methode gewährleistet, welche eine gleichmäßige Verteilung der Eingangswerte erzeugt (McKay et al., 1979) und so zu einer weitreichenden Abdeckung möglicher Parameterkombinationen führt. Auf dieser Basis werden die Simulationen durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse umfassen Heiz- und Kühlbedarf. Da im deutschen Wohngebäudebestand nur ein geringer Anteil mit Kühlgeräten ausgestattet ist (Umweltbundesamt, 2011; dena, 2021), wird im Folgenden der simulierte Kühlbedarf als potenzieller Bedarf geführt. Dieser dient als Indikator für den Innenraumkomfort. Da die Simulation des Kühlbedarfs dynamisch erfolgt und die Aktivierung der Kühlanlage in Abhängigkeit von der Innentemperatur gesteuert wird, kann der Kühlbedarf analog zu Übergradtemperaturstunden interpretiert werden (Day et al., 2006; Salata et al., 2021). Die Eingangsparameter und das Ergebnis bilden den Datensatz für das Training des Metamodells im nächsten Abschnitt. Insgesamt wurden hierfür 20.000 Parameterkombinationen simuliert.

Der durch das parametrische Modell erzeugte Datensatz wird verwendet, um ein auf Machine Learning (ML) und Deep Learning (DL) basierendes Metamodell zu trainieren. Die eingesetzten ML Algorithmen können aus den Ergebnissen und den

zugehörigen Ausgangswerten (Gebäudegeometrie und Eigenschaften) Muster erkennen und nach Abschluss des Trainingsvorgangs für Vorhersagen zu beliebigen Kombinationen von Eingangswerten verwendet werden. Hierzu wurden verschiedene ML- und DL-Modelle untersucht und die Genauigkeit der Vorhersagen des Metamodells im Vergleich zur Gebäudesimulation geprüft. Die entwickelten Modelle liefern Echtzeitsimulationen für die Integration in die CDP und tragen dazu bei die Abhängigkeit von Drittanbieter:innen Software zu vermeiden. Ziel ist es, das Metamodell und den LCA-Ansatz in einem nächsten Schritt zu kombinieren, um die Ergebnisse der Betriebs- und Grauenergie bzw. Emissionen zu berechnen. Die Methodik des Energiemoduls ist in Abbildung 24 zusammengefasst.



Abbildung 24: Zusammenfassung der Methodik zur Energiesimulation als Teil des Planungstools.

### 5.2.3 Validierung des Energiemodells

Die Validierung des erzeugten Energiemodells erfolgte anhand einer Gegenüberstellung mit einem Testdatensatz. Dieser wurde vor der Erzeugung des Energiemodells vom Gesamtdatensatz abgespalten und ist somit nicht in das Training des Modells eingeflossen. Die Eingangswerte dieser Testdaten wurden nach Abschluss der Modellerstellung verwendet, um eine Vorhersage mittels des Modells zu erzeugen (Abbildung 25: Predicted DNN heating/cooling demand [kWh/m<sup>2</sup>.yr]). Die Ergebnisse wurden den ursprünglich simulierten Werten aus dem Testdatensatz gegenübergestellt (Abbildung 25: Simulated heating/cooling demand [kWh/m<sup>2</sup>.yr]). Dabei zeigt sich für das in Abbildung 25 dargestellte Energiemodell 2020 eine sehr gute Übereinstimmung ( $R^2$  Heizen = 0,97;  $R^2$  Kühlen = 0,94). Das Energiemodell wird daher als ausreichend valide für die Verwendung in frühen Planungsphasen eingestuft.

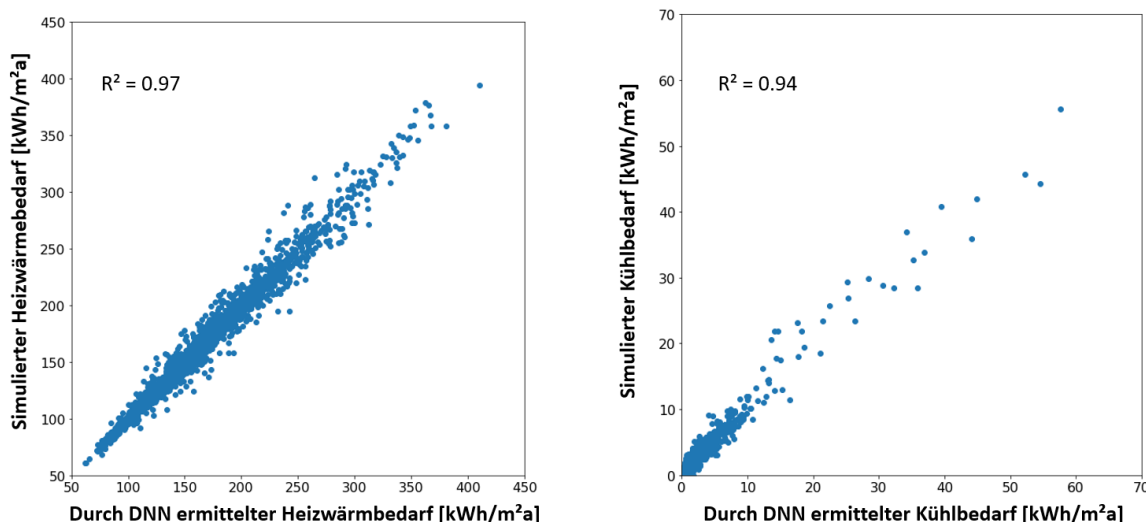


Abbildung 25: Validierungsplots des Energiemodells für 2020 (links: Heizwärmebedarf, rechts: Potenzieller Kühlbedarf).

### 5.3 Kombination von Energie- und Voxelmethode

Für die Berechnung der Energiebedarfe sollen Ergebnisse aus der Voxelmethode eingesetzt werden, um die Auswirkungen von zusätzlicher Verschattung und damit geringeren solaren Gewinnen aufzuzeigen. Dafür wurde im Energiemodell der Eingangsparameter „Verschattung“ in vier Himmelsrichtungen vorgesehen. Als Verschattung wird dabei der Quotient aus maximal möglichen Sonnenstunden je Himmelsrichtung und der tatsächlich über das Gesamtjahr simulierten Sonnenstunden je Himmelsrichtung herangezogen. Im Energiemodell wurde hierfür ein variierender Transparenzgrad einer vollflächigen Verschattungsfläche vor der Fassade simuliert und dieser als Trainingswert herangezogen. Da dadurch eine Mittelung der Verschattung über die Fassadenflächen erforderlich wird, wurde im Zuge der Bearbeitung geprüft, welchen Einfluss diese Annahme auf die Ergebnisse hat. Diese Untersuchungen werden im Folgenden dargelegt. Anschließend wird die Methodik zum Informationsaustausch zwischen Voxelmethode und Energiemodell erläutert.

#### 5.3.1 Einfluss der Lage der Verschattungsfläche

Zunächst wurde der Einfluss der Lage einer gleichbleibenden Verschattungsfläche vor der Fassade eines Gebäudes der Baualtersklasse A<sup>4</sup> mithilfe mehrerer Energiesimulationen (EnergyPlus 8.9.0) untersucht. Da diese Baualtersklasse sehr schlechte Dämmeigenschaften aufweist wird erwartet, dass hier die größten Einflüsse aus Verschattung auftreten. Die Verschattungsfläche wurde an 20 verschiedenen Positionen in unmittelbarer Nähe zur Fassade platziert (s. Abbildung 26). Die Fensterflächen (Anteil = 22 %) wurden dabei regelmäßig über die Geschosse verteilt.

<sup>4</sup> Baualtersklasse A umfasst Gebäude mit Baujahren vor 1859. Es werden die U-Werte [W/m².K] des in TABULA hinterlegten Beispielgebäudes herangezogen: Dach = 2,6; Wand = 2,0; Fenster = 2,8; Gründung = 1,2

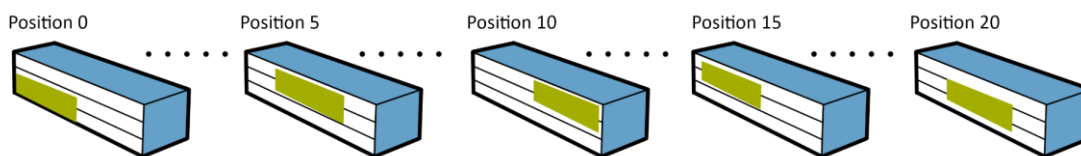


Abbildung 26: Parametrische Platzierung einer Verschattungsfläche zur Prüfung des Einflusses der Lage auf den Energiebedarf.

Die Auswertung der resultierenden Energiebedarfe ergab Variationskoeffizienten<sup>5</sup> von 1,69 % für den Heizwärme- sowie 3,13 % für den potenziellen Kühlbedarf. Demnach spielt für die betrachtete Konstellation die Lage der Verschattungsflächen für die Simulation des Energiebedarfs nur eine untergeordnete Rolle. Für den Fall von nicht gleichmäßig über die Fassade verteilten Fenstern wird eine deutlich größere Abweichung erwartet. Da im Zuge des Projekts allerdings ausschließlich frühe Planungsphasen, in welchen die konkrete Aufteilung von Fensterflächen i.d.R. noch nicht feststeht, betrachtet werden, wird die Annahme regelmäßig verteilter Fensterflächen für die folgenden Untersuchungen getroffen.

### 5.3.2 Vergleich von Transparenz und Verschattung

Um die Validität der getroffenen Vereinfachungen hinsichtlich einer Mittelung der Verschattungswerte über die Gesamtfassade zu überprüfen, wurde eine parametrische Untersuchung verschiedener Fenster- und Verschattungskonstellationen vorgenommen. Dazu wurden Bäume als Verschattungsobjekte vor der Südfassade eines Testgebäudes platziert und der prozentuale Anteil der Sonnenstunden über das Gesamtjahr auf der Fassade berechnet. Dieser Wert wird für den zweiten Simulationslauf benötigt und entspricht den aus dem Voxelmodell resultierenden Angaben (Transparenzwert). Gleichzeitig wurde die Energiesimulation für diese Konstellation mit konventioneller Software (EnergyPlus) durchgeführt. Eine zweite Energiesimulation mit einer vollflächig vorgesetzten Fläche, welcher der ermittelte Transparenzwert zugewiesen wurde, stellt die Vorgehensweise des Voxelmodells in Kombination mit dem Energiemodell nach. Abbildung 27 fasst die Fragestellung und Untersuchungsmethodik zusammen. Ausgehend von der Hypothese, dass die Auswirkung der Verschattung einer Fassade mit der Auswirkung einer transparenten Fläche vor der Fassade vergleichbar ist, wurden fünf Basisfälle für unterschiedliche Fensterflächenanteile (WWRs) analysiert. Durch die Veränderung der Lage des Verschattungsobjekts wurden für jeden Fall 20 Iterationen simuliert.

<sup>5</sup> Der Variationskoeffizient beschreibt das Maß der Wertestreuung im Verhältnis zum Mittelwert und stellt so einen dimensionslosen Vergleich unterschiedlicher Größen dar.

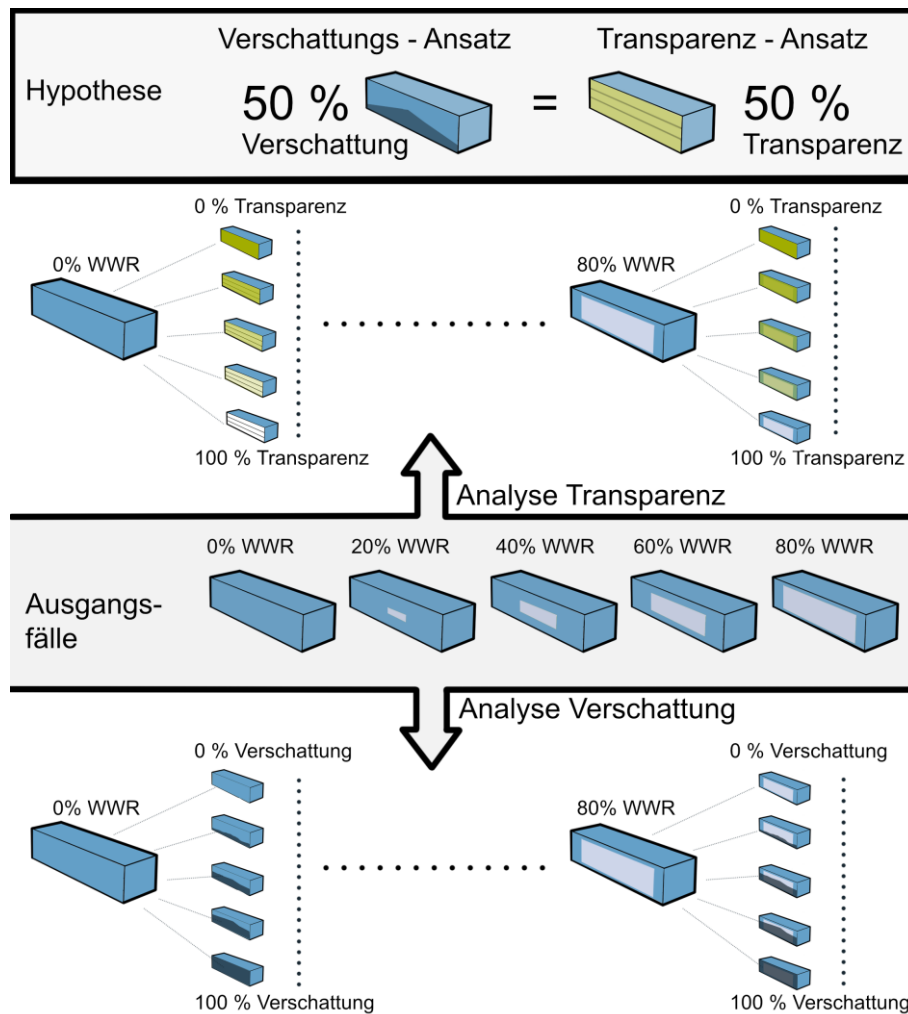


Abbildung 27: Vorgehensweise zur Prüfung der Hypothese „Verschattung = Transparenz“ zur Vereinfachung der Kontextverschattung im Energiemodell.

Die Ergebnisse zeigen die festgestellten Abweichungen des Heiz- bzw. Kühlbedarfes (RMSE – Root Mean Squared Error) zwischen den Ergebnissen der Schatten- und Transparenzsimulationen. Diese nehmen mit steigendem Fensterflächenanteil zu, wie in Abbildung 28 dargestellt. Dies lässt den Schluss zu, dass die Hypothese, die Kontextschattierung durch einzelne Transparenzwerte darzustellen, nur für kleine Fensterflächenanteile zutreffend ist. Weitere Untersuchungen sollten sich auf das nichtlineare Verhalten konzentrieren, um die Gültigkeit der vorgeschlagenen Vereinfachungen näher zu prüfen. Die Verwendung der Strahlungsintensität als Eingangswert zur Bildung des Energiemodells könnte ebenfalls zur Verbesserung der Ergebnisse beitragen und sollte näher untersucht werden.

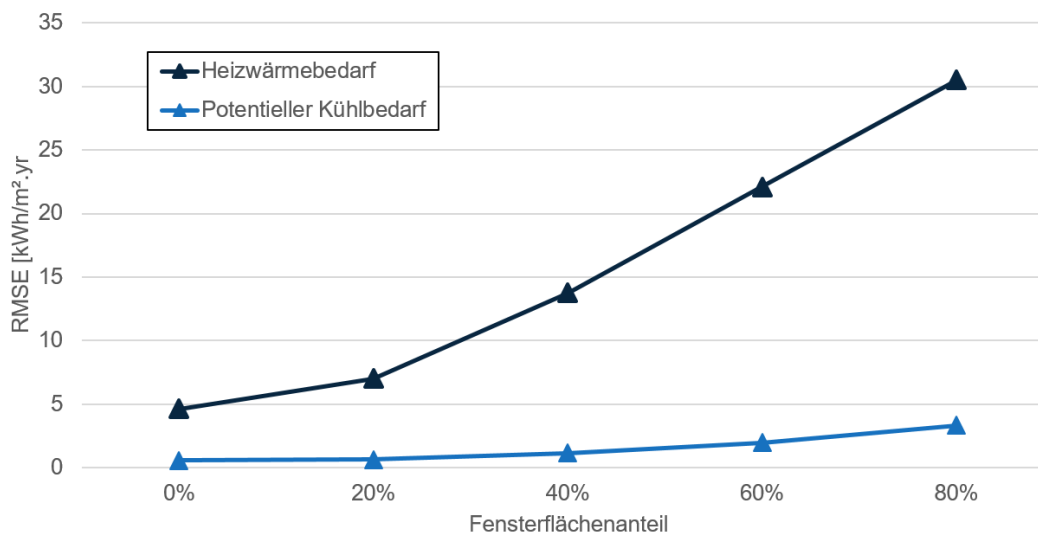


Abbildung 28: Ergebnisse der parametrischen Untersuchung zur Vereinfachung der Kontextverschattung im Energiemodell.

### 5.3.3 Informationsaustausch zwischen Voxelmethode und Energiemodell

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, wurden sowohl das Energiemodell, als auch die entwickelte Voxelmethode als interagierende Bausteine konzipiert. Im Folgenden wird die Kopplung der Methoden näher erläutert, um für anschließende Arbeiten eine Grundlage für deren Weiterentwicklung zu bieten. Zur Erstellung des Energiemodells wurde der Ansatz vollflächiger Transparenzflächen zur Berücksichtigung der Verschattung gewählt. Dadurch konnte der Informationsbedarf auf einen Wert je Fassadenfläche (Transparenz in %) reduziert werden. Die damit einhergehenden Ungenauigkeiten und Entwicklungspotenziale wurden in den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 dargelegt. Demnach sollten weitere Kennwerte zur Ermittlung eines derartigen Faktors untersucht werden. Im Zuge der prototypischen Entwicklung der Voxelmethode wurde als Transparenzwert der prozentuale Anteil der nicht durch z.B. Bäume oder Gebäude blockierten Sonnenstunden an den maximal möglichen Sonnenstunden eines Standorts herangezogen (am Standort München beispielsweise 4.450).

Um die nicht blockierten Sonnenstunden zu ermitteln, werden die x, y und z Koordinaten von jeweils 15 regelmäßig über die nördlich, östlich, südlich und westlich ausgerichteten Fassadenflächen der zu bewertenden Gebäude verteilte Punkte (= Voxel) ermittelt. Für die ermittelten Punkte können aus dem simulierten Voxel-Datensatz der Sonnenstunden die relevanten Werte gefiltert, über das Gesamtjahr aufsummiert und ins Verhältnis zu den maximal möglichen Sonnenstunden gesetzt werden. Dadurch werden 15 Verschattungswerte je Fassadenfläche gebildet und anschließend gemittelt. Der resultierende Wert wird ins Verhältnis zu den maximal möglichen Sonnenstunden gesetzt. Wird beispielsweise aus den Fassadenpunkten

der Westfassade eines Gebäudes ein Durchschnitt von 3.000 Sonnenstunden ermittelt, beträgt die Transparenz für die Westseite 67,4 %. Die so ermittelten Transparenzwerte bilden die Inputs für das Energiemodell und werden über die integrierte Datenbank (vgl. Kapitel 5.5.3) zwischen Voxel- und Energiemodell ausgetauscht. Da es sich bei der Ermittlung der Verschattungswerte ausschließlich um Datenbankoperationen handelt, können sehr kurze Rechenzeiten (< 1 Sekunde) erzielt werden, wodurch das Ziel der hohen Interaktivität für die Nutzenden sichergestellt wird.

## 5.4 Methodenentwicklung ökologische Lebenszyklusanalyse

Zur ganzheitlichen Bilanzierung der aus Nachverdichtungsmaßnahmen resultierenden Umweltwirkungen werden diese mittels einer ökologischen Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz oder Life Cycle Assessment (LCA)<sup>6</sup>, bewertet. Ziel ist die Visualisierung von Optimierungspotenzialen in interaktiven 3D-Quartiersmodellen. Dabei stehen neben den Energieströmen der Nutzungsphase des Gebäudes besonders die Energie- und Stoffströme der Herstellungs- und Entsorgungsphase der Gebäude im Fokus der Bilanzierung.

### 5.4.1 Methodik und Systemgrenzen

Nachverdichtungsmaßnahmen können sowohl in Form von Neubauten (z. B. Konversion), als auch durch den Eingriff in bestehende Gebäudestrukturen (z. B. Aufstockung, Anbau) umgesetzt werden. Für Neubauten, die keine bauliche Verbindung zum Bestand aufweisen, wird dabei die genormte Vorgehensweise zur Ökobilanzierung angewandt. Dafür werden die in der DIN EN 15978:2012-10<sup>7</sup> (Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode) definierten Lebenszyklusphasen getrennt betrachtet. Aufgrund der z. T. eingeschränkten Datenlage können dabei oft nicht alle Lebenszyklusphasen einbezogen werden (König, 2017), weshalb diese im Rahmen des Projekts auf die Herstellungsphasen A1 - A3, den Austausch von Bauteilen (B4) sowie die Entsorgungsphasen C3 - C4 beschränkt werden. Die Phase D (Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze) wird gesondert dargestellt. Der Energieverbrauch im Betrieb (Phase B6) wird unter Zugrundelegung der Ergebnisse aus dem Energiemodell (s. Kapitel 5.2) in Kombination mit den Kennwerten der Online-Datenbank Ökobaudat (BBSR, 2021) ermittelt. Diese Datenbank beinhaltet auf Baustoffe bzw. Energieträger bezogene Faktoren zur Ermittlung von Umweltwirkungen über den Lebenszyklus auf Basis von deren Referenzflüssen (z. B. CO<sub>2</sub>-eq. Emissionen je Kilowattstunde elektrischer Energie). Zudem fließen Daten zu

---

<sup>6</sup> In diesem Bericht wird unter LCA stets die ökologische Lebenszyklusanalyse verstanden, das Kürzel eLCA bezeichnet die Online-Software zur Berechnung von Ökobilanzen ([www.bauteileditor.de](http://www.bauteileditor.de), abgerufen am 29.11.2022).

<sup>7</sup> Die DIN EN 15978:2012-10 befindet sich zum Zeitpunkt der Berichterstellung in Überarbeitung (Entwurfsstadium: DIN EN 15978-1:2021-09-Entwurf).

den grauen Emissionen der Wärmeerzeuger in die Berechnung mit ein, welche aus (Harter, 2021) bezogen werden.

Die durch Herstellung, Austausch und Entsorgung der Baukonstruktion hervorgerufenen Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbräuche („graue Emissionen“ bzw. „graue Energie“) werden bauteilbasiert berechnet. Dabei erfolgt die Ermittlung von Sachbilanzen (Sammlung der vorhandenen Materialien) sowie Wirkbilanzen (Überführung der identifizierten Materialien und deren Mengen in Umweltwirkungen, z.B. CO<sub>2</sub>-eq., erneuerbare Primärenergie, nicht erneuerbare Primärenergie) je Quadratmeter Bauteilfläche. Dadurch wird eine eigene Datengrundlage zur schnellen Hochrechnung von Gebäudekubaturen in Kombination mit den Umweltwirkungen je Quadratmeter Bauteilfläche geschaffen. Der dafür notwendige Bauteilkatalog wird auf Basis einer Literaturrecherche aufgebaut und soll für die betrachteten Nachverdichtungsmöglichkeiten sowie den Neubau gängige Baukonstruktionen abbilden. Als Referenzlebensdauer werden 50 Jahre definiert und die Lebensdauern von Bauteilschichten nach den Vorgaben des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) herangezogen (BBSR, 2017). Für den Vergleich von Gebäuden bildet 1 m<sup>2</sup> Netto-Geschossfläche die funktionelle Einheit. Durch die beschriebene Vorgehensweise können sehr schnell Wertebereiche für die Wahl verschiedener Konstruktionsvarianten berechnet und den Nutzer:innen als Entscheidungsgrundlage direkt auf dem Planungstool zur Verfügung gestellt werden.

Der aktuelle Stand von Forschung und Technik auf dem Gebiet der lebenszyklusbasierten Analyse von Nachverdichtungsvorhaben zu geben, wurde im Rahmen einer Literaturrecherche zusammengetragen. Dabei wurde insbesondere der im Rahmen des Zukunft Bau Projekts „Leitlinie zur Vereinfachung der Planung und Durchführung von Aufstockungs-/ Erweiterungsmaßnahmen als Nachverdichtungsmaßnahme in innerstädtischen Bereichen“ entwickelte Ansatz zur Ökobilanzierung bei Gebäudeaufstockungen als geeignet für die Anpassung und Erweiterung von Wohngebäuden im Rahmen dieses Projekts identifiziert (Hafner et al., 2019; Fath et al., 2019). In der darin beschriebenen Methodik werden für rückgebaute Bauteile ausschließlich die Entsorgungsphasen berücksichtigt, neu hinzukommende Elemente werden hingegen über deren kompletten Lebenszyklus erfasst. Da dies auch Kenntnisse zum Gebäudebestand erfordert, wird die entsprechende Datengrundlage im folgenden Kapitel näher erläutert.

Neben der Bewertung auf Gebäudeebene soll eine aggregierte Darstellung für den Vergleich von Quartierskonzepten erarbeitet werden. Diese kann zusätzlich zu gebäudebezogener Begrünung (Dach-/ Fassadengrün) auch freistehendes Grün in der Bewertung erfassen (vor allem Bäume).

#### **5.4.2 Aufbau der Datengrundlage für Baukonstruktion**

Die Auseinandersetzung mit dem Bestand bildet die Grundlage für die Erarbeitung von Nachverdichtungskonzepten. Veränderungen an bestehenden Strukturen erfordern häufig Eingriffe und Rückbauten. Die mit Behandlung und Entsorgung rückgebauter Materialien verbundenen Umweltwirkungen sollten daher in die



Ökobilanzierung einer Nachverdichtungsmaßnahme einfließen. Für den bayerischen und deutschen Wohngebäudebestand liegen entsprechende Daten nur sehr begrenzt vor. Eine der umfangreichsten Untersuchungen wurde durch das Institut für Wohnen

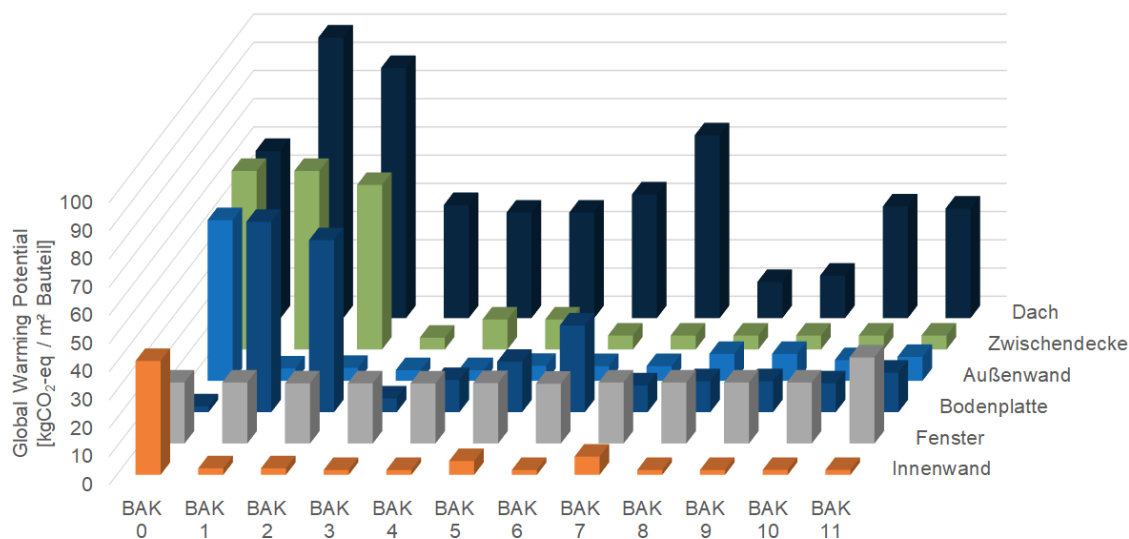


Abbildung 29: Darstellung des Treibhausgaspotenzials nach Baualtersklassen (BAK) und Bauteilen je m² Bauteilfläche für die betrachteten Lebenszyklusphasen der Entsorgung (C3 + C4) für Mehrfamilienhäuser.

und Umwelt (IWU) im Rahmen des TABULA Projekts (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der energetischen Beurteilung des Gebäudebestandes. Es wurden u.a. Beispielgebäude für verschiedene Baualtersklassen<sup>8</sup> (BAK) identifiziert (Loga et al., 2015). Eine Verknüpfung von Materialien und Ökobilanzdaten wurde bislang allerdings nicht vorgenommen. Um die vorhandenen Informationen für die Ökobilanzierung im Rahmen dieses Projekts verwendbar zu machen, wurden die Materialangaben der Beispielgebäude für Einfamilien-, Mehrfamilien- und Reihenhäuser mit den Datensätzen aus der Ökobaudat verknüpft und pro Quadratmeter Bauteil ausgegeben (s. Abbildung 29). Auswertungen für die erneuerbare sowie nicht erneuerbare Primärenergie finden sich in Anhang 4.

Daraus können Bauteile mit großem Einfluss auf die Emissionswerte von Eingriffen in den Gebäudebestand abgeleitet werden. Der Rückbau von Dachkonstruktionen kann demnach eine wichtige Rolle in der Bewertung einnehmen, da die dort weit verbreitete Holzbauweise zu hohen Emissionen aus der thermischen Verwertung führt. Zudem weisen ältere BAKs im Durchschnitt höhere Emissionswerte je Quadratmeter Bauteil auf, da die dort vorliegenden Aufbauten für Wand- und Zwischendeckenkonstruktionen ebenfalls häufiger in Holzbauweise ausgeführt sind. Auf Basis der ausgewerteten Daten kann festgestellt werden, dass die Konstruktionen im Bestand erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Treibhausgaspotenzials aus Rückbau und Entsorgung aufweisen. Eine gebäudescharfe Bewertung rein auf Grundlage des Baualters kann demnach zu Verzerrungen führen. Für gebäudespezifische Aussagen

<sup>8</sup> BAK 0 bzw. A entspricht dabei Gebäuden mit Baujahr vor 1859, BAK 11 bzw. L Gebäuden ab dem Jahr 2016. Die genaue Einstufung der Baujahre kann (Loga et al., 2015) entnommen werden.

sollte daher eine konkrete Untersuchung des Bestandes vorliegen. Für die Betrachtung der Quartiersebene im Rahmen dieses Projekts werden die ermittelten Werte als Grundlage für die Untersuchung von Szenarien herangezogen. Es besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der im Bestand verbauten Materialien, um die Potenziale und Einflüsse aus deren Rückbau gebäudespezifischer bewerten zu können.

Zur Schaffung einer Datengrundlage für den Neubau wurden typische Konstruktionsaufbauten für verschiedene Varianten der Nachverdichtung (Aufstockung, Anbau, Lückenschluss) betrachtet. Dafür wurden mittels einer Literaturrecherche Quellen zu möglichen Aufbauten zusammengetragen. Anschließend erfolgte die Modellierung der Neubaukonstruktionen im Online LCA Tool des Bundes (eLCA). Die darin ermittelten Werte pro Quadratmeter Bauteil wurden als Datenbasis für die Berechnung der Ökobilanz anhand des Volumenmodells der Gebäude genutzt. Nachfolgende Tabelle stellt die betrachteten Quellen und die daraus bezogenen Informationen zusammen:

*Tabelle 3: Verwendete Datengrundlagen für die Erstellung von Neubaukonstruktionen.*

<b>Allgemeine Grundlagen</b>	<b>Spezifische Grundlagen</b>	<b>Verwendete Tools</b>
Bachinger et al., 2018	GEG, 2020	BBSR, 2021
Cremers, 2015	Holzforschung, 2021	Ubakus, 2021
Giebeler et al., 2008	IZ Beton, 2021	
Kaufmann et al., 2017	KfW, 2021a, 2021b, 2021c	
Pfeifer et al., 2001	König, 2020	
	Sakret, 2021	
	Verbraucherzentrale, 2020	
	ZinCo, 2020	

### 5.4.3 Aufbau der Datengrundlage für Sanierungsszenarien

Da in frühen Planungsphasen meist noch keine exakte Definition der vorgesehenen Materialien vorliegt, wurden neben den beschriebenen Neubaukonstruktionen auch Kennwerte für verschiedene Sanierungsstandards und damit verbundene Materialqualitäten gebildet. Im folgenden Abschnitt wird die hierfür herangezogene Methodik sowie der Einsatz in der Ökobilanzierung am Planungstool beschrieben.

Basierend auf einer Kategorisierung von Dämmstoffen im Artikel Longo et al. (2019), wurden Dämmmaterialien ausgewählt und anhand ihrer grauen Treibhausgasemissionen und grauen Primärenergie gruppiert. Entsprechend der in Abbildung 30 dargestellten Dämmstoffe, wurden vergleichbare Dämmmaterialien aus

der Ökobaudat (2020-II) zugeordnet, da verwendete Daten aus LCA-Datenbanken meist nicht unmittelbar gegenübergestellt werden können (Karunaratne & Dharmarathna, 2022). Die dadurch geschaffene, konsistente Datengrundlage diene als Ausgangspunkt für die weitere Gruppierung. Sofern ein Dämmstoff nicht in der Ökobaudat hinterlegt war, ist er nicht in die Bewertung eingeflossen.

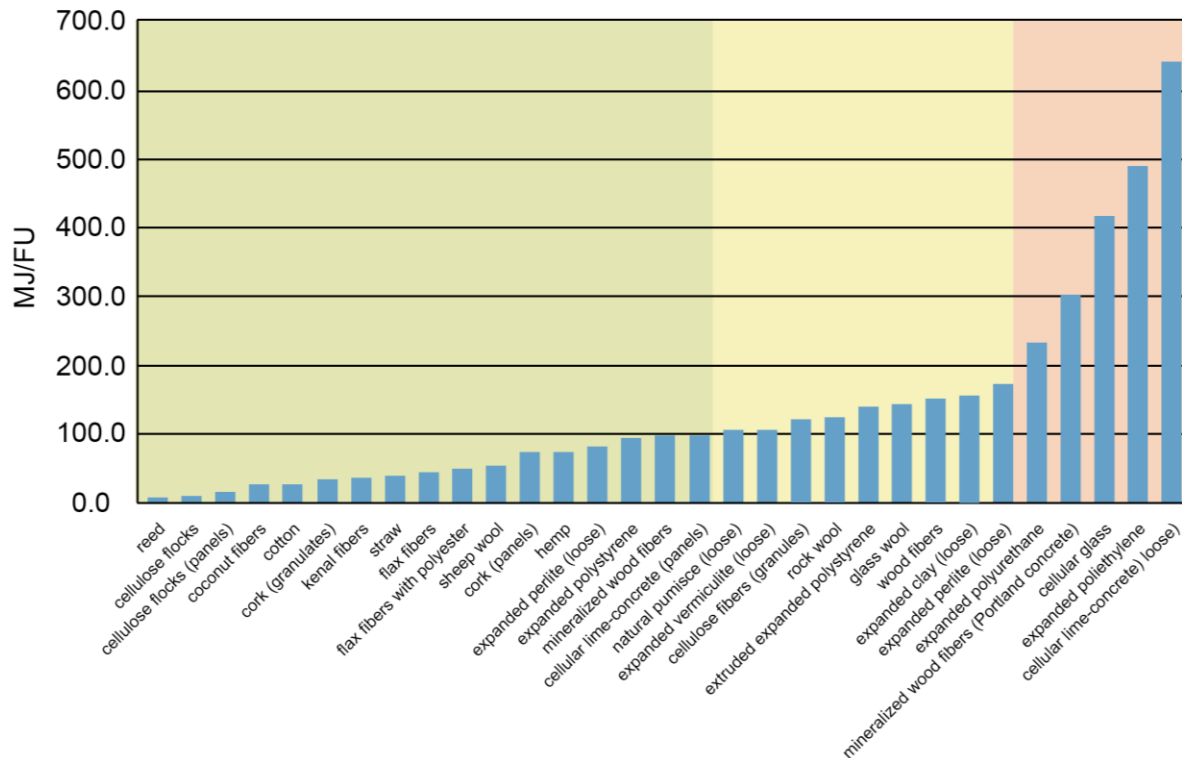


Abbildung 30: Dämmstoffen und deren benötigte graue Energie (Primärenergie total, PET) pro funktioneller Einheit (Functional Unit – FU). Eigene Darstellung nach (Longo et al., 2019) bzw. (Asdrubali, 2009).

Es wurden die Indikatoren Globales Erwärmungspotenzial (GWP) in kg CO<sub>2</sub> - Äquivalent, erneuerbare Primärenergie (PERT) und nicht erneuerbare Primärenergie (PERNT), jeweils in Megajoule (MJ) einbezogen. Um die Betrachtung der verschiedenen Dämmstoffe und Indikatoren vergleichbar zu machen, wurde eine Umrechnung der Referenzströme in Kubikmeter vorgenommen. Je Dämmmaterial sind in der Ökobaudat oftmals mehrere Baustoffe gelistet, welche über ihren Mittelwert zusammengefasst wurden. Beispielsweise gibt es verschiedene Holzfaserdämmstoffe (Trockenverfahren, Nassverfahren), die alle unter der Materialität *mineralized wood fibers* berücksichtigt sind. Produktspezifische Datensätze wurden dabei nur verwendet, sofern keine generischen Datensätze hinterlegt waren.

Im nächsten Schritt erfolgte eine Sortierung der zusammengefassten Dämmmaterialien aufsteigend nach ihrer Umweltwirkung je Kubikmeter. Dafür diente die Summe der Module A1-A3 (Herstellung), B4 (Austausch) und C3 – C4 (Abfallbehandlung und Beseitigung). Das Modul D (Potenzial für Wiederverwertung,

Rückgewinnung und Recycling) wird gesondert ausgegeben und nicht in die Gruppierung einbezogen. Für die Berechnung der Ökobilanz am Planungstool wurden vier Dämmstoffgruppen gebildet, welche den Anwender:innen den Einfluss der Dämmstoffwahl auf die Gesamtbilanz aufzeigen sollen. Hierfür wurden die ausgewählten Dämmmaterialien (insgesamt 15 Stück) gleichmäßig unterteilt und die Kategoriennamen „eco“, „eco standard“, „standard“ und „konventionell“ vergeben.

In Abbildung 31 sind die einbezogenen Materialien sortiert nach dem Indikator GWP dargestellt. Die farbliche Hinterlegung gibt die Einordnung in die vier Kategorien wieder.

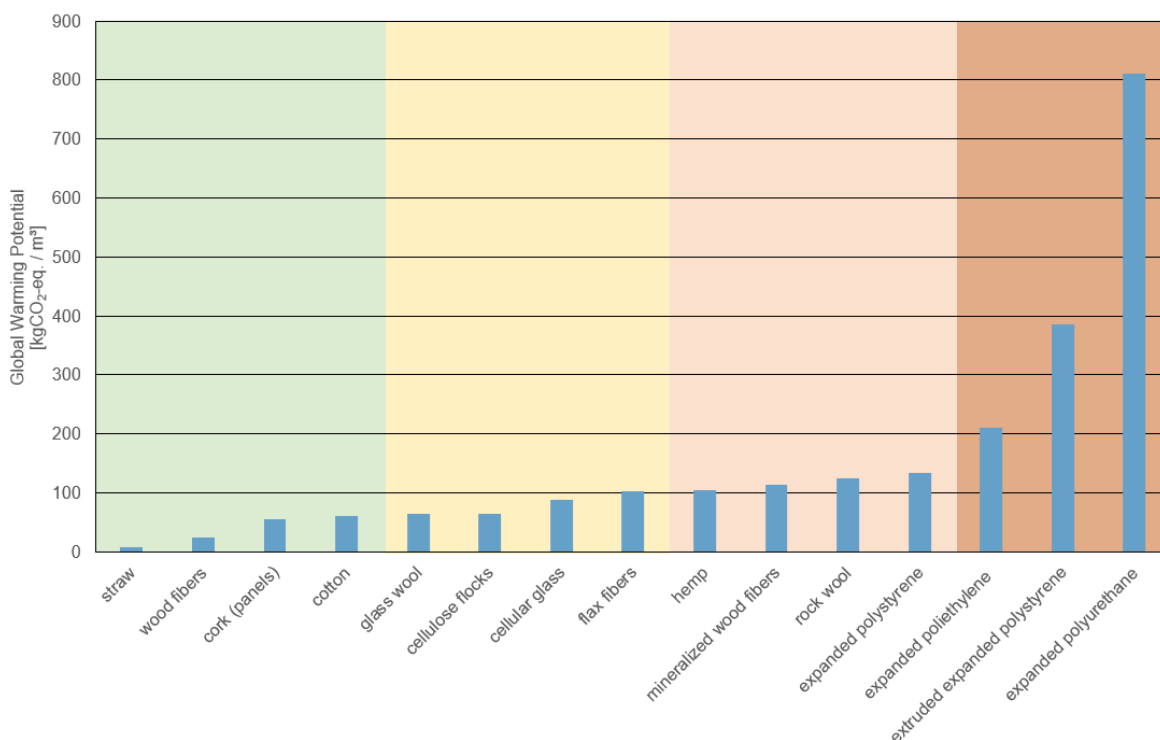


Abbildung 31: Dämmstoffmaterialien sortiert nach dem Indikator Global Warming Potential (GWP) [kg CO<sub>2</sub>-eq. / m<sup>3</sup>] für die Lebenszyklusbilanz-Phasen A1-A3, B4, C3-C4.

Zur Überprüfung der Ergebnisse wird auch der Indikator PENRT ausgewertet (Abbildung 32), um die Ergebnisse mittels der Sortierung aus (Asdrubali, 2009) zu plausibilisieren. Dabei zeigen sich einige Abweichungen in der Reihenfolge der Dämmstoffe. Diese sind auf die unterschiedlichen Bilanzierungsgrenzen und Datengrundlagen zurückzuführen. Asdrubali zeigt in seiner Arbeit, dass die Anteile von erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie bei den einzelnen Materialien stark abweichen. Holzfasern werden beispielsweise fast ausschließlich im Bereich der erneuerbaren Primärenergie bilanziert. Dagegen verursachen etwa Polyethylenstoffe fast ausschließlich nicht erneuerbare Primärenergieaufwände. Diese Anteile können allerdings bei Verwendung unterschiedlicher Ökobilanz-Datenbanken abweichen. Da Asdrubali seine Arbeit im italienischen Kontext durchführt, verursacht der hier

verwendete Strommix für Deutschland ebenso Abweichungen. Zudem können Produktionsprozesse länderspezifisch abweichen und weitere Diskrepanzen hervorrufen.

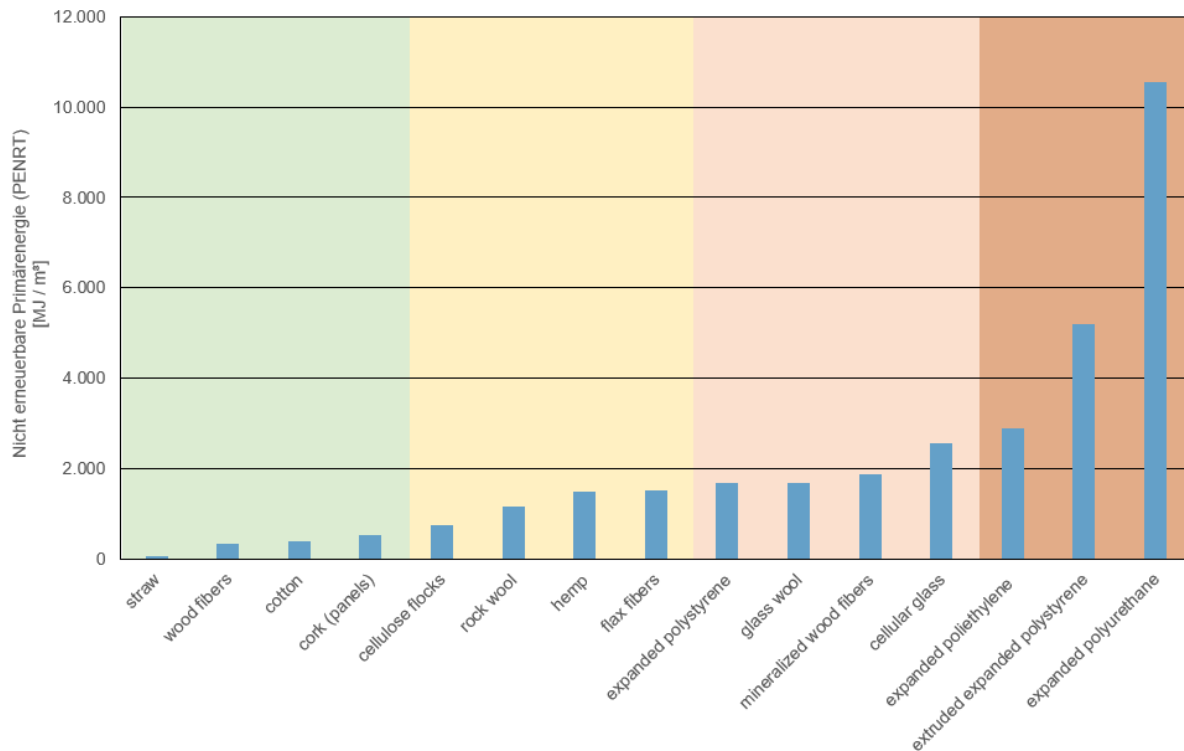


Abbildung 32: Dämmstoffmaterialien sortiert nach der Summe des Indikators PENRT [MJ / m³], Modul A-C.

Auf einen Einbezug der Wärmeleitfähigkeiten der Dämmstoffe wurde in diesem Projekt verzichtet, da die Spannen hierfür sehr weit auseinandergehen und in der Ökobaudat nicht für alle Materialien ausreichende Informationen hinterlegt sind. Dies wäre für künftige Forschungsarbeiten wünschenswert.

Für das Ökobilanzierungsmodul in der CDP-Anwendung werden die nach GWP sortierten Mittelwerte je Ökologiekategorie und Lebenszyklusphase für die drei betrachteten Indikatoren (GWP, PERT, PERNT) verwendet. Die dadurch generierten Datensätze können den Tabellen in Anhang 5 entnommen werden.

#### 5.4.4 Lebenszyklusanalyse von Grün

Die LCA von Stadtgrün erfolgt durch die Zusammenführung der im Rahmen einer Literaturrecherche identifizierten Quellen. Ziel ist die Darstellung der emissionsmindernden Wirkung beispielhafter Begrünungen über deren Lebensdauer, um die wesentlichen Treiber und Potenziale aufzuzeigen. Darauf aufbauend können Werte zur Berücksichtigung von Grün in spezifischen Quartierskontexten abgeleitet werden. Dabei sollen insbesondere typische urbane Rahmenbedingungen (hoher Anteil versiegelter Fläche, eingeschränkter Wurzelraum) Berücksichtigung finden. Die bislang dargestellten Methoden erlauben bereits eine Berücksichtigung von grüner Infrastruktur beim Betriebsenergiebedarf von Gebäuden. Um den Einbezug über den kompletten Lebenszyklus abzubilden, müssen analog zu grauen Emissionen auf Gebäudeebene auch graue Emissionen von grüner Infrastruktur in der Bewertung berücksichtigt werden. Darunter werden im Folgenden die Emissionen aus Herstellung, Rückbau bzw. Fällung und Entsorgung von grüner Infrastruktur zusammengefasst. Dies erlaubt eine gesamtheitliche Darstellung der Auswirkungen verschiedener Begrünungsszenarien in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung sowie die Identifikation von Optimierungspotenzialen.

#### Dachbegrünung

Eine niederschwellig umsetzbare Maßnahme stellt die extensive Dachbegrünung dar. Aufgrund geringer Schichtstärken kann sie häufig auch im Bestand nachgerüstet werden (Cascone et al., 2018) und ist damit eine im Zuge von Nachverdichtungen gut umsetzbare Begrünungsoption. Gemäß dem dargelegten Ziel der Lebenszyklusanalyse, die wesentlichen Treiber und Potenziale für Treibhausgasemissionen zu identifizieren, wird der Aufbau in Bauteillayer (z.B. Dichtungsbahnen, Drainagesysteme, Substrat) und Begrünung unterschieden. Bauteillayer werden im Ökobilanzierungstool eLCA nach einem Standardaufbau für Extensivdächer gemäß den Dachbegrünungsrichtlinien (FLL, 2018) modelliert (s. Abbildung 33).

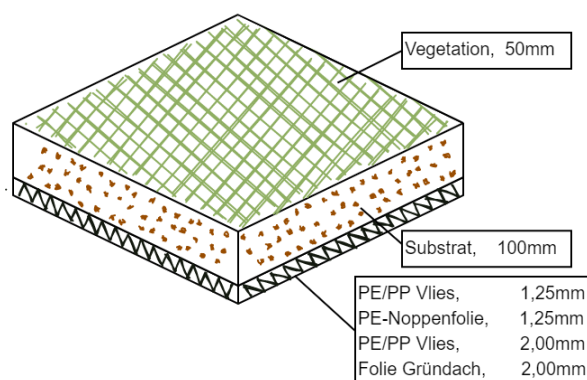


Abbildung 33: Aufbau des extensiven Gründachs für die Ökobilanzierung, Darstellung nach (FLL, 2018).

Dabei finden die für Gebäude berücksichtigten Lebenszyklusphasen Anwendung. Pflanzen fließen gesondert in die Bilanzierung ein. Als Systemgrenzen für die Bewertung von Grün werden Anzucht, Pflege sowie Austausch und Gutschriften durch die Bindung von CO<sub>2</sub> festgesetzt. Funktionelle Einheit ist die Installation von 1 m<sup>2</sup> Extensivdach auf einem bestehenden Flachdach. Als Schnittstelle wird die oberste Schicht des im Bestand vorhandenen Dachaufbaus herangezogen.

Der vorhandene Dachaufbau fließt demnach nicht in die Bewertung ein. Da zur LCA von Begrünungen kaum Informationen in Datenbanken vorliegen, werden Werte aus verschiedenen Quellen gesammelt und in der angestrebten Darstellung über den Lebenszyklus von 50 Jahren zusammengeführt. Als beispielhafte Anwendung der Methodik wird im Folgenden eine extensive Dachbegrünung mit 10 cm Substratstärke bewertet. Die verwendeten Werte und Quellen für die Bepflanzung können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

*Tabelle 4: Zusammenstellung der zur Ökobilanzierung eines beispielhaften Gründachaufbaus (extensiv) herangezogenen Quellen.*

<b>Phasen</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/ m<sup>2</sup></b>	<b>Quellen</b>
Samenherstellung	1,02	Ingram, 2013
Pflege (Dünger) Jahr 1-5	0,076	FLL, 2018
Pflege (Dünger) Jahr 6-50	0,039	BMU, 2020
		Kalisch, 2021
Austausch	1,28	BBSR, 2017
CO <sub>2</sub> - Sequestration	-0,69 (Jahr 1-2)	Getter et al., 2009
	-0,21 ab Jahr 3	Monterusso et al., 2005
Entsorgung (organischer Abfall)	0,258	Buratti et al., 2015
Gutschriften	-0,1305	Buratti et al., 2015

Zusammenfassend ergeben sich die in Abbildung 34 dargestellten Verläufe für die Bauteilschichten inkl. Substrat (Layer), die Begrünung sowie die resultierende Summe. Gutschriften außerhalb der LCA – Systemgrenzen werden gesondert als Phase D dargestellt. Der Austausch der Konstruktion erfolgt nach 30 Jahren.

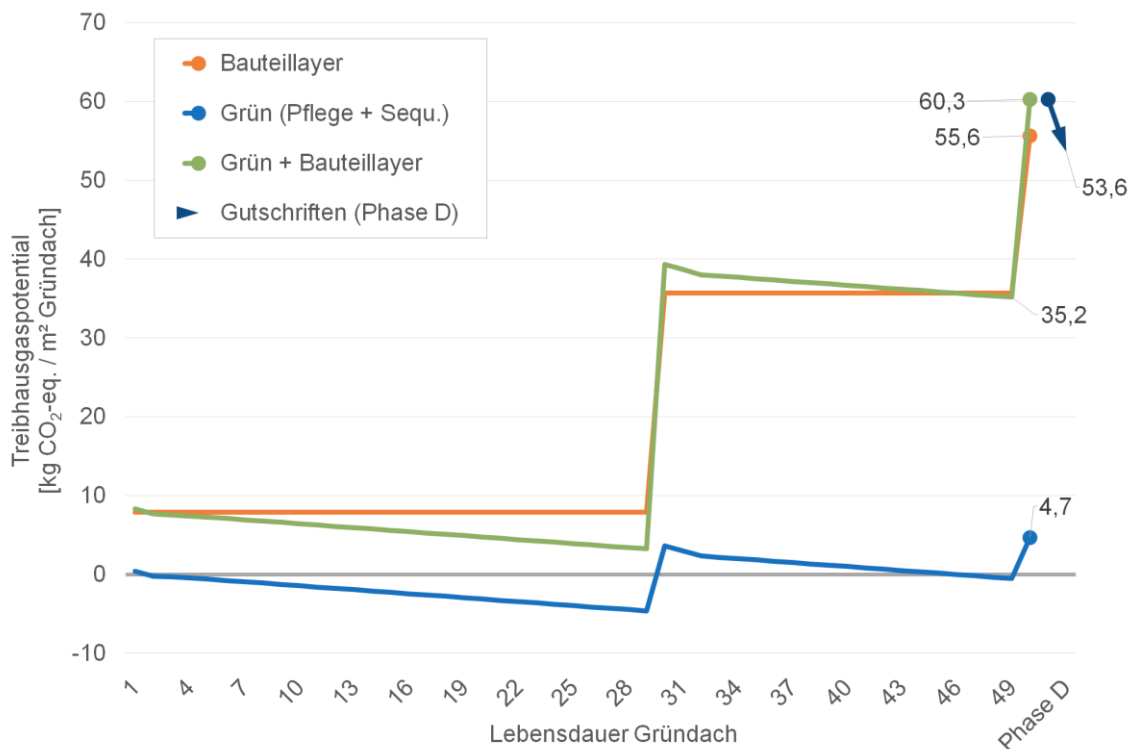


Abbildung 34: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-eq. Emissionen für einen beispielhaften Gründachaufbau (extensiv) über 50 Jahre.

Zu beachten ist, dass diese Werte teils auf unterschiedlichen Datenbanken beruhen und daher nicht uneingeschränkt verrechnet werden können. Dennoch können die Ergebnisse als Indikator für die wesentlichen Treiber der Treibhausgasemissionen herangezogen werden, da aus Abbildung 34 ein deutlicher Unterschied zwischen Grün und Bauteilschichten hervorgeht. Demnach führen im untersuchten Fall die notwendigen Schutz- und Abdichtungsschichten zu deutlich höheren Emissionen als die Anlage und der Unterhalt der eigentlichen Bepflanzung. Optimierungspotenzial liegt beim gewählten Beispiel demnach vor allem in den konstruktiven Bestandteilen. Dies stellen auch Tams et al. (2022) in ihrer Untersuchung von Gründachaufbauten fest. Ihre Bewertungen von Gründächern im deutschen Kontext zeigen auf, dass eine CO<sub>2</sub> Neutralität allein aufgrund der Sequestration für konventionelle Aufbauten nicht innerhalb der Lebensdauer von 50 Jahren erreichbar ist (88 Jahre). Bei Verwendung emissionsärmerer Materialien (recycelte Ziegel und Kork) verbessert sich dieser Zeitraum auf 53 Jahre. Bei diesen Untersuchungen stellen Tams et al. jedoch auch fest, dass hohe Unsicherheiten in der LCA von Gründächern vorliegen und insbesondere die Lebensdauern erheblichen Einfluss haben. Eine langfristige Planung ist daher zu empfehlen (Tams et al. 2022). Weiterhin sollten die Auswirkungen von Gründächern auf den Energiebedarf von Gebäuden im gemäßigten Klima untersucht und ihr daraus resultierender Einfluss auf Ökobilanzen dargestellt werden (Susca, 2019).



### Stadtbaum

Für Stadtbäume wurde analog zur Dachbegrünung eine detaillierte Unterteilung der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus erstellt. Da vor allem Großbäume durch die Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Kohlenstoff das klimaschädliche Gas speichern können, soll dieses Potenzial im städtischen Kontext beleuchtet werden. Die Eigenschaft der CO<sub>2</sub>-Speicherung ist besonders für die Fragestellung einer möglichen Kompensation als Ausgleich zu nicht vermeidbaren Emissionen im Bauwesen von Relevanz. Zur beispielhaften Darstellung wird die in bayerischen Städten häufig vorkommende Baumart der Winterlinde (*Tilia Cordata*) gewählt, da diese in mehreren Untersuchungen zu Wachstum und Ökosystemleistungen betrachtet wurde (Moser et al., 2015; Rahman et al., 2017; Rötzer et al., 2018; Martynova et al., 2020). Die Systemgrenzen schließen die Anzucht des Setzlings sowie Wartungs-/ Pflegearbeiten und Rückbau bzw. Fällung sowie Beseitigung ein. Die CO<sub>2</sub>-Sequestration sowie Gutschriften durch eine Verwertung nach dem Lebensende werden gesondert dargestellt. Funktionale Einheit ist dabei ein Stadtbaum. Die Informationen zur Baumgröße spielen für mehrere betrachtete Phasen eine wesentliche Rolle, weshalb diese basierend auf (Rötzer et al., 2018) zeitabhängig berücksichtigt werden. Darin finden sich Wachstumsgleichungen für die Winterlinde in verschiedenen Konstellationen und Standorten. Da für diese Zusammenstellung keine lokale Spezifikation vorgenommen werden soll, wird das Mittel aller in Rötzer et al. (2018) untersuchten Städten sowie ein Versiegelungsgrad von 50 % herangezogen. Die Lebensdauer des generischen Stadtbaums wird mit 50 Jahren angesetzt, um eine Vergleichbarkeit mit der Ökobilanzierung auf Gebäudeebene herzustellen. Als Verwertung wird die Herstellung von Hackschnitzeln sowie die anschließende Verwendung zur Energieerzeugung angenommen. Dies wurde im Rahmen eines Interviews mit dem Baureferat der Stadt München als gängige Praxis identifiziert (Kalisch, 2021). Die gebundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden demnach am Ende des Lebenszyklus vollständig freigesetzt.

Es werden zudem die in nachfolgender Tabelle zusammengestellten Quellen verwendet.

Tabelle 5: Zusammenstellung der zur Ökobilanzierung eines beispielhaften Stadtbaums herangezogenen Quellen.

Phasen	kg CO <sub>2</sub> -eq./ St.	Quellen
Herstellung Setzling (Mittelwerte Freiland- und Containeranzucht)	6,81	Ingram, 2012 Kendall & McPherson, 2012
Wartung und Pflege	Abhängig Baumalter	Gerätschaften: Nowak et al., 2002 Pflegeintervalle: Strohbach et al., 2012 Stammdurchmesser (DBH): Rötzer et al., 2018

Sequestration während Anzucht	-0,366	Ingram, 2012
Sequestration nach Anzucht	Abhängig Baumalter	Rötzer et al., 2018
Rückbau bzw. Fällung / Beseitigung	63,76	Nowak et al., 2002
Gutschriften	-414,9	Kalisch, 2021 Ökobaudat, Holz naturbelassen

Zusammenfassend ergibt sich der in Abbildung 35 dargestellte Verlauf an CO<sub>2</sub>-eq. Emissionen über eine Lebensdauer von 50 Jahren.

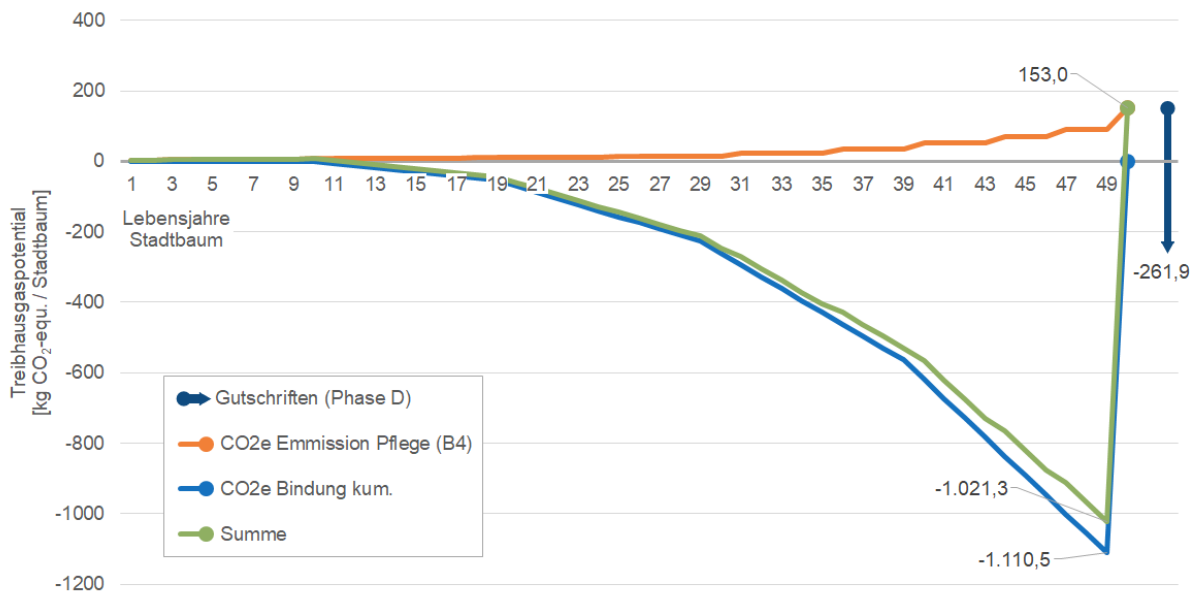


Abbildung 35: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-eq. Emissionen für einen beispielhaften Stadtbaum (*T. cordata*) über 50 Jahre, Versiegelung = 50 %, Mittel aller Städte gem. (Rötzer et al., 2018).

Wie bei der Dachbegrünung gelten auch hier die Einschränkungen zur bedingten Vergleichbarkeit verschiedener Datenquellen und den gewählten Systemgrenzen. Grundsätzlich ist jedoch erkennbar, dass ein hohes Potenzial in der Bindung von CO<sub>2</sub> über die Lebensdauer eines Stadtbaumes besteht, welches mit zunehmendem Alter exponentiell ansteigt. Als Verwertungsszenario wurde die thermische Nutzung betrachtet, bei der die gebundenen Emissionen wieder freigesetzt werden. Darüber hinaus wären die Möglichkeiten zum Einsatz als Bauholz zu untersuchen. Dadurch kann die Freisetzung hinausgezögert und der Wert von Stadtbäumen als Emissionssenkern gesteigert werden.

## 5.5 Anwendung der CDP

Durch die direkte Verknüpfung bekannter analoger Arbeitsweisen mit digitalen computergestützten Designwerkzeugen stellt die CDP eine Entwurfsplattform der gebauten Umwelt dar, die es den Planenden ermöglicht, analog mithilfe von Architekturmodellen und Skizzen zu arbeiten und gleichzeitig das Potenzial von Computern zu nutzen. Städtebauliche Arbeitsmodelle werden über die CDP direkt mit numerischen Simulationen verbunden und können für die Entscheidungsunterstützung im digitalen Entwurfsprozess eingesetzt werden. Das Zerschneiden oder das Verformen der analogen Arbeitsmodelle, aber auch Positionsänderungen werden in Echtzeit berücksichtigt und aktualisierte Ergebnisse der Simulation werden als visuelles Feedback an die Nutzer:innen zurückgegeben. Die Anforderungen für die Weiterentwicklung der CDP im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ergeben sich durch die Eingabe, die Kopplung geeigneter Simulationen und die Darstellung der Berechnungsergebnisse in der Visualisierungsumgebung, am Monitor. Die Wahl einer geeigneten Präsentation der Informationen hängt im Wesentlichen von den Daten und dem Profil der Nutzer:innen ab. Die Eingabemöglichkeiten sollen für die Nutzer:innen intuitiv verständlich und eine individuelle Anpassungsfähigkeit der Bedienoberfläche ermöglichen.

### 5.5.1 Anforderungen für die Erweiterung der CDP

Die Weiterentwicklung der CDP soll dabei helfen, Informationen zu städtebaulicher und energiebezogenen Metriken für städtebauliche Nachverdichtungsprojekte zu implementieren. Städtebauliche Parameter wie Gebäudestellung, -form und Abstand zwischen den Gebäuden haben großen Einfluss auf den Energiebedarf sowie auf Innen- und Außenraumkomfort. Um energetische Aspekte in frühen Entwurfsphasen berücksichtigen zu können, wurden aufbauend auf der CDP neue Methoden zur Berücksichtigung von städtischem Grün und dem thermischen Verhalten von Gebäuden entwickelt. Damit Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden können, müssen geometrische Daten aufbereitet, Schnittstellen standardisiert und Eingabemöglichkeiten erweitert werden. Auf Grundlage der genannten Wechselwirkung wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende Anforderungen identifiziert:

#### *Plug-in<sup>9</sup> zur Übertragung von geometrischen Kennzahlen*

- Ermittlung von gebäudespezifischen Kennzahlen (Bruttogeschossfläche BGF [m<sup>2</sup>], Nettogeschossfläche NGF [m<sup>2</sup>], Wohnfläche WF [m<sup>2</sup>], Gebäudehöhe H [m], Außenwandfläche AW [m<sup>2</sup>], Bruttorauminhalt BRI [m<sup>3</sup>], Dachfläche DF [m<sup>2</sup>])
- Berechnung des Standorts mithilfe von Koordinaten (Schwerpunkt X, Y [m]; Orientierung [0-360°])

---

<sup>9</sup> Ein Plug-in ist eine optionale Erweiterung einer bestehenden Software und kann nicht ohne die Hauptanwendung ausgeführt werden.

- Ermittlung der Flächen von städtischem Grün (Grünflächen (Parks, Höfe) [m<sup>2</sup>, %], Potenzielle Grünflächen (Dach, Fassaden) [m<sup>2</sup>, %], Anzahl Bäume)

#### *Plug-In für den Datenaustausch und Schnittstellen*

- Import und Zuordnung von Flurgrundstücken zur Berechnung von städtebaulichen Kennzahlen
- Maßstabsabhängiger Datenimport und -export
- Import von Wetterdaten und Karten

#### *Plug-In für die Dateneingabe*

- Eingabemöglichkeit für Neubau, Zubau und Aufstockung von Gebäuden
- Werkzeug zur Eingabe von Stadtgrün und Bäumen
- Sicherung und Wiederaufruf von bereits geplanten Varianten und Szenarien

#### *Darstellen von Analysen und Berechnungsergebnissen*

- Darstellung von Analysen und Kennzahlen in Echtzeit am Infopanel
- Heatmap-Diagramm zur Visualisierung von Außenraumkomfort am CDP Multitouch Tisch<sup>10</sup>
- Integration der Abstandsflächen in die Plug-In Umgebung

### **5.5.2 Plug-In zur Übertragung von geometrischen Kennzahlen**

Die CDP importiert frei verfügbare Open-Street-Map (OSM) Daten und erstellt daraus automatisch Gebäude, Straßen und Grünflächen, die anschließend am Infoscreen gerendert werden. Diese geometrischen Daten müssen für die Simulation aufbereitet werden, um sie als Zahlenwerte exportieren zu können. Dafür werden Vektoroperationen in Echtzeit durchgeführt, welche die Fläche, den Umfang und den Schwerpunkt der jeweiligen Objekte berechnen. Alle Objekte (Gebäude, Straßen und Grünflächen) erhalten eine eindeutige Identifikationsnummer, um sie schnittstellenübergreifend zuzuordnen. Zusätzlich werden die Koordinaten und die Orientierung jedes Objekts abgespeichert, um sie räumlich zu positionieren.

### **5.5.3 Plug-In für den Datenaustausch und Schnittstellen**

Bei der Umrechnung der Vektoren auf Zahlenwerte wird der zuvor festgelegte Maßstab berücksichtigt. Diese Methode sorgt für einen standardisierten Datenaustausch und für eine korrekte Darstellung am Infoscreen. Neben den gebäudespezifischen Daten sollen städtebauliche Kennwerte berechnet werden, um

---

<sup>10</sup> Eine berührungsempfindliche Oberfläche zur Eingabe von Informationen mithilfe von Gesten.

Aussagen zu den Entwicklungs- und Nachverdichtungspotenzialen im Quartier treffen zu können. Dafür werden Flurgrundstücke als „Shapefiles“ in die Szene geladen und den Gebäuden zugeordnet. Anschließend können die Kennwerte summiert und dargestellt werden. Zusätzlich werden lokale Wetterdaten in die Datenbank gespeichert um sie für Analysen und Simulationen zu verwenden.

#### **5.5.4 Plug-In für die Dateneingabe**

Die Hauptanwendung der CDP soll um weitere Funktionen und Eingabemöglichkeiten erweitert werden. Für die vertikale Nachverdichtung wird eine interaktive Möglichkeit geschaffen, Gebäude aufzustocken. Dafür eignet sich ein manuell bedienbares Menüfeld am CDP Multitouch Tisch. Für die horizontale Nachverdichtung wird die vorhandene Funktion zum Einlesen von physischen Arbeitsmodellen verwendet. Eine weitere Funktion soll das Einsetzen von Bäumen ermöglichen. Dafür eignet sich die Toucheingabe, um ein Szenario (geladene Szene) punktuell mit Bäumen zu erweitern. Um einen Variantenvergleich zu ermöglichen, bleibt die Szene im Hintergrund gespeichert und kann später wieder aufgerufen werden.

#### **5.5.5 Darstellung von Analysen und Berechnungsergebnissen**

Neben der 3D-Darstellung des Quartiers werden am Infopanel weitere Informationen angezeigt, um die zuvor berechneten Kennzahlen und Analysen übersichtlich zu präsentieren. Die Visualisierungsumgebung soll eine Echtzeitdarstellung der Daten und eine flexible Layoutanpassung erlauben. Dafür wurde auf die webbasierte Anwendung Grafana (s. Abbildung 36) zurückgegriffen, welche zuvor auf einem TUM LRZ-Server installiert wurde. Dadurch können gespeicherte Informationen von jedem Gerät zu jeder Zeit abgerufen werden. Grafana überprüft und aktualisiert die Daten auf der Datenbank im Intervall von einer Sekunde, wodurch ein nahtloser Übergang von der Eingabe bis zur Visualisierung sichergestellt wird. Eine weitere Möglichkeit der Visualisierung wird durch die Darstellung von Heatmap-Diagrammen direkt am CDP Multitouch Tisch geboten, um die Szene um Informationen wie z. B. Wärmeinseleffekt und Schattenstudien zu erweitern. Als weiteres nützliches Werkzeug für die Stadtplaner:innen hat sich die automatisierte Abstandsflächenberechnung bewährt. Diese Funktion wurde umgesetzt und kann bei Bedarf in dem neu erstellen Plug-In aufgerufen werden.

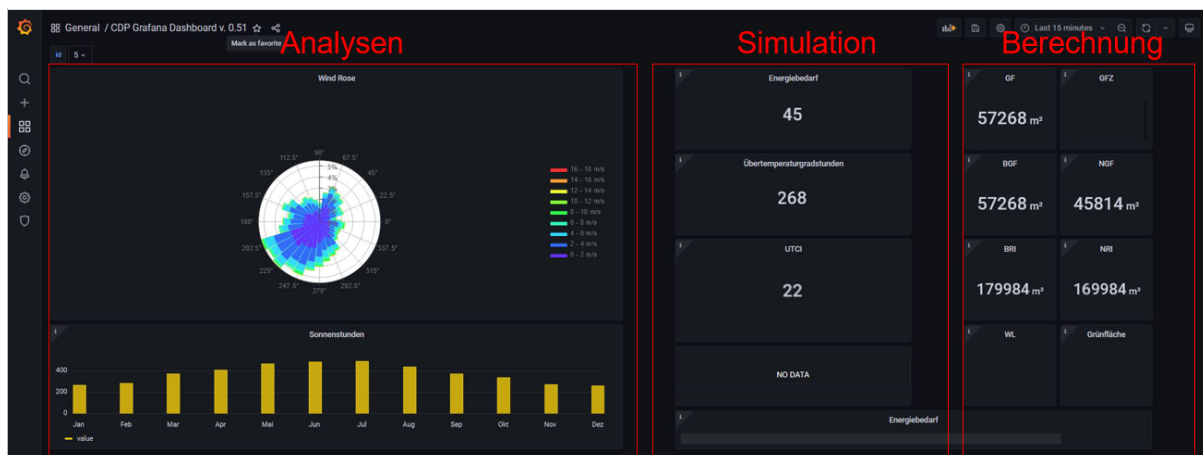


Abbildung 36: Darstellung von städtebaulichen Kennwerten, klimatischen Analysen und Simulationsergebnissen mithilfe von Grafana.

### Überarbeitung nach dem Workshop I

Der Bereich „Analysen“ in Abbildung 36 hat einen Großteil der Fläche am Dashboard v1.0 eingenommen. Die wesentlichen städtebaulichen Kennzahlen und Ergebnisse aus den Simulationen sind allerdings entscheidender für den Entwurfsprozess und sollen daher auch am Dashboard mehr Platz einnehmen. Das Interesse an der Erweiterung des Darstellungs- und Funktionsumfangs durch das Anzeigen und Hinzufügen städtebaulicher Objekte, wie Bäume, stand ebenso im Vordergrund der Überarbeitung. Ein weiterer Vorschlag war das Erstellen von Szenarien als grafische Gegenüberstellung, um die Ergebnisanalyse zu erleichtern. Das Feedback aus dem Workshop hat geholfen, die Elemente am Display funktionsgerecht anzuordnen.

### Überarbeitung nach dem Workshop II

Im zweiten Workshop war vor allem das Feedback von Expert:innen aus der Praxis gefragt. Gebäudespezifische Kennwerte wurden direkt am CDP Tisch dargestellt. Auf dem Dashboard v2.0 wurden alle Kennwerte, die das gewählte Quartier betreffen, angezeigt. Die Probanden waren mit der Menge an Informationen am Dashboard teils überfordert. Im Anschluss wurde das Dashboard hinsichtlich einer Reduktion auf wesentliche Informationen geprüft. Typische städtebauliche Parameter wie Geschossfläche (GF), Geschossflächenzahl (GFZ) und Grundflächenzahl (GRZ) fehlten in der Darstellung. Auch dieser Hinweis wurde übernommen und im aktualisierten Dashboard angepasst. Praxistaugliche Indikatoren wie der Energiebedarf nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) und Standards der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW40 usw.) sollten in die Darstellung aufgenommen werden und geben Aufschluss über den energetischen Vergleich von Referenzgebäuden. Ein erster Variantenvergleich des Heizwärmebedarfs und Kühlbedarfs wurde in dem Dashboard v2.0 bereits umgesetzt (s. Abbildung 37).

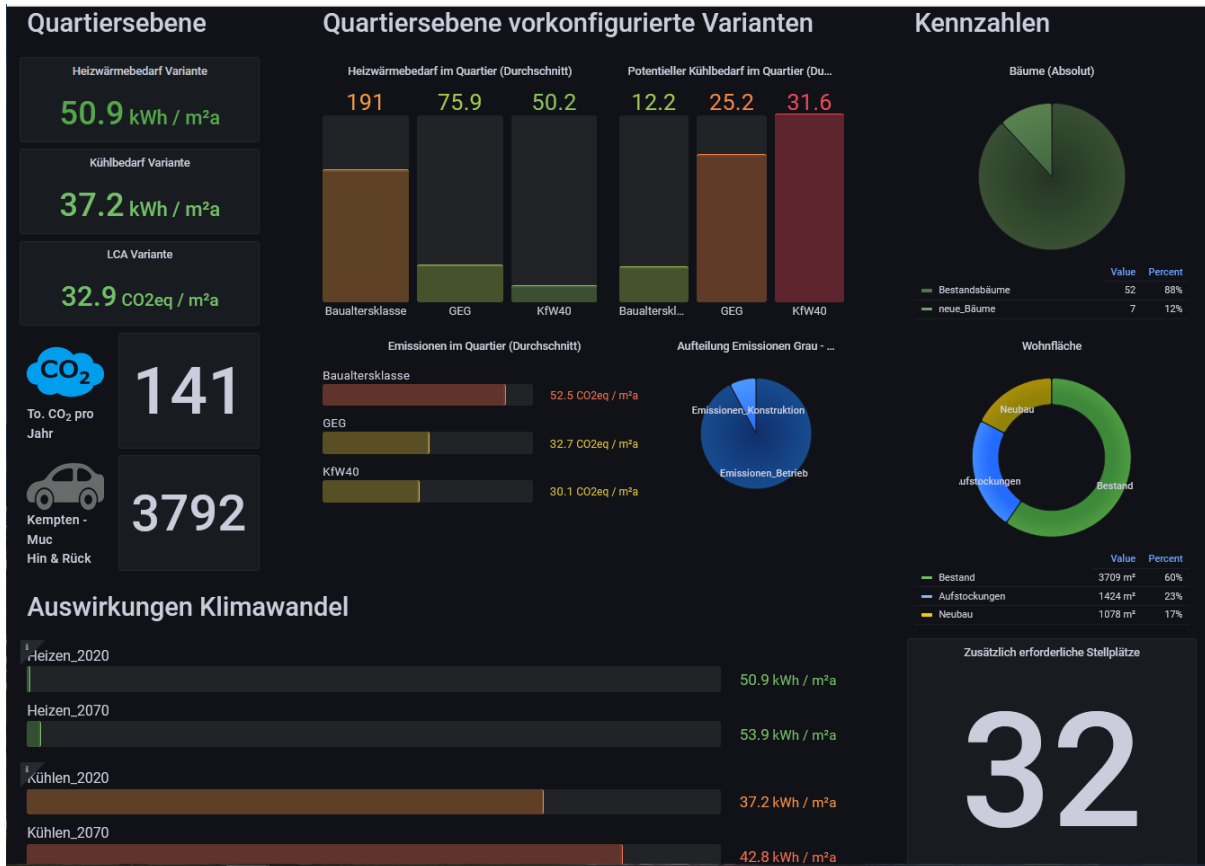


Abbildung 37: Erste Version des Grafana Dashboards.

## 5.6 Technische Zusammenführung der entwickelten Methoden

Die Weichenstellungen für Nachverdichtung in Kombination mit der Bilanzierung verwendeter Materialien und einer verbesserten Aufenthaltsqualität im Quartier erfolgen auf städtebaulicher Ebene. Eine solche Betrachtungsweise ist bisher nicht systematisch im konventionellen Planungsprozess verankert, wodurch Potenziale einer Optimierung von baulicher Anordnung, Energie und Mikroklima nicht umfassend erkannt und ausgeschöpft werden. Darum ist es erstrebenswert, Aspekte wie den zu erwartenden Energiebedarf, die Umweltwirkungen und die Kühlleistungen grüner Infrastruktur in der Planung so früh wie möglich zu quantifizieren und integriert zu betrachten. Dafür ist es notwendig, die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Methoden technisch zu koppeln. Das Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

Abbildung 38 zeigt ein Systembild der Implementierungen und Schnittstellen des Forschungsprojekts. Die CDP (A.1) bildet mit ihren interaktiven Ein- und Ausgabemöglichkeiten das Zentrum des Implementierungskonzepts. Neu eingelesene Objekte wie Baum- und Gebäudebestand werden nach dem Starten des Plug-Ins in Echtzeit auf der Datenbank (A.2) gespeichert. Mithilfe von Gebäudedaten und Verschattungswerten wird der Energiebedarf, der Innenraumkomfort (A.3) und

eine Ökobilanz (A.4) von verschiedenen Anwendungen ermittelt, die in der Programmiersprache Python erstellt wurden. Die Ergebnisse werden anschließend in der Datenbank (A.2) zurückgespielt und gebäudespezifisch auf der prototypischen Implementierung (A.1) visualisiert. Die Ergebnisse werden zudem mithilfe von Grafana auf dem Infoscreen (A.9) für die Quartiersebene aggregiert und dargestellt. Eine weitere Anwendung berechnet die Verschattung der geometrischen Objekte (A.6) mithilfe der dargelegten Voxelmethode (A.5, s. Kapitel 5.1). Die Ergebnisse der Verschattung werden anschließend für die Berechnung der Gebäudeenergie und des Innen- und Außenraumkomforts (A.7) verwendet. Der Außenraumkomfort wird mithilfe von Rasterkarten direkt auf dem CDP Multitouch Tisch dargestellt.

Im Rahmen des Projekts erwies sich die separierte Erstellung der einzelnen Anwendungen und ihre zentrale Kommunikation über eine Datenbank als zielführend. Da teils unterschiedliche Softwarepakete und Datengrundlagen eingesetzt werden, konnten voneinander unabhängig bearbeitbare Bausteine gesichert werden. Dies erleichtert sowohl die Fehlersuche, als auch die Weiterentwicklung einzelner Bausteine.

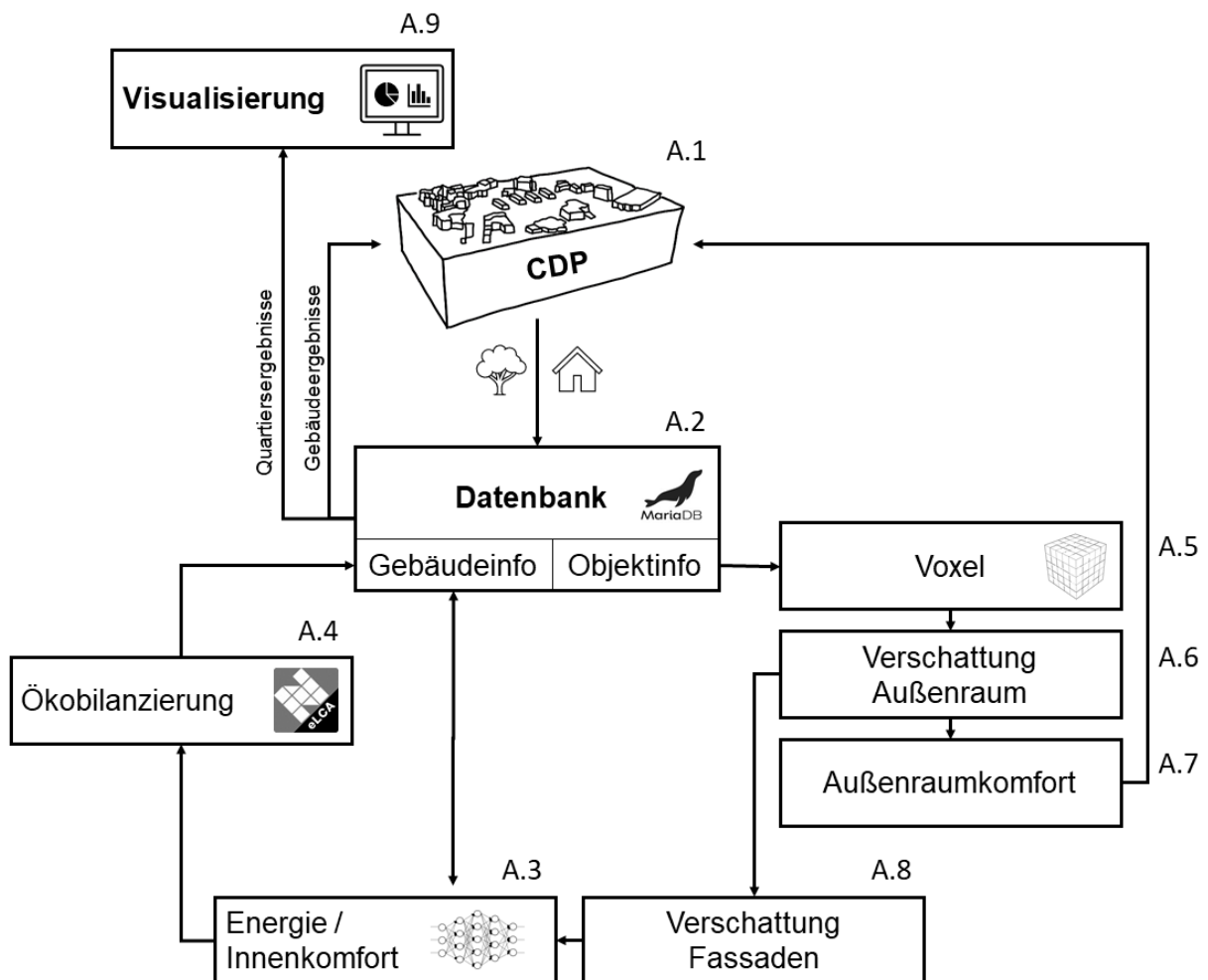


Abbildung 38: Systembild entwickelter Methoden zu Energie, Komfort und Ökobilanzierung.



Eine Zusammenführung der im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Methoden, sowie der umgesetzten Plug-Ins, bietet die Möglichkeit plausibler Vermittlung und anschließender Bewertung selbst komplexer Wechselwirkungen von gebauter Umwelt, Aufenthaltsqualität und energetischen Aspekten. Die Umsetzung und Kopplung der beschriebenen Funktionen bildete die Grundlage für den Workshop mit Teilnehmer:innen aus der Praxis (s. Kapitel 4.2).

## 6 Analyse von Nachverdichtungsszenarien

Um die Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Plug-Ins zu demonstrieren, wurden anhand einer Fallstudie verschiedene Nachverdichtungsszenarien verglichen. Ziel dabei war es, Wirkungen und Interaktionen von Nachverdichtungs- und Grünmaßnahmen sichtbar zu machen. Der Szenarienvergleich dient anschließend als Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Ergänzend zu den im Projekt entwickelten Simulationsmethoden wurden dabei bereits verfügbare Methoden und Tools angewandt, um eine weitere Validierung der Projektentwicklungen zu erreichen.

### 6.1 Vorstellung der Fallstudie

Zur Sicherung der prototypischen Anwendbarkeit des Planungstools sowie der entwickelten Methoden wird im Folgenden eine Fallstudie herangezogen. Dafür wurde aus dem Kreis der interviewten Kommunen (s. Kapitel 4.1) potenzielle Gebiete abgefragt. Die Wahl fiel auf ein Quartier in Kempten. Hierbei handelt es sich um einen innerstädtischen Wohnstandort, welcher als repräsentativ für die identifizierten Eigenschaften des gewählten Siedlungstyps (Zeilenbebauung, 1950er Jahre) eingeordnet wird. Aufgrund der Grundstücksgröße von ca. 9.000 m<sup>2</sup> eignet sich das Gebiet besonders für die prototypische Implementierung am Planungstool, da dadurch die erforderlichen Rechenkapazitäten niedrig gehalten werden. Zudem gewährleistet die Zeilenbebauung eine gute Grundlage zur Übertragung der Ergebnisse auf weitere Anwendungsfälle, da sie einen typischen Bebauungstyp für Nachverdichtung in Deutschland darstellt (ZSK, 2017). Im Rahmen des Projekts fand eine Kooperation mit der Stadt Kempten (Grundstückseigentümerin) und der Immobilieneigentümerin Vonovia SE (Erbpacht) statt.

Im Folgenden wird zunächst die Ausgangslage erläutert. Anschließend werden die Ziele der Fallstudienuntersuchung, die angewandten Methoden sowie deren Einschränkungen in Bezug auf das Gebiet dargelegt. Die Ergebnisse der Fallstudie werden schließlich auf ihre Verallgemeinerbarkeit hin diskutiert und fließen in die folgenden Umsetzungs- sowie Handlungsempfehlungen ein.

#### 6.1.1 Datenverfügbarkeit zur Fallstudie

Das Beispielquartier in Kempten umfasst im Bestand fünf Hauptwohnhäuser und verschiedene Nebenanlagen (Garagen, Abstellflächen, Gemeinschaftsflächen). In nördlicher sowie östlicher Richtung schließt eine gemischte Nutzung an, südlich des Gebietes befindet sich die Hochschule. Deren Parkplatz wird durch eine Geländekante abgegrenzt. Im Westen und Osten wird das Gebiet durch Hauptstraßen begrenzt. Abbildung 39 zeigt den Umgriff des Gebietes sowie die betrachteten Gebäude.



Abbildung 39: Luftaufnahme Fallstudiengebiet Kempten und angrenzende Nutzungen. Hervorgehoben ist eine markante Geländekante im Gebiet (Quelle: Geoportal Bayern, BayernAtlas).

Folgende Unterlagen standen für die Bearbeitung zur Verfügung:

- Archivierte Bauakten
- GIS-Daten zum Flurstück mit Gebäuden und Umfeld
- Baumkartierung und Vermessungsdaten
- Drahtmodell der Gebäude
- Energieausweise der Gebäude
- Hochaufgelöstes Luftbild
- Stadtklimaanalyse der Stadt Kempten
- Zugang zu Befahrungsdaten (infra3D) der Stadt Kempten
- Bestehende Vorschläge zur Quartiersentwicklung

Der Bezug von Wetterdaten erfolgte über die Klimadatenbank Meteonorm, welche auch Zugang zu Datensätzen unter Berücksichtigung von Klimawandelszenarien erlaubt (Meteonorm, 2020).

Am 27.10.2021 fand zudem ein Termin vor Ort mit Masterstudierenden, Projektmitarbeitenden, dem Stadtplanungsamt Kempten sowie dem Objektbetreuer der Vonovia SE statt. Inhaltlich gab die Exkursion insbesondere Aufschluss hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen, wie der Baumschutzverordnung und der Einbindung des Quartiers in die nähere Umgebung. Bei der Begehung eines der

Gebäude konnten zudem nähere Informationen zur Bausubstanz und der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) gesammelt werden.

### **6.1.2 Charakteristika von Zeilenbebauungen der 1950er Jahre hinsichtlich Nachverdichtung**

In Kapitel 3.1.1 wurde der Zeilenbau als Siedlungstyp mit hohem Nachverdichtungspotenzial identifiziert. Darauf aufbauend werden an dieser Stelle die wesentlichen Potenziale und Herausforderungen der Fallstudie in Bezug auf Nachverdichtung beleuchtet.

Die Zeilenbebauung der 50er Jahre basiert auf dem Leitbild der „gegliederten und aufgelockerten Stadt“, hierbei werden die zwei Elemente des Städtebaus, Bebauung und Landschaft, gleichermaßen berücksichtigt. Die Basis zur Entstehung dieses Bebauungstypus war die Idee, Wohnraum mit viel, Licht, Luft und Grün zwischen den Häuserriegeln zu schaffen (Zankel, 2013). Mit rund 35 % versiegelter Blockfläche stellt die Zeilenbebauung im Untersuchungsgebiet eine lockere Bebauung mit weiträumigen Straßenräumen und Abstandsflächen dar. Die Bauten bestehen aus linearen Baukörpern mit 3-4 Geschossen. Die Gebäude sind überwiegend stirnseitig zur Erschließungsstraße ausgerichtet. Schlichte Rasenflächen mit vereinzelt Bäumen charakterisieren den Durchgangsraum zwischen den Häusern. Sie dienen aufgrund geringer Aufenthaltsqualitäten oftmals nur als Abstands- oder Stellflächen. Verstärkt wird die Nichtnutzung der Außenräume durch den halböffentlichen, anonymen Charakter. Fehlende Zuordnung schafft Unklarheiten hinsichtlich Nutzungsoptionen und Zugangsrechten (Zankel, 2013).

Die Gebäudesubstanz der Bauten ist in der Regel sanierungsbedürftig und weist Optimierungspotenzial hinsichtlich Wärme- und Schallschutz sowie des Raumklimas auf. Eine Sanierung der Bausubstanz kann sich neben der verbesserten Aufenthaltsqualität auf Gebäudeebene ebenfalls positiv auf den Außenraum auswirken. Barrierefreiheit ist unabdingbar um den heutigen Standard zu erfüllen. Der Umbau der Gebäude in alters- und behindertengerechten Wohnraum ist aufwendig und kostenintensiv (Saphörster, 2008). Ein weiteres Defizit der Zeilenbebauung stellt die fehlende Fläche für notwendige Parkplätze dar (Zankel, 2013). Mit einer vergleichsweise geringen Grundflächenzahl von ca. 0,3 sowie vielen untergenutzten Abstandsgrünflächen, weist die Zeilenbebauung der 50er Jahre ein hohes Flächenpotenzial für Nachverdichtung auf. Bei der Neugestaltung und Veränderung der bestehenden Baukörper gilt es neue Wohnwünsche zu berücksichtigen, um langfristig eine stabile Entwicklung zu garantieren. Die Steigerung der Wohnqualität sowie die Überlagerung verschiedener Funktionsflächen im Außenraum ermöglicht die Entstehung einer hohen sozialen Dichte sowie ein stabiles Wohnumfeld (Saphörster, 2008).

Das Quartier der Fallstudie entspricht in weiten Teilen den vorgestellten Charakteristiken (große Abstände zwischen den Zeilen, 3-4 Geschosse, stirnseitige Erschließung, Rasenflächen mit vereinzelt Bäumen) und wird daher als gute Ausgangsbasis für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse angesehen.

### 6.1.3 Ziel der Untersuchungen

Das gewählte Quartier soll im Rahmen des Projekts zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen hinsichtlich der Anwendbarkeit des Planungstools aber auch in Bezug auf die Validierung und Verallgemeinerbarkeit der entwickelten Methoden herangezogen werden.

Zunächst dient das Gebiet im Rahmen des Workshops dem Nachweis der prototypischen Umsetzung des Planungstools. Dadurch soll gezeigt und dokumentiert werden, welche Schritte notwendig sind, um ein beliebiges Planungsgebiet für die Untersuchung am Planungstool vorzubereiten. Ebenso können dadurch entwickelte Datenanforderungen mit tatsächlich vorliegenden Informationen abgeglichen und hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit beurteilt werden.

Zusätzlich sollen die entwickelten Methoden (Ökobilanzierung, Außenraum, Energiemodell) am Beispiel des Quartiers gegenüber bestehenden Werkzeugen validiert und hinsichtlich der erzielten Echtzeitfähigkeit verglichen werden. Die Ergebnisse aus den Validierungen werden schließlich interpretiert und bezüglich einer Übertragbarkeit auf Stadtquartiere mit ähnlichen Randbedingungen diskutiert. Dies sichert die allgemeine Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse und erlaubt die Ableitung von Handlungsempfehlungen.

## 6.2 Vorstellung der Szenarien

Im Rahmen des Szenarienvergleichs sollten die in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Formen der baulichen Nachverdichtung soweit möglich mit abgebildet werden. Dabei wurden Aufstockung, Zeilenschluss und zusätzliche Bauten als potenzielle Nachverdichtungsformen für das Fallstudienquartier identifiziert. Die praktische Umsetzbarkeit wurde hinsichtlich der baulichen Abstandsflächen bei einer Aufstockung des Bestandes um eine Etage überprüft. Diese wäre auch mit ggf. notwendigen, zusätzlichen Treppenhäusern umsetzbar (s. Abbildung 40). Weitere baurechtliche Aspekte wie beispielsweise Brandschutz oder Stellplätze wurden in diesem Zusammenhang nicht weitergehend geprüft, da der angestrebte Szenarienvergleich insbesondere der Analyse von Wirkungen durch die baulichen und grünen Maßnahmen dienen soll.



Abbildung 40: Skizze des Fallstudienquartiers mit notwendigen Abstandsflächen bei Aufstockung aller Wohngebäude (Kühner, 2022).

Die betrachteten Szenarien sind in Abbildung 41 dargestellt. Um die Wirkung von Begrünung auf die Bewertungsaspekte zu integrieren, werden die Nachverdichtungsmaßnahmen Aufstockung, Zeilenschluss sowie die Kombination aus beiden jeweils mit einer dichten Begrünung im Südbereich versehen. Hierfür werden Winterlinden (*Tilia cordata*) herangezogen. Die geometrischen Abmessungen werden aus (Rötzer et al., 2018) für das Mittel aller dort durchgeführten Messungen herangezogen<sup>11</sup>. Die südlichen Neubauten werden mit drei, der Zeilenschluss ebenfalls mit drei (einzeln) bzw. mit vier (in Kombination mit Aufstockung) Etagen vorgesehen.

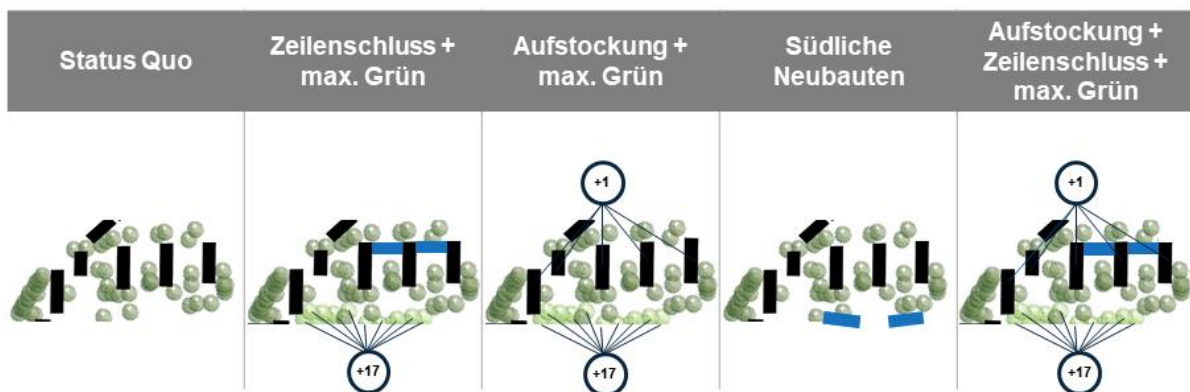


Abbildung 41: Erarbeitete Szenarien für den Vergleich verschiedener Bewertungsaspekte.

<sup>11</sup> Baumalter = 50 Jahre; Baumhöhe = 14,2 m; Kronendurchmesser = 9,0 m

Die Entwicklung der Szenarien erfolgte mithilfe der CDP und der im Rahmen des Projekts entwickelten Plug-Ins. Die Vorteile dieses Prozesses liegen in der unmittelbaren Sichtbarkeit von z.B. Hitzehotspots, wodurch Planende die Möglichkeit zur Erprobung von Maßnahmen hinsichtlich einer Verbesserung des Außenraumkomforts erhalten. So wurde beispielsweise das Szenario „Aufstockung + max. Grün“ schrittweise mithilfe der verfügbaren Informationen zu Tageslicht und Außenraumkomfort entwickelt. Dabei wurde zunächst der Status Quo analysiert. Hierbei wurde eine hohe Hitzebelastung im Südbereich festgestellt. Die daraufhin platzierten Bäume reduzieren diese und tragen somit zu einer gesteigerten Aufenthaltsqualität im Südbereich bei. Durch die unmittelbare Berücksichtigung der Maßnahme am Planungstool konnten anhand der aktualisierten Komfortkarte verbleibende Hotspots zwischen den Gebäuden festgestellt werden. Im nächsten Schritt wurde eine Aufstockung der Gebäude um ein Stockwerk vorgenommen. Die folgenden Auswertungen zeigen, dass diese die Hotspots zwischen den Gebäuden weitestgehend vermeiden und somit zu einem angenehmen Außenraumkomfort beitragen können. Die Auswertungen der beschriebenen Zwischenschritte sind in Anhang 6 dargestellt.

### 6.3 Außenraumkomfort und Tageslichtversorgung

Die Bewertung des Außenraums am Planungstool erfolgt hinsichtlich der Aspekte Außenraumkomfort tagsüber sowie Tageslichtversorgung. Die angewandten Methoden und Ergebnisse werden im Folgenden erläutert und validierten Tools gegenübergestellt. Neben den zuvor beschriebenen Szenarien werden der Status Quo ohne Bestandsbäume sowie das Szenario „Nur neue Bäume“ untersucht, um detaillierte Aussagen zum Einfluss der Außenraumbegrünung zu treffen.

#### *Thermischer Außenraumkomfort am Tag*

Für die Untersuchung des thermischen Außenraumkomforts wird der Index UTCI verwendet (vgl. Kapitel 5.1.3). Dieser spiegelt die „gefühlte“ Temperatur wider und ist daher besser für eine Bewertung der thermischen Bedingungen im Außenraum geeignet, als beispielsweise Lufttemperatur und Luftfeuchte allein. Zur Ermittlung wird zunächst die Voxelmethode eingesetzt. Dafür wird das Gebiet in ein 3 x 3 m Raster unterteilt und die notwendigen Vorberechnungen<sup>12</sup> von Objekten durchgeführt. Diese werden anschließend entsprechend der Szenarien platziert und die Ergebnisse für jeden der Voxelpunkte exportiert. Nach der UTCI Berechnung erfolgt eine Mittelung der Ergebnisse über das betrachtete Gebiet auf der untersten Voxelebene<sup>13</sup>. In die Berechnung des UTCI fließen somit Strahlungsverhältnisse, Skyview sowie statische Temperatur und Windzustände aus der verwendeten Wetterdatei ein. Die Berücksichtigung der Evapotranspiration durch Bäume innerhalb der Voxelmethode konnte im Rahmen des Projekts prototypisch umgesetzt werden. Dieser Baustein

---

<sup>12</sup> Erzeugen der Verschattungsmasken für Bäume und Gebäude und abspeichern für die Interaktionsphase (s. Kapitel 5.1.1)

<sup>13</sup> Aufgrund der Rasterauflösung von 3m wird die z = 0 m Ebene gewählt.

benötigt jedoch weitere Entwicklung und Validierung, um belastbare Aussagen abzuleiten (s. Kapitel 5.1.2). Daher wurde die Evapotranspiration für den Szenarienvergleich nicht berücksichtigt.

Für die Bewertung werden zunächst die unveränderten UTCI Werte der Wetterdatei über das Gesamtjahr berechnet. Anschließend wird daraus die Stunde mit dem höchsten Wert für die weitere Untersuchung ausgewählt. Für die verwendete Wetterdatei am Standort Kempten ist dies der 1. August, 16.00 Uhr.

Die Ergebnisse der Simulation mithilfe der Voxel – Methode sind in Abbildung 42 dargestellt. Der Vergleich mit dem gängigen Tool *Ladybug* (Roudsari & Pak, 2013), welches ebenfalls zur Ermittlung des UTCI eingesetzt werden kann, zeigt eine gute Übereinstimmung ( $R^2 = 0,913$ ). Die absoluten Werte weichen um bis zu  $0,57\text{ °C}$  ab, was durch Unterschiede in der Berechnungsmethodik der Strahlungstemperaturen (MRT) sowie durch die Verwendung detaillierter Baumabmessungen erklärt werden kann. Die Reihenfolge der Szenarien ist bei beiden Simulationsmethoden identisch. Die Anwendung der Voxelmethode zur Bewertung des thermischen Außenraumkomforts wird daher als ausreichend valide zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in frühen Planungsphasen bewertet.

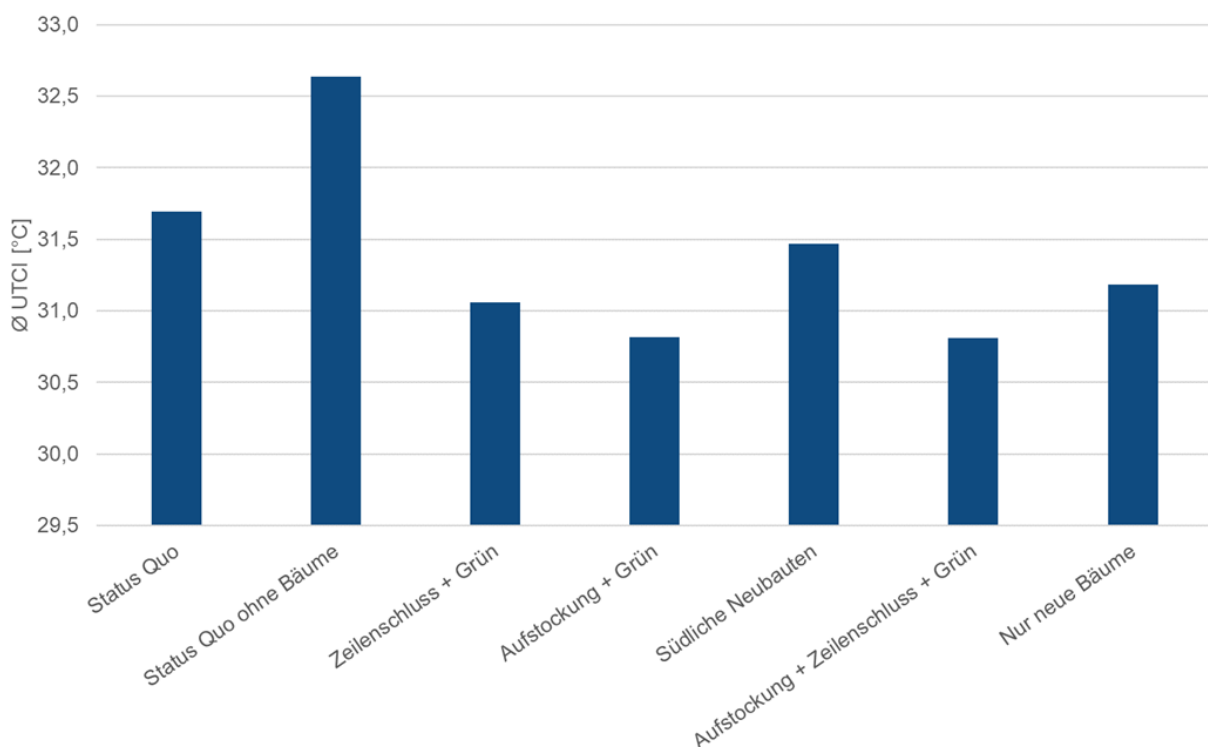


Abbildung 42: Ergebnisse des thermischen Außenraumkomforts (UTCI) für den Szenarienvergleich mithilfe der Voxelmethode für den 1. August, 16 Uhr.

Aus dem Vergleich der Szenarienergebnisse ist zunächst eine geringe absolute Schwankungsbreite der UTCI – Werte ersichtlich. Dies ist auf die Mittelung über das Gesamtgebiet zurückzuführen und liegt in der Größenordnung anderer Publikationen,



die ebenfalls eine Durchschnittsbildung über größere Gebiete untersucht haben (Geletič et al., 2022).

Um den Einfluss durch die Vernachlässigung der lokalen Windströmung einzuschätzen, wurde das Gebiet mittels der Fast Fluid Dynamics (FFD) Methode simuliert (Waibel et al., 2017). Daraus resultierte eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 0,24 m/s im betrachteten Gebiet mit punktuellen Maximalgeschwindigkeiten von 5,34 m/s. Bestehende Untersuchungen zur Sensitivität des UTCI Index zeigen einen geringen Einfluss niedriger Windgeschwindigkeiten, insbesondere bei hohen Lufttemperaturen (Bröde et al., 2012; Bröde et al., 2021). Der Einfluss der Windgeschwindigkeit für die Bewertung von Hitzestress im Rahmen der Fallstudie wird daher als gering eingeschätzt, zumal zur Auswahl der untersuchten Hitzestunde der maximale UTCI Wert herangezogen wurde, welcher eine niedrige Windgeschwindigkeit impliziert. Nichtsdestotrotz sind Kaltluftschneisen von hoher Bedeutung für die nächtliche Abkühlung in der Stadt. Auf diese Thematik wird im Zuge der Untersuchungsgrenzen (s. Kapitel 6.7) eingegangen.

Für den thermischen Außenraumkomfort liefert der Szenarienvergleich folgende Erkenntnisse:

- Das Szenario „Status Quo ohne Bäume“ weist eine deutliche Erhöhung des UTCI auf. Die bestehende Vegetation trägt demnach wesentlich zur Reduktion von Hitzestress am Tag bei.
- Allein die Verschattung durch neue Bäume reduziert die Hitzebelastung deutlich, im Durchschnitt um 0,9°C (UTCI)
- Die Kombination von baulichen und grünen Maßnahmen führt zur größten Reduktion der Hitzebelastung. Hierzu wurden die Nachverdichtungsszenarien jeweils auch ohne zusätzliches Grün untersucht (s. Anhang 8).

Hinsichtlich des Außenraumkomforts wird festgestellt, dass Nachverdichtung und Grün sich ergänzen können und so Reduktionen erreichbar werden, für die einzelne Maßnahmen nicht ausreichen.

### *Tageslichtversorgung*

Zur Bewertung der Tageslichtversorgung von Gebäuden und Wohnungen werden die in der Voxel Methode integrierten Sonnenstunden herangezogen (s. Kapitel 5.1.1). Als Untersuchungsgebiet wird hierfür der kritische Bereich zwischen zwei bestehenden Zeilen bis zur Höhe des Erdgeschosses (3 m) gewählt und der Durchschnittswert der darauf entfallenden Voxelpunkte gebildet. Um die Untersuchung nicht nur auf einzelne Stunden und Schattenkonstellationen zu beschränken, wird für jeden Punkt ein Durchschnittswert über alle Sonnenstände des Monats Januar gebildet.

Um den Laubabwurf der Bäume in den Wintermonaten darzustellen, wurden lediglich Äste für die Simulation modelliert und in die Voxel Verschattungsmaske gemäß der in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Methodik integriert.

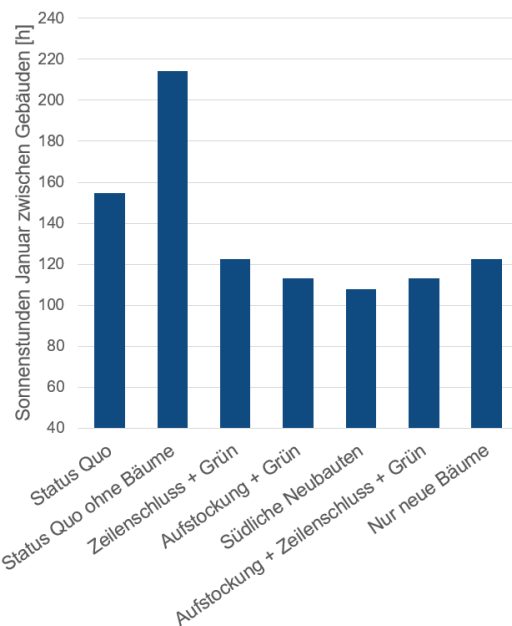


Abbildung 43: Durchschnittliche Sonnenstunden im Januar zwischen zwei Zeilenbauten des Szenarienvergleichs.

Die Ergebnisse der durchschnittlichen Sonnenstunden im Januar (s. Abbildung 43) zeigen, dass die südlichen Neubauten die stärkste Reduktion verursachen. Dies ist auf den niedrigen Sonnenstand im Januar zurückzuführen, welcher bewirkt, dass die Schattenwürfe der zusätzlichen Gebäude bis weit in das Untersuchungsgebiet reichen und Sonneneinträge verhindern. Die bauliche Maßnahme „Zeilenschluss“ zeigt keine Einschränkung der Sonnenstunden (Ergebnisse „Zeilenschluss + Grün“ identisch mit „Nur neue Bäume“), da sich diese ausschließlich auf die nördlich und damit außerhalb des Untersuchungsgebiets gelegenen Schattenwürfe auswirkt. Insgesamt ist festzustellen, dass Maßnahmen, die bei

der Verbesserung des thermischen Außenraumkomforts gut abschneiden zu einer Verschlechterung der Sonnenstunden und damit der Tageslichtzufuhr führen. Dieser Konflikt wird in Abbildung 44 veranschaulicht. Das Szenario „Status Quo ohne Bäume“ schneidet darin beispielsweise aufgrund verringerter Schattenwürfe zwar gut bei den Sonnenstunden im Januar ab, weist jedoch auch die schlechtesten Werte beim thermischen Außenraumkomfort auf. Die weiteren Szenarien führen jeweils zu einer Verbesserung des thermischen Komforts, wobei Kompromisse mit den Sonnenstunden beobachtet werden können. Aufgrund des geringen Einflusses auf die Sonnenstunden kann hier der Zeilenschluss als ausgewogene Nachverdichtungsmaßnahme identifiziert werden. Durch die Kombination mit Bäumen im Südbereich entsteht eine deutliche Reduktion der thermischen Belastung, wobei gleichzeitig die geringsten Einbußen bei der Tageslichtversorgung im Vergleich mit den anderen Nachverdichtungsmaßnahmen auftreten. Als Vergleichswert für die herangezogene Bewertungsgröße wurde ein Benchmark mit verschiedenen Bautypen für den Standort Kempten erstellt und es wurden die maximal erzielbaren Sonnenstunden im Januar (270 h) berechnet, s. Anhang 9. Die Sonnenstunden der Szenarien fallen deutlich höher aus, als es etwa bei Blockbauten der Fall ist. Demnach kann die resultierende Reduktion der Sonnenstunden im Januar für das Gebiet als vertretbar angesehen werden.

Zur Gegenüberstellung mit Literaturwerten wurde die Arbeit von Pan & Jakubiec (2022) herangezogen. Darin wird die Auswirkung von Bäumen auf die Tageslichtsituation von Räumen untersucht. Es wird dabei je nach Baumart eine Reduktion der ausreichenden Tageslichtversorgung über das Gesamtjahr von bis zu

40 % festgestellt. Die im Projekt ermittelte Reduktion der Sonnenstunden durch neue Baumpflanzungen liegt bei maximal 20,8 %.

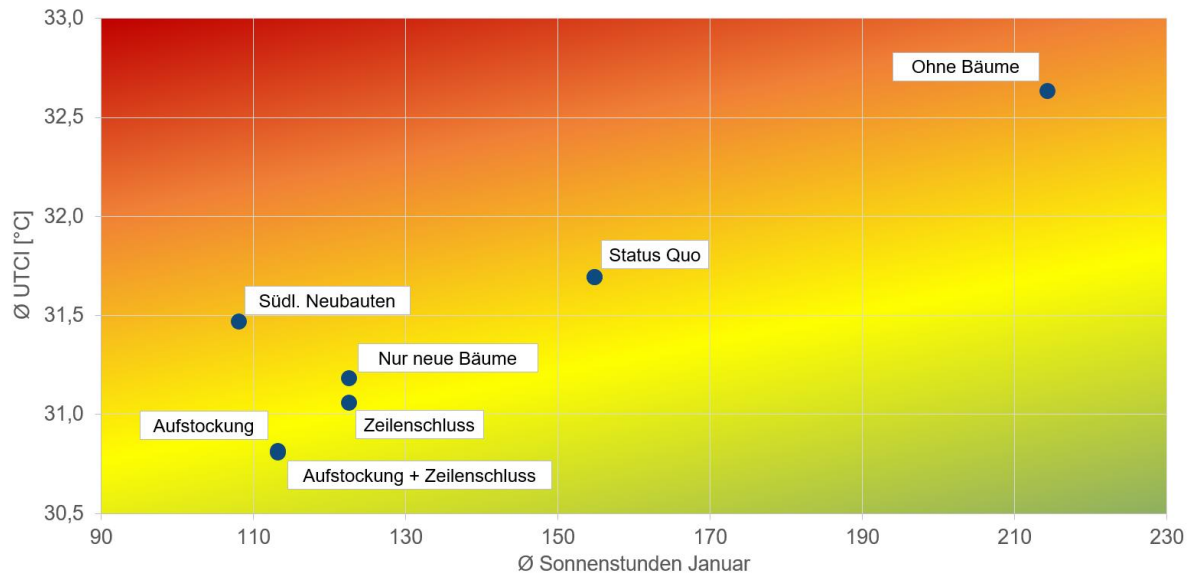


Abbildung 44: Zielkonflikt zwischen thermischen Außenraumkomfort und Tageslicht für Szenarienvergleich. Die farbliche Hinterlegung resultiert aus einer qualitativen Einschätzung basierend auf den Ergebnissen gem. Anhang 9 sowie der UTCI Skala (hoher Hitzestress ab 32°C).

## 6.4 Energiebedarfe und Einfluss des Klimawandels

In diesem Kapitel werden zunächst die Energiebedarfe der entwickelten Szenarien ermittelt und anschließend die Auswirkungen des Klimawandels auf diese Bedarfe untersucht.

### *Energiebedarfe des Quartiers im heutigen Klima*

Zur Untersuchung der Auswirkung von Nachverdichtungs- und Begrünungsmaßnahmen auf den Energiebedarf wird das in Kapitel 5.2 beschriebene Energiemodell verwendet. Zunächst erfolgt die Simulation für die jeweiligen Szenarien mit den Wetterdaten für den Standort Kempten im Jahr 2020. Dabei werden sowohl Heizwärmebedarf als auch potenzielle Kühlbedarfe ermittelt. Die Randbedingungen der Simulation sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Eingangsparameter für das Energiemodell zur Bestandsbewertung.

Parameter	Wert	Einheit
U-Wert Wand	1,0	W / m <sup>2</sup> .K
U-Wert Dach	0,24	W / m <sup>2</sup> .K
U-Wert Bodenplatte	2,1	W / m <sup>2</sup> .K
U-Wert Fenster	2,9	W / m <sup>2</sup> .K
Albedo Fassade	0,3	-
Albedo Dach	0,15	-
Infiltration	0,0003	m <sup>3</sup> / s je m <sup>2</sup> Fassade
WWR Nord	0,09	-
WWR Ost	0,228	-
WWR Süd	0,12	-
WWR West	0,132	-
Konstruktionstyp	massiv	-

Für die unsanierten Bestandsgebäude ergibt sich dabei ein durchschnittlicher Heizwärmebedarf von 179,29 kWh / m<sup>2</sup>.yr und ein potenzieller Kühlbedarf von 8,12 kWh / m<sup>2</sup>.yr. Der Heizwärmebedarf konnte mit dem Energieausweis sowie einem beispielhaften Realverbrauch<sup>14</sup> der Gebäude abgeglichen werden, wobei sich eine gute Übereinstimmung zeigte.

Da sich durch die Nachverdichtungsmaßnahmen die Bezugsfläche des Energieverbrauches ändert, werden im Folgenden die Energiebedarfe pro m<sup>2</sup> und Jahr jeweils nach den Quadratmetern des sanierten Bestandes sowie der Neubauf Flächen gewichtet. Die Ergebnisse zu Heizen und Kühlen der Szenarien sind in Abbildung 45 dargestellt. Dabei ist jeweils eine Sanierung des Bestandes auf den gesetzlichen Standard berücksichtigt. Im Fall von adiabaten Flächen werden diese durch einen U-Wert von 0,01 W / m<sup>2</sup>.K im Energiemodell berücksichtigt, da diese Eigenschaft im derzeitigen Energiemodell nicht näher spezifiziert wurde. Auf dieses Entwicklungspotenzial wird im Kapitel 9 (Ausblick) nochmals näher eingegangen.

<sup>14</sup> Für die Energiesimulationen werden Testreferenzjahre (TMY) verwendet. Diese bilden kein konkretes Jahr ab, sondern stellen eine Repräsentation der Witterungsverhältnisse aus mehreren vergangenen Jahren dar. Daher sind stichprobenartige Realverbräuche aus einzelnen Jahren nicht unmittelbar vergleichbar, können aber zeigen, ob die Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung liegen und das Simulationsmodell realitätsnah konfiguriert wurde.

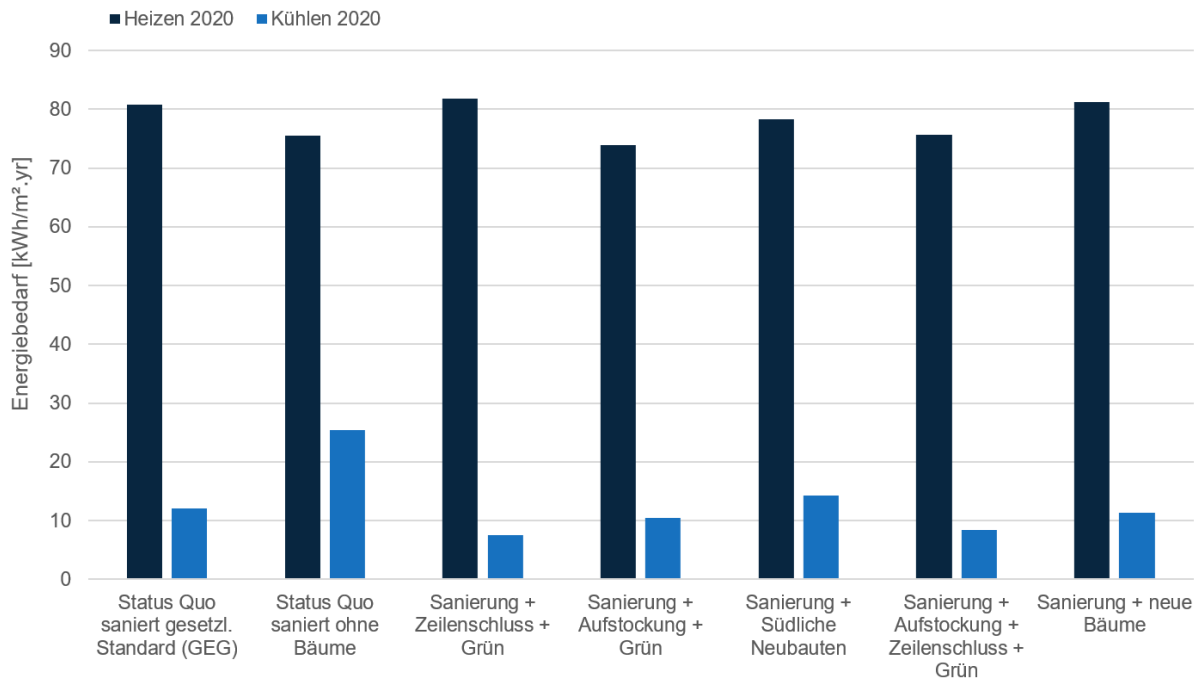


Abbildung 45: Energiebedarfe der Szenarien (alle saniert nach GEG) für Heizen und Kühlen im heutigen Klima.

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Energiesimulationen gewinnen:

- **Bestehendes Grün** trägt enorm zur Reduktion des potenziellen Kühlbedarfs und damit zu einem gesteigerten Innenraumkomfort bei. Die Abweichung zwischen saniertem Bestand mit und ohne existierenden Bäumen liegt bei mehr als 100 %.
- Die **Aufstockungen** schneiden aufgrund adiabater Flächen und hoher Solargewinne gut beim Heizwärmebedarf ab, das zusätzliche Grün verbessert den durchschnittlichen Innenraumkomfort der Bestandsgebäude.
- Die Heiz- und Kühlbedarfe der **südlichen Neubauten** unterscheiden sich nur geringfügig vom Status Quo. Den Verbesserungen beim Innenraumkomfort der Bestandsgebäude durch Verschattung stehen die hohen solaren Einträge der südlichen Neubauten gegenüber, welche sich nachteilig auf deren Kühlbedarf auswirken. Die Integration passiver Kühlmaßnahmen (z.B. Begrünung auf der Südseite der Gebäude, Erhöhung der Reflexionswerte) bei den Neubauten sollte daher weitergehend untersucht werden.
- Die Kombination aus **Aufstockung und Zeilenschluss** weist einen guten Innenraumkomfort auf, da die Aufstockungen zu einer Verschattung der neu gebauten Zeilenschlüsse beitragen
- Der **Zeilenschluss** wird vom Bestand stark verschattet, was den Heizbedarf dieser Gebäude erhöht. Dagegen tragen die adiabaten Flächen zum Bestand zu einer Verringerung des Heizbedarfes bei. Diese Verringerung reicht in der vorliegenden Betrachtung nicht aus, um die negative Wirkung der Verschattung auf den Heizbedarf vollständig auszugleichen. Da adiabate Flächen derzeit nur

vereinfacht im Energiemodell integriert sind, sollten hierfür detailliertere Simulationen durchgeführt werden (s. Kapitel 9).

### Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiebedarfe

Um die Einflüsse des Klimawandels zu untersuchen, wurde ein Wetterdatensatz für den Standort Kempten unter dem Klimawandelszenario RCP 4.5 im Jahr 2070 generiert. Das damit erstellte Energiemodell diente als Grundlage für die Ermittlung der Energiebedarfe im Jahr 2070. Die Veränderungen sind in Abbildung 46 prozentual zu den vorangegangenen Ergebnissen dargestellt.

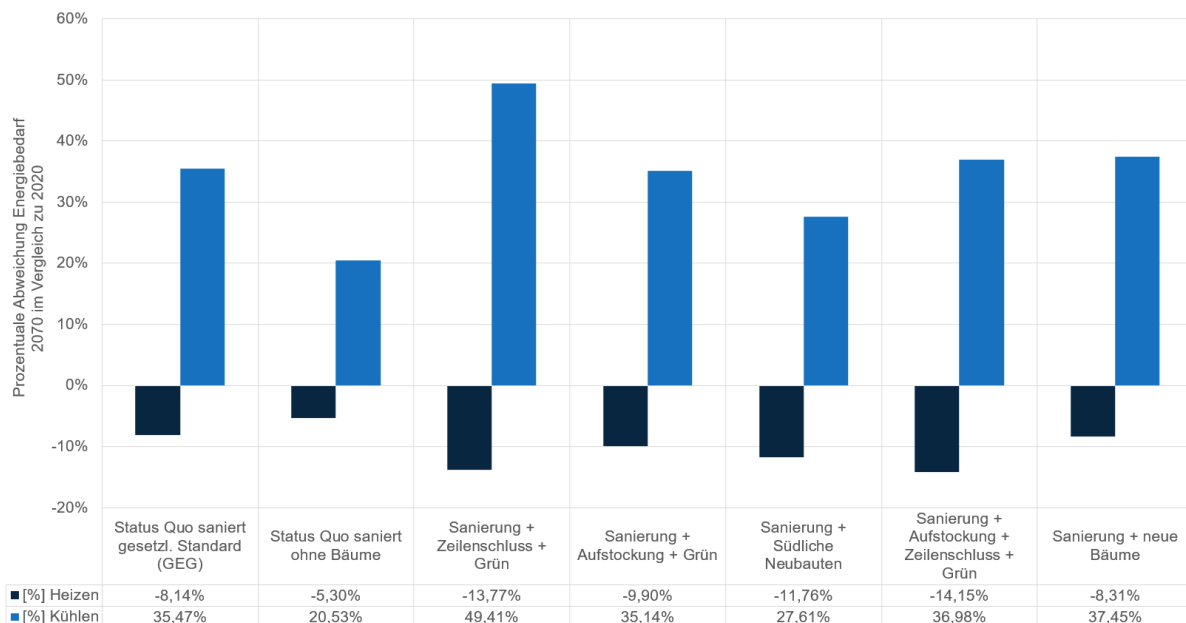


Abbildung 46: Prozentuale Differenz der Energiebedarfe der Szenarien 2070 zu 2020, jeweils mit saniertem Bestand.

Dabei ist szenarienübergreifend festzustellen, dass das herangezogene Klimawandelszenario zu künftig sinkenden Heizwärmebedarfen führt. Für die Nachverdichtungsszenarien beträgt die maximale Reduktion 14,15 %. Die Steigerung der Kühlenergiebedarfe zum Jahr 2070 liegt bei maximal 49,41 % beim Zeilenbau, verglichen mit dem Jahr 2020. Diese, im Vergleich zu den anderen Szenarien hohe Veränderung, deutet auf eine erhöhte Vulnerabilität dieses Nachverdichtungstyps hinsichtlich der Klimawandelauswirkungen hin. Aufgrund der verschatteten Lage des Zeilenschlusses spielen für diesen die solaren Gewinne eine nur untergeordnete Rolle und die Zunahme der durchschnittlichen Lufttemperaturen kommt stärker zum Tragen als bei den anderen Nachverdichtungstypologien. Da im betrachteten Zeitraum bis 2070 mit einer geringen Veränderung der solaren Strahlung, dagegen mit dem klimawandelbedingten Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperatur zu rechnen ist (Ineson et al., 2015), wirkt sich die Erhöhung der Lufttemperatur für den Zeilenbau relativ am stärksten aus. In den verwendeten Wetterdaten der Klimawandelszenarien

wird ebenfalls festgestellt, dass Lufttemperaturen prozentual deutlich stärker ansteigen als die solare Strahlung (Meteonorm, 2020).

Die weiteren Nachverdichtungstypen haben einen geringen Einfluss auf den potenziellen Kühlbedarf im Vergleich zum Klima 2020. Die südlichen Neubauten führen zu einer etwas geringeren Erhöhung und wären somit unter dem Gesichtspunkt der Klimaresilienz zu empfehlen. Der Status Quo ohne Bäume weist zwar die geringste relative Erhöhung beim potenziellen Kühlbedarf auf, dies liegt aber daran, dass dieses Szenario mit der größten absoluten Zunahme verbunden ist.

Um die Auswirkungen anderer Klimawandelszenarien auf die Ergebnisse einschätzen zu können, wurden Bestand und Zeilenschluss in einer gesonderten Simulation ohne weitere Umgebungsobjekte betrachtet. Dabei zeigten sich für die RCP Szenarien 2.6 und 4.5 nur geringe Unterschiede (< 10 %). Das RCP Szenario 8.5 führte zu einer deutlichen Erhöhung des potenziellen Kühlbedarfs und damit einer Verschlechterung des Innenraumkomforts (s. Abbildung 47).

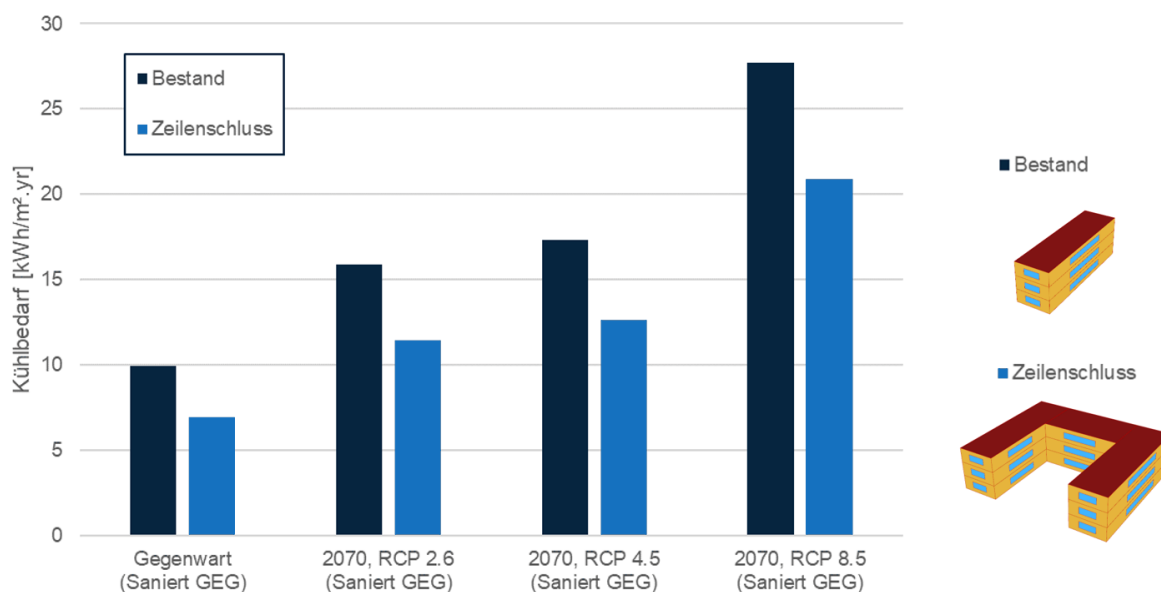


Abbildung 47: Spezifische Untersuchung des Zeilenschlusses hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf den Kühlenergiebedarf.

Eine Begrenzung des Ausstoßes von Treibhausgasen auf den unteren bzw. mittleren Konzentrationspfad ist demnach dringend notwendig, um die Folgen für Innenräume und potenzielle Kühlbedarfe in einem Bereich zu halten, der durch passive Maßnahmen reguliert werden kann. Andernfalls ist mit einem massiven Ausbau der aktiven Kühlkapazitäten im Wohngebäudebereich zu rechnen.

## 6.5 Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung der Szenarien wurde anhand der in Kapitel 5.4 beschriebenen Methodik durchgeführt. Die zusätzliche Vegetation wurde dabei nicht in die Bilanzierung der grauen Emissionen aufgenommen, da die hierfür ermittelten Werte mit hohen Unsicherheiten hinsichtlich einer gemeinsamen Datengrundlage behaftet und stark kontextabhängig sind. Die Änderung der Verschattung und damit des Energiebedarfs bei verringerter oder zusätzlicher Vegetation ist in die Bewertung eingeflossen. Zur Wärmeerzeugung der Gebäude wird der Weiterbetrieb der vorhandenen Gasheizungen angesetzt, da diese durch die Sanierung freie Kapazitäten aufweisen. Alle Neubauten werden als Holzrahmenbau und nach gesetzlichem Standard (GEG) ausgeführt. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse der Bilanzierung bezogen auf die gesamte Nutzfläche des jeweiligen Szenarios, getrennt nach den Anteilen für Betrieb und Baukonstruktion (graue Emissionen) von Neubau und Bestand.

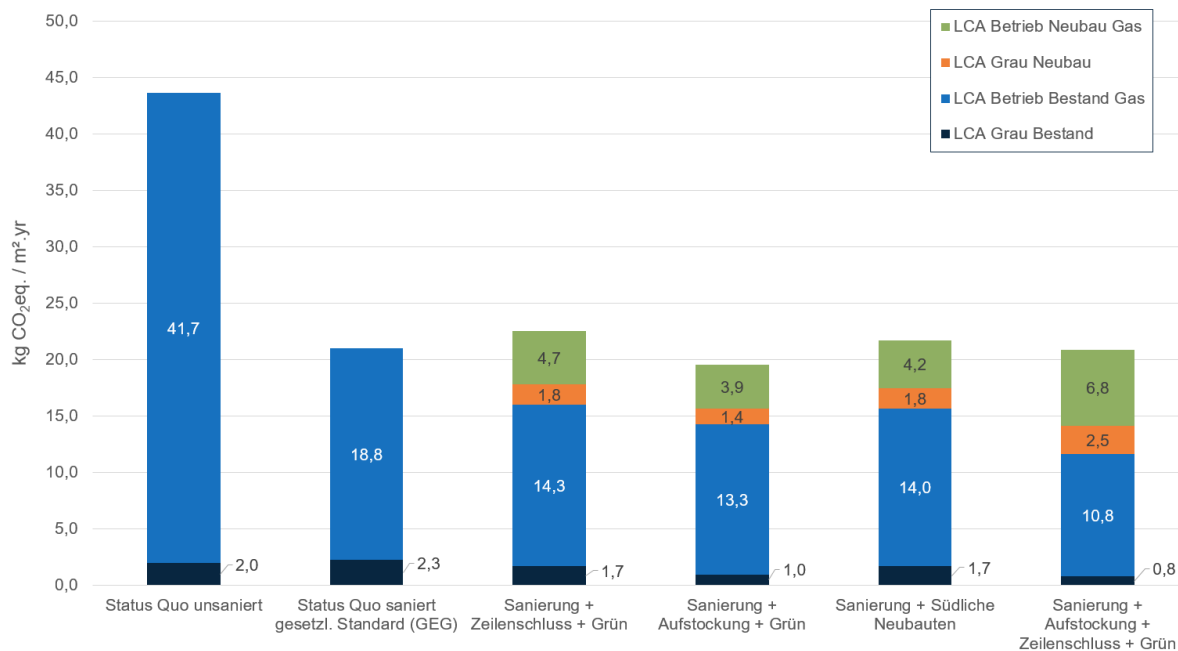


Abbildung 48: Ergebnisse Ökobilanzierung Szenarienvergleich bezogen auf gesamte Nutzfläche des jeweiligen Szenarios.

Aus Anhang 10 kann die absolute Zusammensetzung der Treibhausgasemissionen entnommen werden.

Der unsanierte Bestand weist die insgesamt höchsten Treibhausgasemissionen je m<sup>2</sup> NGF auf. Hinsichtlich grauer Emissionen fällt lediglich der Austausch bestehender Bauteile an, welcher im Vergleich zu den Betriebsemissionen sehr gering ist (4,8 %). Die Sanierung des Bestandes führt zu einer annähernden Halbierung der betrieblichen Emissionen. Weitere Reduktion im Zuge von Nachverdichtungsszenarien sind auf die Erhöhung der NGF zurückzuführen.



Insgesamt ist die Abweichung zwischen den Nachverdichtungsszenarien jedoch gering, was für ein Ausbalancieren der zusätzlichen Emissionen durch zusätzliche Nutzflächen spricht. Ein absoluter Vergleich der Ergebnisse mit gängigen Benchmarks für Neubauten ist auf Grundlage dieser Ergebnisse nicht möglich, da zur Gewichtung auch die Nutzfläche des Bestandes einbezogen wurde. Für einen Vergleich der Treibhausgasemissionen des Neubaus mit bestehenden Benchmarks wurden die der neu hinzukommenden Flächen daher zusätzlich ausschließlich auf die neu geschaffene NGF bezogen und in Tabelle 7 zusammengefasst.

*Tabelle 7: Treibhausgasemissionen der Nachverdichtungsszenarien bezogen auf neu geschaffene Nutzfläche (In graue Emissionen einbezogene LCA – Phasen: A1-3; B4; C3-4).*

Szenario	Sanierung Zeilenschluss Grün	Sanierung Aufstockung Grün	Sanierung Südliche Neubauten	Sanierung Aufstockung Zeilenschluss Grün
Emissionen Grau [kg CO <sub>2</sub> -eq./m <sup>2</sup> .yr]	7,3	5,0	7,2	6,0
Emissionen Betrieb [kg CO <sub>2</sub> -eq./m <sup>2</sup> .yr]	19,0	13,6	16,5	16,1

Verglichen mit einer Studie der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) zu den grauen Emissionen von Gebäuden ist eine Unterschreitung der dort identifizierten Benchmarks feststellbar (Braune et al., 2021). Die darin herangezogenen Systemgrenzen sind vergleichbar, allerdings wurde in den Ergebnissen die Phase D (Gutschriften außerhalb der Systemgrenze) inkludiert. Die Studie umfasst 50 Gebäude (46 Büro- und 4 Wohnbauten) mit verschiedenen Konstruktionsarten (Massivbau, Holzbau, Skelettbau). Die Übertragbarkeit ist aufgrund der wenigen Werte für Wohnbauten zwar eingeschränkt, dennoch können die ermittelten Benchmarks für einen groben Vergleich herangezogen werden. So liegt der Mittelwert der grauen Emissionen aller Gebäude aus der Studie bei 8,7 kg CO<sub>2</sub>-eq / m<sup>2</sup>.yr. In den Einzelwerten ist zudem ein Wohngebäude in Holz-Hybridbauweise enthalten, welches einen Wert von 5,5 kg CO<sub>2</sub>-eq / m<sup>2</sup>.yr aufweist. Wie bereits erwähnt ist die Phase D darin enthalten, weshalb die Werte im Vergleich zu den Bilanzierungsphasen des Szenarienvergleichs<sup>15</sup> etwas niedriger ausfallen dürften. Die aus der Baukonstruktion der Nachverdichtungsmaßnahmen resultierenden Treibhausgasemissionen liegen in diesem Bereich, wobei die Aufstockung der Gebäude im Vergleich mit den weiteren Szenarien (Zeilenschluss, Neubauten) den geringsten Wert aufweist. Demnach bieten Aufstockungen eine gute Möglichkeit zur

<sup>15</sup> Im Szenarienvergleich berücksichtigte Lebenszyklusphasen: A1-A3, B4,B6,C3-C4

Reduktion der grauen Treibhausgasemissionen im Zuge von Nachverdichtung, was insbesondere den Einsparungen bei der Gründung zuzuschreiben ist.

Die Gegenüberstellung der absoluten Treibhausgasemissionen je Nachverdichtungsszenario (s. Anhang 10) zeigt deutlich, dass die durch die Sanierung des Bestandes geschaffene Einsparung ausreicht, um den neuen Wohnraum der Nachverdichtungsszenarien zu erstellen und zu betreiben. Eine Verbesserung der CO<sub>2</sub> Bilanz des Quartiers bei gleichzeitiger Integration zusätzlicher Wohnflächen ist demnach umsetzbar. Allerdings wird hierbei keine CO<sub>2</sub> Neutralität erreicht.

Den größten Anteil bei den Treibhausgasemissionen weist die Betriebsphase von Neubau und Bestand auf. Eine Untersuchung zur Sensitivität von Ökobilanzen, welche im Zuge der CAADRIA Konferenz 2022 veröffentlicht wurde (Reitberger et al., 2022) zeigte, dass sowohl für die Phase des Betriebs, als auch für die gemeinsame Betrachtung von Betrieb und Konstruktion der größte Stellhebel in der Optimierung des Primärenergieträgers liegt. So würde eine Umstellung der Wärmeerzeugung auf Wärmepumpen mit einer Arbeitszahl (COP) von 3,5 zu einer Reduktion der betrieblichen Emissionen um 28 % mit dem Strommix aus dem Jahr 2018 und 57 % mit dem erwarteten Strommix im Jahr 2050 führen<sup>16</sup>. Weitere Reduktionen durch beispielsweise die Integration einer Photovoltaikanlage zur Versorgung der Gebäude sollten zudem geprüft werden.

Aus den dargelegten Ergebnissen können in Hinblick auf die Ökobilanzierung der Nachverdichtungsszenarien folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Durch **Kombination aus Sanierung und Nachverdichtung** kann das Quartier im Vergleich zum unsanierten Zustand mehr Wohnfläche bei gleichzeitig geringeren Emissionen bieten.
- Trotzdem ist der neu geschaffene Wohnraum **nicht klimaneutral**. Daher sind weitere Maßnahmen zur Optimierung und ggf. Kompensation der Treibhausgasemissionen erforderlich.
- Wird Gas als **Energieträger** beibehalten, weist der Gebäudebetrieb den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen auf. Bei Umstellung auf z.B. Wärmepumpe sinkt der Anteil des Betriebs und die Optimierung der Gebäudekonstruktion rückt in den Fokus.
- Aufgrund der erwarteten Dekarbonisierung des Strommixes ist die Umstellung bzw. Integration von Wärmepumpen eine sinnvolle Maßnahme zur **Reduktion der betrieblichen Emissionen**.
- Hinsichtlich **grauer Emissionen** erweisen sich Aufstockungen als vorteilhaft gegenüber den anderen Nachverdichtungstypen (Zeilenschluss, Neubau).

---

<sup>16</sup> GWP - Werte gemäß Datensätzen der Ökobaudat

## 6.6 Abwägung von Synergien und Kompromissen

Mithilfe der durchgeführten Analysen konnten die Vor- und Nachteile der Nachverdichtungsszenarien im Vorangegangenen dargelegt werden. Tabelle 8 zeigt eine qualitative Zusammenfassung dieser Ergebnisse. Darin sind die Szenarien entsprechend ihrer Veränderung des Ausgangszustandes im gegenseitigen Vergleich eingeordnet. Daraus ist erkennbar, dass keines der Szenarien als uneingeschränkt beste Option identifiziert werden kann. Es müssen stets Kompromisse eingegangen und damit Einschränkungen bei manchen Bewertungsaspekten akzeptiert werden. So führen etwa Maßnahmen zur Verbesserung des Außenraumkomforts häufig zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs der Gebäude aufgrund der zusätzlichen Verschattung. Dieser Kompromiss ist bei den Szenarien allerdings unterschiedlich stark ausgeprägt und kann durch die Wahl geeigneter Nachverdichtungsmaßnahmen und deren vorteilhafter Integration über adiabate Flächen oder die Nutzung von Solareinträgen kompensiert und teils sogar verbessert werden.

Tabelle 8: Qualitative Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem Szenarienvergleich.

Szenario	Tageslicht Außenraum im Januar	Außenraumkomfort tagsüber	Innenraumkomfort Kühlenergie	Heizenergiebedarf	Emissionen im Lebenszyklus absolut	Lebenszyklusemissionen relativ Wohnfläche	Geschaffener Wohnraum
Status Quo saniert	o	o	-	++	++	/	/
Nur neue Bäume	-	++	+	-	o	/	/
Zeilenschluss + Grün	-	++	++	+	-	--	-
Aufstockung + Grün	-	++	+	++	-	++	+
Aufstockung + Zeilenschluss + Grün	-	++	++	+	--	+	++
Südliche Neubauten	--	+	-	+	-	-	-

o = kaum Veränderung feststellbar / = Keine Bewertung möglich

- = eher schlechtes Abschneiden -- = schlechtes Abschneiden

+ = eher gutes Abschneiden ++ = gutes Abschneiden

Als zweite Darstellungsvariante wurden die quantitativen Ergebnisse der Untersuchung in Spinnennetzdiagrammen aufgearbeitet. Diese sind in Anhang 11 aufgeführt und geben neben qualitativen Tendenzen auch Aufschluss über die quantitativen Unterschiede zwischen den Szenarien.

Die reine Sanierung der Bestandsgebäude geht mit der absolut betrachtet größten Reduktion der Treibhausgasemissionen einher. Die Platzierung zusätzlicher Großbäume im Gebiet zeigte gute Wirkung zur Begrenzung der sommerlichen Überhitzung im Innen- und Außenraum. Diese Varianten dienen der Vergleichsuntersuchung im Zuge des Projekts, gehen aber mit keiner Bereitstellung zusätzlichen Wohnraums einher. Es kann festgestellt werden, dass für Gebiete mit geringen Anforderungen an zusätzlichen Wohnraum die Bestandssanierung eine wichtige Komponente bei der Erreichung der Klimaziele darstellt und zusätzliche Bäume eine wirkungsvolle Maßnahme zur Sicherstellung des Außen- und Innenraumkomforts im heutigen und künftigen Klima bieten.

Im Vergleich der Nachverdichtungsszenarien schneidet die Variante „Südliche Neubauten“ unterdurchschnittlich ab. Dies liegt insbesondere an den hohen Einschränkungen bei der Tageslichtversorgung sowie der ungünstigen Ausrichtung in Bezug auf die sommerliche Überhitzung. Außerdem handelt es sich hierbei um freistehende Bauwerke, die die potenziellen Vorteile von Nachverdichtungsmaßnahmen zur Weiternutzung bestehender Baustrukturen nicht realisieren, wie dies beispielsweise bei Aufstockungen der Fall ist.

Je nach priorisierten Faktoren sind folgende Szenarien zu empfehlen:

- Bei einer hohen Gewichtung des **neu geschaffenen Wohnraums** kann eine Kombination aus Zeilenschluss und Aufstockung empfohlen werden. Dabei ist insbesondere auf einen strategisch günstigen Einsatz von Bäumen zur Verschattung von hitzeexponierten Bereichen zu achten. Die mit diesem Szenario verbundenen Treibhausgasemissionen sollten hinsichtlich ihrer Reduktion durch regenerativen Energieeinsatz (z.B. Photovoltaik) untersucht werden.
- Bei Priorisierung einer **emissionsarmen Nachverdichtung** bietet insbesondere das Szenario der Aufstockung Vorteile. Wie zuvor gilt auch hier, dass die Bestandsvegetation erhalten und die südlichen Bereiche vor Überhitzung durch zusätzliches Grün geschützt werden sollten.

## 6.7 Grenzen der Untersuchung

Die Analyse der komplexen Zusammenhänge zwischen Innen- und Außenraum sowie die Anforderung an die Echtzeitfähigkeit der Methoden zur Verwendung in einem Planungstool, führt zu einigen Anwendungsgrenzen für die im Vorangegangenen dargelegten Ergebnisse. Diese betreffen insbesondere folgende Aspekte:

- **Eingeschränkte Validierung der entwickelten Methoden**  
Die im Zuge des Projekts entwickelten Methoden zur Echtzeitsimulation (Voxel- sowie Energiemodell) konnten im Rahmen des Projekts nur in ausgewählten Fallstudien validiert werden. Obwohl diese eine gute Übereinstimmung zeigten, ist eine weitere Validierung der Methoden notwendig, um sie auch in komplexeren Gebieten anzuwenden.
- **Nächtliche Abkühlung nicht integriert**  
Die Bewertung des Außenraumkomforts erfolgte ausschließlich für die Tagessituation. Der Einfluss der Nachverdichtungsszenarien auf die nächtliche Abkühlung sollte daher in weitergehender Forschung untersucht und als digitale Methode aufbereitet werden.
- **Konstante Windgeschwindigkeit berücksichtigt**  
Wie in Kapitel 6.3 dargelegt, wurde der lokale Einfluss auf die Windgeschwindigkeiten nicht mit in die UTCI Berechnung integriert. Durch die Auswahl eines Hitzetages mit geringer Windstärke sowie der dargelegten Sensitivitäten des UTCI Kennwerts kann diese Vereinfachung akzeptiert werden. Im Zuge der Integration von nächtlicher Abkühlung sollte jedoch auch die nächtliche Durchlüftung lokal aufgelöst untersucht werden, um Mindestluftwechselraten im Außenraum sicherzustellen und Lüftungsschneisen freizuhalten.
- **Exportierte Massen teils ungenau**  
Die aus der CDP exportierten Informationen zu Gebäudeflächen und Höhen wurden auf deren Plausibilität geprüft und aufgrund größerer Abweichungen manuell auf die aus den Gebäudeunterlagen ermittelten Werte korrigiert. Diese Verzerrung könnte in künftigen Vorhaben durch den Einsatz von verbesserten Tiefensensoren vermieden werden. Arbeiten zur Integration dieser neueren Sensoren laufen bereits im Zuge weiterer Projekte am Lehrstuhl für Architekturinformatik.
- **Bäume werden als Großbäume eingesetzt**  
Aufgrund der Vorberechnung von Verschattungselementen konnte keine Wachstumsdynamik von Bäumen integriert werden. Bei der Platzierung von Bäumen am Planungstool sollte daher stets auf die notwendige Wachstumszeit bis zum Erreichen der erwarteten Ökosystemleistungen (in diesem Fall v.a. Verschattung) hingewiesen werden.
- **Energiemodell für manche Szenarien noch ungenau**  
Im Zuge der Bewertung der Szenarien mittels des erarbeiteten Energiemodells wurde zudem festgestellt, dass dieses für gängige Gebäudegeometrien gute Übereinstimmungen liefert (vgl. Kapitel 5.2.3). Im Falle von z.B. adiabaten Flächen, wie diese etwa bei Aufstockungen oder Zeilenschlüssen vorkommen, ist bislang keine detaillierte Berücksichtigung implementiert. Diese wurden durch erhöhte Wärmedurchgangswiderstände der entsprechenden Bauteile berücksichtigt. Dies stellt eine Vereinfachung dar, die in der weiteren

Entwicklung von KI Modellen zur Energiebedarfsprognose berücksichtigt werden sollte. Zudem sollten Validierungen für abweichende Gebäudegeometrie (z.B. L oder H Formen) erfolgen.

## 6.8 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich zunächst auf das untersuchte Fallstudienquartier. Die Übertragbarkeit auf Zeilenbauten im Allgemeinen bzw. darüber hinaus wird im Folgenden diskutiert.

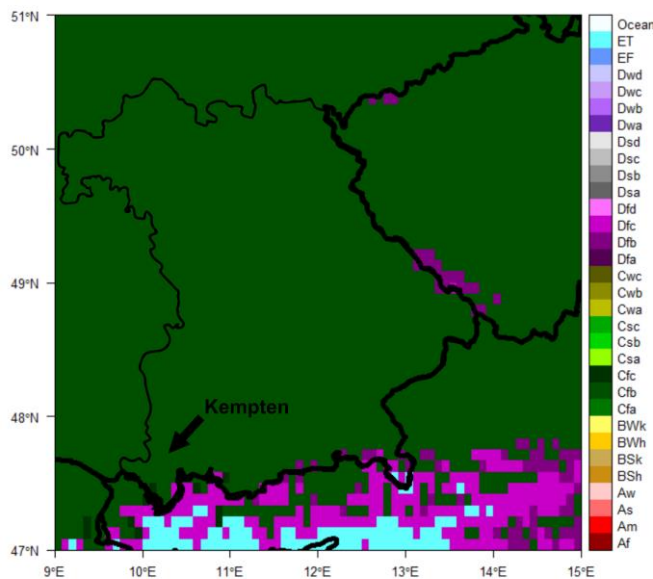


Abbildung 49: Klimazonenklassifikation nach Köppen-Geiger für Bayern, erstellt nach (Kottek et al., 2006).

Die hier durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf den Standort Kempten, (gemäßigte Klimazone; Cfb<sup>17</sup> nach Köppen-Geiger). Eine Übertragung auf andere Kommunen und Städte in Bayern bzw. Deutschland mit ähnlichen klimatischen Voraussetzungen ist grundsätzlich denkbar. Abbildung 49 zeigt die Einteilung Bayerns in die Köppen-Geiger Klassifikation. Demnach weist der Großteil des Freistaats die Einordnung Cfb auf und einer Übertragung der Ergebnisse aus Sicht der grundlegenden klimatischen Randbedingungen kann zugestimmt werden.

Nichtsdestotrotz unterscheiden sich die absoluten Ergebnisse für den Standort Kempten von den Ergebnissen, die beispielsweise für nördliche Teile Bayerns zu erwarten wären. Die grundsätzlichen Tendenzen können aber aufgrund der ähnlichen saisonalen Verläufe als übertragbar angesehen werden.

Der Siedlungstypus „Zeilenbebauung der 50er Jahre“ ist in Deutschland weit verbreitet und bietet ein hohes Nachverdichtungspotenzial. Das untersuchte Fallstudienquartier entspricht in weiten Teilen der in Kapitel 3.1.1 und 6.1.2 beschriebenen Typologie (hoher Grünanteil im Bestand, weitestgehend ungenutzte Gebäudezwischenräume, drei bis vier Stockwerke). Durch die Auswahl der Fallstudie basierend auf den zuvor identifizierten, häufig auftretenden Siedlungscharakteristiken mit Nachverdichtungspotenzial ist die Übertragbarkeit insbesondere für Zeilenbebauungen der 1950er bis 1960er Jahre gegeben. Die untersuchten Szenarien zeigen insbesondere die Bedeutung des Bestandsgrüns in Hinblick auf Außen- und

<sup>17</sup> Cfb: Feuchtes, warmgemäßigtes Klima mit warmen Sommern

Innenraumkomfort. Der Erhalt von Baumbeständen kann demnach als wichtiger Baustein für die Entwicklung dieses Quartierstyps eingeordnet werden.

Sofern es sich um unsanierte Quartiere handelt sind die Aussagen zur Reduktion des Treibhausgaspotenzials ebenfalls übertragbar. Es sollte stets die Primärenergiequelle des Bestandes hinterfragt und ggf. hin zu emissionsarmer Technologie ausgetauscht werden, da hier einer der größten Stellhebel liegt. Ebenso bieten diese Quartiere ein großes Potenzial zur Energieeinsparung durch die Sanierung der Gebäude. Im Fall bereits sanierter Zeilenbauten sollte eine gesonderte Untersuchung bezüglich der Eignung möglicher Energieversorgungs- und Nachverdichtungskonzepte erfolgen, da dann die mit der Baukonstruktion verbundenen Treibhausgasemissionen einen größeren Anteil einnehmen und dadurch ggf. andere Aspekte (z.B. emissionsarme Baustoffe, Kreislaufgerechtigkeit) in den Fokus rücken. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zum Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung legt zudem nahe, dass diese Empfehlungen nicht nur auf Zeilenbauten, sondern auch auf andere Siedlungstypen angewendet werden können.

## 7 Abschlusskonferenz des Forschungsprojekts

Am 9. November 2022 fand online die Abschlusskonferenz des Projekts statt. Zur Abschlusskonferenz wurden sowohl Vertreter:innen aus Forschung (Universitäten, Forschungsinstitute) als auch Planungsbeteiligte und Kommunen eingeladen (Einladung und Agenda s. Anhang 15). Für die Veranstaltung waren 166 Anmeldungen eingegangen. 59 davon stammten aus dem Großraum München, 12 weitere aus dem Augsburger Raum. Insgesamt zeigte sich eine bayernweite Verteilung, mit einigen wenigen Anmeldungen außerhalb Bayerns (s. Abbildung 50). Die Teilnehmer:innenzahl lag bis kurz vor Ende der Veranstaltung bei über 100 Personen.

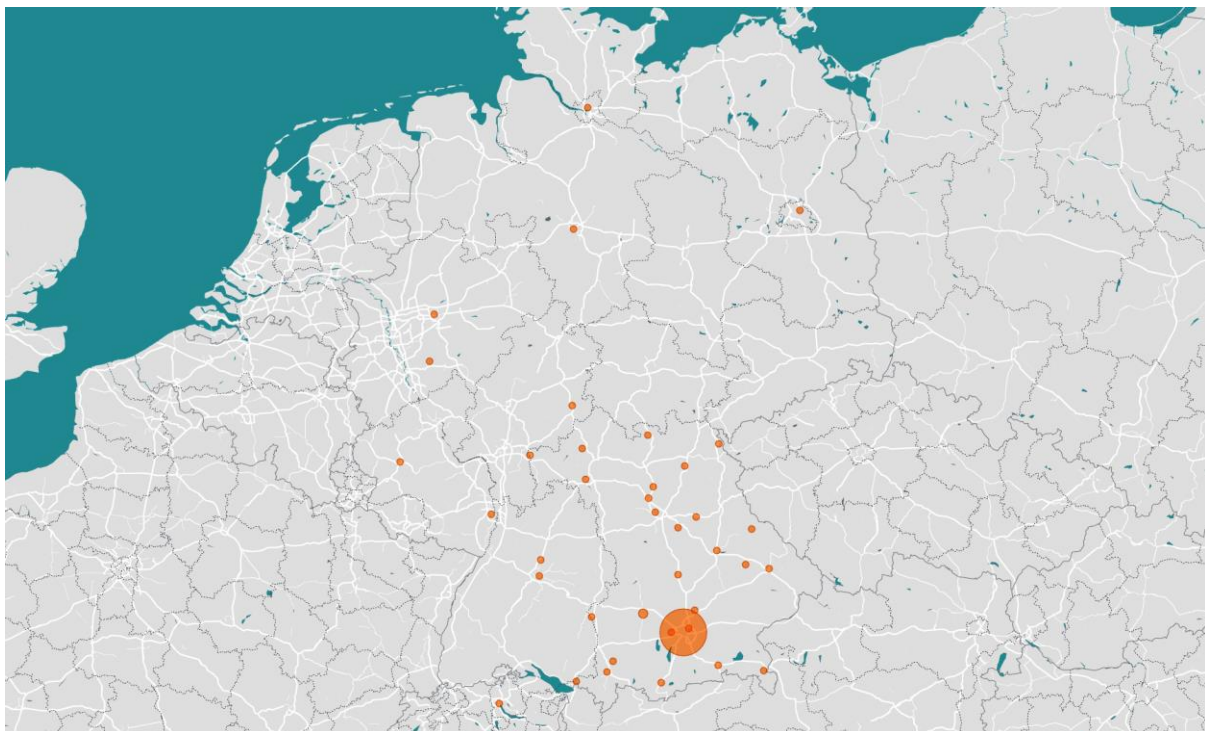


Abbildung 50: Räumliche Verteilung der Anmeldungen für die Abschlusskonferenz.

Während der Abschlusskonferenz wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes vorgestellt und Möglichkeiten zur Nutzung der erarbeiteten Erkenntnisse für die Praxis aufgezeigt. Dazu gehörte eine Vorstellung des Energiemodells für große Gebäudebestände sowie Hinweise auf die Programmcodes und Erkenntnisse aus der untersuchten Fallstudie.

Abgeschlossen wurde die Veranstaltung mit einer moderierten Diskussion zwischen ausgewählten Vertreter:innen aus Forschung (Prof. Lang und Prof. Pauleit, TUM; Prof. Klingshirn, Verband Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau Bayern e. V.), Wohnungsbau (Hr. Berg, Vonovia), Stadtverwaltung (Hr. Eggert, Stadt Kempten) und privaten Planungsbüros (Hr. Klaffke, bogevischs büro). Die Diskussionspartner:innen betonten die Komplexität von Nachverdichtungsprojekten und die Vielfalt von Anforderungen, die sich an die Planungspraxis stellen. Klimaanpassung und



Klimaschutz gehören zu den Themen, die bislang noch wenig beachtet werden, aber verstärkt in den Fokus treten müssen.

Im Rahmen der Veranstaltung konnten die Teilnehmenden nützliche Planungshilfen und beispielhafte Strategien zum Umgang mit Nachverdichtung und Klimawandel kennenlernen. Die CDP und die entwickelten Methoden wurden dabei als besonders wertvolle Instrumente hervorgehoben. Der Wunsch, die CDP weiter auszubauen und den Kommunen sowie einem breiteren Publikum zugänglich zu machen, wurde mehrfach geäußert. Insbesondere die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Planungsbüros, Investor:innen und Kommunen könnte dadurch gestärkt werden.

Die Teilnehmer:innen der Abschlusskonferenz hatten die Möglichkeit während der gesamten Veranstaltung über eine Frage-Antwort Funktion Rückfragen und Anmerkungen einzubringen, die im Verlauf beantwortet wurden. Eine weitere interaktive Einbindung fand durch Umfragen statt, die es ermöglichten, einen Überblick über das vorhandene Wissen sowie ein abschließendes Feedback einzuholen. Hiermit wurde zunächst die Zusammensetzung des Teilnehmer:innenkreises abgefragt. Dieser bestand zu wesentlichen Teilen aus Verwaltungsmitarbeiter:innen, welche als eine der Hauptzielgruppen für die Entwicklungen des Projekts sind (s. Abbildung 51).

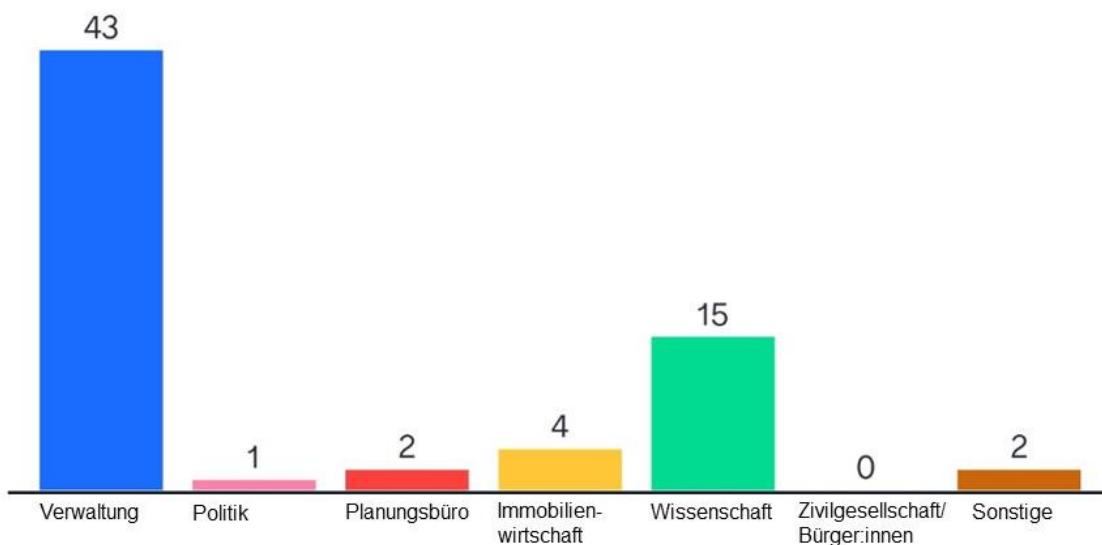


Abbildung 51: Teilnehmergruppen der Abschlussveranstaltung.

Neben dem Hintergrund wurden bereits bekannte Planungsinstrumente und Methoden abgefragt. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Ermittlung von Leerständen in Zusammenhang mit dem Flächenmanagement sowie der Folgekostenschätzer<sup>18</sup> für die Teilnehmenden eine wichtige Rolle spielen. Allerdings gaben auch mehrere Teilnehmer an, keine derartigen Tools oder Methoden zu nutzen.

<sup>18</sup> Nähere Informationen hierzu unter

<https://www.lfu.bayern.de/umweltkommunal/flaechenmanagement/folgekostenschaetzer/index.htm>



Abbildung 52: Abfrage bekannter Tools im Teilnehmer:innenkreis der Abschlussveranstaltung (je größer eine Antwort erscheint, desto häufiger wurde sie in der Umfrage genannt).

In einer weiteren Umfrage wurden aus Sicht der Teilnehmenden effektive Mittel und Strategien zur Steuerung von Nachverdichtung abgefragt. Hier wurden unter anderem Bauleitplanung, Klimaanpassungsstrategien, Klimaschutzstrategien, Integrierte städtebauliche Entwicklungskonzepte, Leitfäden zur Innenentwicklung und standortspezifische Leitlinien zur Nachverdichtung genannt. Zusätzlich wurden bekannte Kennzahlen zur Bewertung von Konzepten und Strategien abgefragt (s. Abbildung 53).



Abbildung 53: Abfrage bekannter Kennzahlen zur Szenarienbewertung. (je größer eine Antwort erscheint, desto häufiger wurde sie in der Umfrage genannt).

Im Teilnehmer:innenkreis bestehen demnach gemischte Vorkenntnisse bezüglich Methoden, Bewertungs- und Umsetzungsstrategien. Die Inhalte der Abschlussveranstaltung konzentrierten sich auf diese Themenfelder und zeigten Möglichkeiten und im Rahmen des Forschungsprojekts erzielte Weiterentwicklungen auf.

Am Ende der Veranstaltung wurde zudem ein Feedback der Teilnehmer:innen eingeholt. Dieses spiegelte erneut den hohen Bedarf an digitalen Methoden und Tools zur Planungsunterstützung wider. Insbesondere der Einbezug landschaftlicher Aspekte in einem größeren räumlichen Kontext und die Bewertung gesundheitlicher Auswirkungen von Planungen wurden als relevante Weiterentwicklungsmöglichkeiten genannt. Zudem konnten einige Teilnehmer:innen neue Impulse für die eigene Arbeit mit aus der Veranstaltung nehmen. Die eingegangenen Antworten zum Veranstaltungsfeedback können Anhang 16 entnommen werden.

Die im Zuge der Abschlussveranstaltung gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich bekannter Methoden und Bewertungsmöglichkeiten von Planungsentwürfen sowie die Inhalte der damit verbundenen Diskussion sind in die Formulierung des Fazit sowie des Ausblicks im Folgenden eingeflossen.

## 8 Fazit und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen des Projekts wurden Anforderungen an ein Planungstool zur Unterstützung von Kommunen und Planer:innen in frühen Entwurfsphasen von Nachverdichtungsvorhaben ermittelt. Für die festgestellten Bedarfe wurden Methoden entwickelt und schließlich in prototypische Plug-Ins für die Collaborative Design Platform (CDP) umgesetzt. Die Erprobung im Rahmen von Workshops zeigte weitere Anwendungsfelder und Entwicklungspotenziale. Durch die Untersuchung von Nachverdichtungsszenarien wurden Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt und deren Integration in den Entwurfsprozess diskutiert. Zusammenfassend zeigten sich große Potenziale kollaborativer Planungsmethoden für die Entwicklung von Strategien im Umgang mit Nachverdichtung. Indem sowohl haptische wie auch visuelle Sinne angesprochen werden, bieten sich unterschiedliche Zugänge zu den Informationen. Wissenschaftlich fundierte Daten werden mit einer leicht verständlichen Visualisierung verbunden. Für die Nutzer:innen wird der Abstraktionsgrad von Nachverdichtungsszenarien reduziert, bei gleichzeitiger Erweiterung der Entscheidungskriterien. Dies bietet Chancen, die vielschichtigen positiven Effekte von Nachverdichtung und grüner Infrastruktur zu stärken und besser in Planungsprozesse einfließen zu lassen. Weiterhin wird die Identifikation von widersprüchlichen Zielvorgaben (z.B. zusätzliche Grünflächen gegenüber geforderten Stellplätzen) ermöglicht.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse zu ausgewählten Untersuchungsschwerpunkten dargelegt und anschließend deren Transfer in die Praxis erläutert.

### 8.1 Rahmenbedingungen für klimaresiliente Nachverdichtung

Die Online-Umfrage (Kapitel 4.1.1) zeigte, dass die bauliche Nachverdichtung des Gebäudebestands ein wichtiges Thema in bayerischen Kommunen und Städten ist und zunehmend an Bedeutung gewinnt. In vertiefenden Gesprächen mit Expert:innen (Kapitel 4.1.2) aus Verwaltung, Planung, Wohnungsbau und Zivilgesellschaft wurde ein hoher Bedarf für die Entwicklung von Strategien zur Umsetzung einer klima-, umwelt- und sozialverträglichen sowie baukulturell wertvollen Nachverdichtung ersichtlich. Die klassisch formellen Planungsinstrumente wie Flächennutzungsplan und Bebauungsplan reichen zur Steuerung einer kontrollierten und klimaresilienten Nachverdichtung nicht aus. Auch wenn viele der Expert:innen durchaus Potenziale im Zuge von Nachverdichtung erkennen, stellen gesetzliche Auflagen (z.B. Stellplatzverordnungen), Mangel an Ressourcen und Schwierigkeiten in der Kommunikation Hürden dar, die es zu bewältigen gilt.

Die Interviewergebnisse haben gezeigt, dass einfache Konfliktlösungsansätze (z.B. alleinige Erhöhung kommunaler Ressourcen) oft nicht ausreichend sind. Stattdessen sind das Zusammenspiel zwischen den kommunalen Akteur:innen, die Festlegung von klaren Spielregeln (z.B. durch Freiflächengestaltungssatzungen) und die Entwicklung von Leitbildern und Zielvorstellungen für die Stadtplanung unter breiter Beteiligung entscheidend. Beteiligung in Forschungsprojekten, Mitgliedschaft in

kommunalen Austauschnetzwerken oder eine Zusammenarbeit mit vorhandenen Initiativen vor Ort können helfen, knappe kommunale Ressourcen zu überbrücken.

## 8.2 Einsatz digitaler Werkzeuge in der Quartiersplanung

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse der entwickelten CDP Plug-Ins für die Quartiersplanung im Allgemeinen aufgezeigt. Das Werkzeug bietet eine Entscheidungsunterstützung für bayerische Städte und Kommunen. Es versetzt Planer:innen und Kommunen in die Lage, den Nutzen dieser Art der digitalen Interaktion abzuschätzen und die Vorteile kollaborativer Plattformen für sich zu erkennen. Während des Entwicklungsprozesses wurden grundsätzliche Fragen zu den Anwendungsgruppen, Einsatzmöglichkeiten und Anwendungszeitpunkt des Werkzeugs gesammelt und die Bedeutung der Fragen für die weitere Projektentwicklung diskutiert. Basierend auf den Interviewergebnissen, der Diskussionsrunde im Zuge der Abschlussveranstaltung (s. Kapitel 7) und internen Analysen wurden mehrere entscheidende Faktoren für den Einsatz digitaler Entwurfswerkzeuge identifiziert:

- **Anwendungsgruppen:** Stadtplaner:innen, Investor:innen, Architekt:innen – der Nutzen besonders für diese Anwender:innen hat sich im Workshop erwiesen. Onlineumfrage und Ergebnisse der Interviews mit Expert:innen zeigen, dass neben Planenden eine (informelle) Beteiligung von Bürger:innen für eine gelungene Nachverdichtung wichtig ist.
- **Anwendungszeitpunkt:** Je früher Aspekte wie voraussichtlicher Energiebedarf, Ökobilanz von Bauweisen und grüne Infrastruktur in der Objekt- oder Quartiersplanung berücksichtigt werden, desto besser können sie in Planungsprozesse integriert werden und zu einer klimaresilienten Stadtentwicklung beitragen. Idealerweise wird die CDP bereits in frühen Planungsphasen (z.B. Grundlagenermittlung für städtebauliche Wettbewerbe) eingesetzt, aber auch im späteren Verlauf für eine wiederholte Entwurfsüberprüfung und -optimierung ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten.
- **Maßstabsebene:** Die vertikale und horizontale Nachverdichtung in Kombination mit der Bilanzierung verwendeter Materialien und einer optimalen Aufenthaltsqualität im Quartier erfolgen auf städtebaulicher Ebene. Für die Betrachtung auf Quartiersebene ist ein städtebaulicher Maßstab die Voraussetzung (1:200, 1:500 oder 1:1000), um Entwicklungs- und Verdichtungspotenziale des Quartiers berücksichtigen zu können.
- **Datengrundlagen und Schnittstellen:** Die CDP ist mit ihren interaktiven Ein- und Ausgabemöglichkeiten die Basis für die Hauptanwendung und deren Plug-Ins. Geometrische Informationen (Physische Objekte) und frei verfügbare Daten (bspw. Open-Street-Map Daten) helfen bei der Generierung des zugrundeliegenden Planungsgebiets, in welchem die Szenarien bearbeitet werden. Die Verwendung einer zentralen Datenbank als Schnittstelle zwischen

CDP und Simulationsmethoden zeigte sich dabei als geeignet und gewährleistete einen verlustfreien und schnellen Datentransfer.

- **Eingabe:** Für die horizontale und vertikale Nachverdichtung wird die Funktion zum Einlesen von physischen Arbeitsmodellen verwendet. Durch das Bedienen von Menüs über Fingergesten wurde das Einsetzen von Bäumen ermöglicht. Die geladene Szene kann punktuell mit Bäumen erweitert werden, welche als Inputparameter für die Simulation dienen. Über Menüfelder lassen sich unterschiedliche Informationen wie Energiebedarf von Gebäuden, Abstandsflächen und Außenraumkomfort ein- oder ausblenden. Dabei wurden klare Bedienungsanweisungen als notwendige Voraussetzung zur Anwendung mit Stakeholdern erkannt.
- **Umgang mit Komplexität:** Insbesondere die Diskussion im Zuge der Abschlussveranstaltung hat das Potential digitaler Methoden zum Einbezug der hohen Komplexität, bedingt durch vielfältige Bewertungsaspekte (Komfort, Energie, Emissionen, ...) im urbanen Raum, aufgezeigt. Die entwickelten Methoden bilden hierfür einen guten Ausgangspunkt, von wo aus weitere Kennzahlen integriert werden können.
- **Echtzeit:** Die kollaborative Arbeitsweise wird durch ein Echtzeitfeedback der Ergebnisse bei Veränderung der Szene unterstützt. Potenziale für die Weiterentwicklung der Berechnungsmethoden für Energiebedarf und Treibhausgaspotenzial hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und Genauigkeit wurden identifiziert (s. Kapitel 5), welche die Quantifizierung von Wechselwirkungen zwischen Innen- und Außenraum unterstützen. Sie dienen dazu, eine schnelle Abschätzung wichtiger Indikatoren zu treffen und diese Erkenntnisse in ganzheitliche Quartiersbewertung einfließen zu lassen.
- **Visualisierung:** Die Visualisierung der Daten mithilfe der CDP stellte sich als Schlüsselaufgabe in der Forschungsarbeit heraus. Die Qualität und Aussagekraft der Darstellung sind relevant, um fundierte Entscheidungen treffen zu können: Sie übernehmen eine Schnittstellenfunktion zwischen den künftigen Nutzer:innen der CDP und den Informationen zu den unterschiedlichen Nachverdichtungsszenarien. Hierfür konnten geeignete Methoden identifiziert und prototypisch implementiert werden. Die webbasierte Desktopanwendung Grafana bietet individuelle Darstellungsmöglichkeiten der gespeicherten Analysedaten und ermöglicht einen nahtlosen Zugriff auf die Datenbank.

### 8.3 Untersuchung von Nachverdichtungsszenarien

In Kapitel 6 wurde ein Fallstudiengebiet vorgestellt und hinsichtlich möglicher Nachverdichtungsszenarien untersucht. Die entwickelten Szenarien wurden anschließend durch Simulation von Außenraum, Energie und Treibhausgasemissionen bewertet. Ziel war neben der Sichtbarmachung von Synergieeffekten und Widersprüchen die Erprobung der im Projekt entwickelten

Simulationskomponenten sowie deren Validierung. Nachfolgende Aufzählung fasst die in Hinblick auf das Fallstudiengebiet gewonnenen Erkenntnisse zusammen:

- **Außenraum:** Sowohl Bäume als auch bauliche Maßnahmen der Nachverdichtung verbessern den thermischen Außenraumkomfort am Tag durch zusätzliche Verschattung. Bestandsbäume leisten hierbei einen hohen Beitrag, daher ist ihr Erhalt zu priorisieren.

Für die Planung von Einzelmaßnahmen wie z.B. Bäumen kann eine lokale Bewertung (beispielsweise in einer Mikroklimauntersuchung) zudem mehr aussagen als Durchschnittswerte. In räumlich aufgelösten Außenraumsimulationen werden Hitzehotspots ersichtlich und die Wirkung von Verschattungsmaßnahmen kann geprüft werden. Beim Vergleich von Quartieren identischer Abmessungen sind Durchschnittswerte durchaus einsetzbar, auch wenn die absoluten Unterschiede gering ausfallen. Demnach eignen sich räumlich aufgelöste Ergebnisse (z.B. Heatmaps) zur Unterstützung des Entwurfsprozesses, wohingegen Durchschnittswerte insbesondere zum Vergleich von Entwürfen eingesetzt werden können.

- **Tageslicht:** Nachverdichtung führt oft zu einer verringerten Tageslichtzufuhr in Innenräumen. Vergleiche mit ähnlichen Siedlungstypen können hier als Anhaltspunkt dienen, um eine Änderung als akzeptabel einzuordnen. Besonders im Fall von Neubauten sollten dabei die Wintermonate überprüft werden, da niedrige Einfallswinkel der Sonnenstrahlung zu weiträumigen Verschattungen führen.
- **Energie:** Neubauten und Grün können der Verschattung von Bestandsgebäuden dienen, bei dem technische Lösungen zur Vermeidung von Kühlbedarf nur mit erhöhtem Aufwand implementierbar sind. In der Gesamtbilanz dominiert auch im künftigen Klima der Heizbedarf. Durch vorteilhafte Platzierung von Gebäuden können hohe Solargewinne diesen verringern und gleichzeitig eine Verschattung des Außenraums bewirken.
- **Innenraumkomfort:** Der Klimawandel wirkt sich unterschiedlich stark auf die betrachteten Nachverdichtungskonzepte aus. Generell tragen gegenseitige Verschattungen der Gebäude sowie Baumpflanzungen zu einer Verbesserung über das Gesamtjahr bei. Dennoch ist mit einer Erhöhung der potenziellen Kühlbedarfe von 20 % bis 50 % zu rechnen. Bestehende Bäume tragen dabei erheblich zur Reduktion von potenziellen Kühlbedarfen und damit der Verbesserung des Innenraumkomforts bei.
- **Treibhausgasemissionen:** Die Sanierung von energetisch unterdurchschnittlich abschneidenden Gebäuden im Zuge von Nachverdichtung kann die absoluten Treibhausgasemissionen auch unter Berücksichtigung der grauen und der betrieblichen Treibhausgasemissionen unter das Ausgangsniveau des Quartiers bringen. Die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb von Bestand und Neubau nehmen in der Fallstudie den größten Anteil an den Gesamttreibhausgasemissionen

ein. Demnach ist im Zuge von Nachverdichtung auch ein Energieträgerwechsel im Bestand hin zu emissionsarmen Technologien zu empfehlen.

- **Zielkonflikte:** Eine für alle betrachteten Aspekte optimale Lösung ist für die Fallstudie nicht identifizierbar. Es können jedoch Faktoren (z.B. Außenraum, Energie, ...) priorisiert und entsprechende Szenarien gewählt werden. Ebenso bieten Vergleichswerte eine Orientierung zu akzeptablen Kompromissen. Kommunen und Eigentümer sollten daher im Vorfeld ein quartiersspezifisches Bewertungsschema erarbeiten, um die relevanten Aspekte zu priorisieren. Dadurch können Lösungen identifiziert werden, die den besten Kompromiss aus Optimierung und der Anforderungserfüllung bieten. In der behandelten Fallstudie wurden Aufstockung und Zeilenschluss in Kombination mit zusätzlicher Begrünung als vorteilhaft nachgewiesen.

#### 8.4 Praxistransfer

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zu den Aktivitäten und Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projekts erfolgt sind, um die Projekthalte der Praxis zu kommunizieren und deren Verstetigung zu unterstützen. Neben diesem Schlussbericht wurden bzw. werden die Projektergebnisse durch folgende Aktivitäten verbreitet:

- Vorträge in Gremien und auf Kongressen  
Neben der Teilnahme an wissenschaftlichen Fachkonferenzen (vgl. Kapitel *Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts*), wurde das Projekt etwa im Arbeitskreis Planen und Bauen des bayerischen Städtetags vorgestellt.
- Zusammenarbeit mit Kommunen / Wohnungsbau  
Durch die Umfragen und Interviews entstand eine Kooperation mit der Stadt Kempten sowie der Vonovia SE, einem Unternehmen der Wohnungswirtschaft. Daraus resultierte ein intensiver Austausch mit der Praxis.
- Leitfaden mit Handlungsempfehlungen für Planer:innen / Kommunen  
Der Leitfaden „*Digitale Planungsmethoden: Leitfaden für Kommunen und Planende*“ fasst in komprimierter Form die Erkenntnisse des Forschungsprojektes zusammen und gibt entsprechende Handlungsempfehlungen. Den genannten Zielgruppen soll er eine Hilfestellung bieten, um relevante Aspekte für Klimaorientierung bei Nachverdichtungsvorhaben zu identifizieren und deren Bewertung frühzeitig evaluieren zu können. Er basiert auf der Grundlage von Recherchen, Workshops und Befragungen im Rahmen des Projektes.

<https://www.zsk.tum.de/zsk/die-teilprojekte-des-zsk/abgeschlossene-projekte/nachverdichtung-im-kontext-des-klimawandels/>





- **Energiemodell (Zielgruppe Eigentümer:innen und Kommunen)**  
Das als eigenständiger Baustein entwickelte Energiemodell wird auch nach Projektabschluss der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt (MIT Open Source Lizenz). Es wurde dazu so aufgearbeitet, dass auch für Personen ohne Programmierkenntnisse eine Anwendung möglich ist. Dadurch können Eigentümer:innen bzw. Kommunen in sehr kurzer Zeit die Auswirkungen zusätzlicher Verschattung oder von Sanierungen auf ihre Gebäude überschlägig untersuchen und so eine Entscheidungsunterstützung erhalten. Nähere Infos finden sich auf der Homepage des Lehrstuhls ENPB oder des ZSK unter dem Teilprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“.

<https://www.cee.ed.tum.de/enpb/methoden-und-tools/quartier-und-stadtsimulation/energym/>



<https://www.zsk.tum.de/zsk/die-teilprojekte-des-zsk/abgeschlossene-projekte/nachverdichtung-im-kontext-des-klimawandels/>



- **Voxelmethode (Start Ups, Entwickler:innen, Forschung)**  
Als weitere eigenständige Auskopplung wurde die Voxelmethode veröffentlicht. Hierbei handelt es sich um eine Open Source Veröffentlichung, welche unter einer MIT – Lizenz zur Verfügung gestellt wird. Dies soll insbesondere die Integration in künftige Planungstools ermöglichen und Entwickler:innen die Möglichkeit geben, auf die erfolgte Projektarbeit aufzubauen. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich auf der Homepage des Lehrstuhls ENPB oder des ZSK unter dem Teilprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“.

<https://www.cee.ed.tum.de/enpb/methoden-und-tools/quartier-und-stadtsimulation/pyvoxel/>



<https://www.zsk.tum.de/zsk/die-teilprojekte-des-zsk/abgeschlossene-projekte/nachverdichtung-im-kontext-des-klimawandels/>



Der Quellcode kann direkt unter folgender Adresse eingesehen werden:

<https://gitlab.lrz.de/tum-enpb/pyvoxel>



## 9 Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die erkannten Forschungslücken und Entwicklungspotenziale gegliedert nach Themenfeldern dargelegt.

### *Planungstools in Bürger:innenbeteiligung*

Die Ergebnisse der Szenarien, die von Planenden mithilfe der entwickelten Methoden erzeugt werden, können in einem separaten Schritt weiteren Beteiligten zur Verfügung gestellt werden. So könnten die Belange der Zivilgesellschaft in das Tool integriert werden, indem positive Nachverdichtungseffekte für Beteiligte stärker hervorgehoben werden. Entscheidend ist dabei jedoch eine gute Vermittlung der Ergebnisse und eine professionelle Einbindung in Kommunikationsprozesse. Dadurch sollen Missverständnisse vermieden, Potenziale aufgezeigt und mehr Transparenz in den Entscheidungsprozessen erzeugt werden. Dies geht einher mit der Darlegung akzeptabler Werte für die betrachteten Zielgrößen, z.B. maximal zulässige Werte für den thermischen Komfort im Außenraum, welche nachvollziehbar ermittelt und dargestellt werden sollten.

Wie diese Kommunikationsprozesse mit der Zivilgesellschaft detailliert aussehen können, sollte in weiteren Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit mit Expert:innen aus Soziologie, Stadtplanung wie auch mit Praxispartner:innen für Kommunikations- und Beteiligungsprozesse untersucht werden. Ebenso sollten nach Abschluss des laufenden Projekts die Potenziale des Tools für den direkten Einsatz in (informellen) Bürger:innenbeteiligungsverfahren mit einem spezifisch angepassten Forschungsdesign untersucht werden. Dies betrifft unter anderem soziokulturelle (Messgrößen, Aufenthaltsqualitäten, etc.), ästhetisch-psychologische (Visualisierung, Informationsdichte, etc.) sowie ökonomische Aspekte (Energiekostensparnis, Produktivität, etc.).

### *Weiterentwicklung der Simulationsmethoden*

Die entwickelten Simulationsmethoden für Außen- und Innenraum (Voxelmethode, Energiemodell) bieten die Möglichkeit zur schnellen Evaluation von Szenarien. Ihr Einsatz könnte daher über die Untersuchung manuell entworfener Szenarien hinausgehen und sich auch in automatisierten Verfahren als nützlich erweisen. Hierfür kommen insbesondere Optimierungsalgorithmen oder parametrische Herangehensweisen in Betracht, welche eine hohe Iterationszahl erfordern und daher auf wenig rechenintensive Modelle mit kurzen Laufzeiten angewiesen sind.

Beide Simulationsmethoden haben in ersten Validierungen gute Ergebnisse gezeigt, welche für die Anwendung im Rahmen dieses Projekts als hinreichend angesehen wurden. Hier besteht allerdings ein großes Entwicklungspotenzial, um die Validität in verschiedenen Detaillierungsgraden und Anwendungsfeldern nachzuweisen.

Neben der weiteren Validierung besteht die Möglichkeit zur Anwendung der Voxelmethode auf zusätzliche Anwendungsfelder, wie es im Beispiel der Evapotranspiration (s. Kapitel 5.1.2) beschrieben wurde. In künftiger Forschung wäre

die Eignung für weitere urbane Effekte wie beispielsweise Windgeschwindigkeiten zu prüfen. Auch hinsichtlich des entwickelten Energiemodells bestehen Potenziale. Hier sollte die Eignung von Transfer Learning Methoden überprüft werden, um den hohen Aufwand zur Übertragung des Energiemodells auf weitere Standorte und Klimaszenarien zu verringern. Beide Entwicklungspotenziale werden durch die Open Source Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts unterstützt (s. Kapitel 8.4).

Neben der Weiterentwicklung der genannten Methoden für Energie, Außenraum und Ökobilanz besteht auch in der Entwicklung zusätzlicher Simulationsbausteine großes Potenzial. Mit den geschaffenen Datengrundlagen und Schnittstellen könnten Methoden zur Bewertung weiterer Aspekte des urbanen Raums wie beispielsweise Regenwassermanagement, Biodiversität oder Freiraumversorgung auf dem Prototyp integriert werden.

### *Untersuchung von Wechselwirkungen in der gebauten Umwelt*

Bei den durchgeführten Analysen wurden die vorherrschenden Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und Außenraum deutlich. Dabei ist neben der detaillierten Analyse (z.B. Wirkung von Vegetation auf den Energiebedarf von Gebäuden und gleichzeitige Verschattung von Hitzehotspots) ein systematisches Verständnis der gebauten Umwelt, insbesondere im Bestand, notwendig. Dadurch können nicht unmittelbar erkennbare Zusammenhänge aufgezeigt und synergetische Effekte erzielt werden. Dies umfasst auf der Seite von Sanierungsmaßnahmen beispielsweise deren gegenseitige Unterstützung, wodurch Ergebnisse über das Maß der Einzelergebnisse hinaus möglich werden, etwa bei der Umstellung von Primärenergieträgern und gleichzeitiger Sanierung der thermischen Hülle. Daneben sollten auch multikriterielle Untersuchungen einfließen, um positive wie negative Auswirkungen (z.B. Verbesserung des Außenraumkomforts durch Verschattung bei gleichzeitiger Erhöhung des Heizwärmebedarfs) früh im Planungsprozess sichtbar zu machen. Eine weitergehende Definition und Quantifizierung dieser Effekte, sowie ihre Rückführung auf Eigenschaften von Quartieren würde das Erkennen von Potenzialflächen auf Stadtebene unterstützen und wurde im Zuge der Abschlussveranstaltung des Projekts mehrfach angeregt.

Die laufende Weiterentwicklung von Tools und Methoden erlaubt zudem eine immer umfassendere Integration der Wechselwirkungen zwischen Innen- und Außenraum im Zuge der Quartierssimulation. So wurde beispielsweise ein Update für den Urban Weather Generator konzipiert, welches validere Voraussagen zum urbanen Wärmeinseleffekt liefert und zudem die detailliertere Berücksichtigung blauer Infrastruktur ermöglicht (Xu et al., 2022). Die zugehörigen Programmcodes wurden noch nicht veröffentlicht, die Entwicklung zeigt aber das hohe Potenzial zur Integration von Wechselwirkungen im urbanen Raum durch die Weiterentwicklung bestehender Methoden.

### *Integration in die Planungspraxis*

Darüber hinaus zeigt sich Forschungsbedarf, inwieweit die Methodik des Tools parallel in andere Anwendungsfelder ausgeweitet werden kann, beispielsweise in die Arbeitsumgebung von Planungsbüros. Es ist denkbar, dass die entwickelten Methoden von externen Dienstleister:innen im Produktportfolio, lokal oder als Cloudanwendung, integriert werden. Dabei könnten mittels Cloudanwendungen Software, Hardware, Datenbanken und Analysen über das Internet bereitgestellt und eine flexible Nutzung und das Teilen rechenintensiver Ressourcen, ohne Verwaltungs-, Wartungs- und Sicherheitsaufwand ermöglicht werden. Schließlich gilt es, insbesondere Kommunen beim Aufbau und der Umsetzung dieser digitalen Planungsinfrastruktur und -kultur zu unterstützen und diese auch einzufordern.

## Literaturverzeichnis

- Arts, B.; Leroy, P.; van Tatenhove, J. (2006): Political Modernisation and Policy Arrangements: A Framework for Understanding Environmental Policy Change. In *Public Organiz Rev* 6 (2), pp. 93–106. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11115-006-0001-4>
- Asdrubali, F. (2009): The role of Life Cycle Assessment (LCA) in the design of sustainable buildings: thermal and sound insulating materials. Proceedings EURONOISE 2009 (Edinburgh).
- Bachinger, J.; Nusser, B. (2018): Planungshilfe Flachdach - Leitfaden. Wien: Holzforschung Austria.
- Baeza, J. L. (2021): CityScope Platform for Real-Time Analysis and Decision-Support in Urban Design Competitions. DOI: <https://doi.org/10.4018/IJEPR.20211001.0a8>
- Banihashemi, F., Reitberger, R., & Lang, W. (2022): 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 (CAADRIA) 2022(2), 679–688. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.679>
- Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr (2022): Bayerische Bauordnung und Vollzugshinweise. Online verfügbar unter <https://www.stmb.bayern.de/buw/baurechtundtechnik/bauordnungsrecht/bauordnungundvollzug/index.php>
- Beckmann, S. K.; Hiete, M.; Beck, C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments—Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. In *Climate Risk Management* 32, p. 100286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- Belcher, S.; Hacker, J.; Powell, D.S. (2005): Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*. DOI: <https://doi.org/26.10.1191/0143624405bt112oa>
- Billinghurst, M.; Kato, H. (1999): Collaborative Mixed Reality. IN Proceedings of the First International Symposium on Mixed Reality (ISMR'99). *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*, pp. 261-284. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-87512-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-87512-0_15)
- Błażejczyk, K.; Broede, Peter; Fiala, D.; Havenith, G.; Holmér, I.; Jendritzky, G. et al. (2010): Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. In: *Miscellanea*

Geographica 14 (1), S. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>

- Böhm, J.; Böhme, C.; Bunzel, A.; Kühnau, C.; Landua, D.; Reinke, M. (2016): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben "Entwicklung von naturschutzfachlichen Zielen und Orientierungswerten für die planerische Umsetzung der doppelten Innenentwicklung sowie als Grundlage für ein entsprechendes Flächenmanagement" (FKZ 3513 82 0500). Bundesamt für Naturschutz. Bonn-Bad Godesberg (BfN-Skripten, 444).
- Braune, A.; Ekhvaia, L.; Quante, K. (2021): Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion. Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden. Hg. v. German Sustainable Building Council (DGNB). DGNB. Stuttgart.
- Bröde, P., Di Napoli, C., Rosa, L.A., da Cunha, E.G., Krüger, E.L. (2021): Sensitivity of UTCI Thermal Comfort Prediction to Personal and Situational Factors—Residual Analysis of Pedestrian Survey Data. In: Krüger, E.L. (eds) Applications of the Universal Thermal Climate Index UTCI in Biometeorology. Biometeorology, vol 4. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76716-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76716-7_4)
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K. et al. (2012): Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). Int J Biometeorol 56, 481–494, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Bruse, M.; Fler, H. (1998): Simulating surfaceplant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software, 13(3/4), 373–384, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Buchin, O.; Hoelscher, M.-T.; Meier, F.; Nehls, T.; Ziegler, F. (2016): Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. In Energy and Buildings 114, pp. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.038>
- Bueno, B. Norford, L. K.; Hidalgo, J.; Pigeon, G. (2012): The urban weather generator, Journal of Building Performance Simulation, 6:4, 269-281, DOI: <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2020): Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. Bonn (BBSR-Online-Publikation).

- Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Ed.) (2014): Städtebauliche Nachverdichtung im Klimawandel. 46/1 (ExWoSt-Informationen).
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2021): eLCA v0.9.7 beta. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bauteileditor.de/>
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (2021): ÖKOBAUDAT. Online verfügbar unter: <https://www.oekobaudat.de/>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). (2020): Dünger, ProBas: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme. Umweltbundesamt.
- Bundesregierung (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/die-deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-318846>
- Buratti, C.; Barbanera, M.; Testarmata, F.; Fantozzi, F. (2015): Life Cycle Assessment of organic waste management strategies: an Italian case study. In: Journal of Cleaner Production 89, S. 125–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.012>
- Cascone, S.; Catania, F.; Gagliano, A.; Sciuto, G. (2018): A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. In: Building and Environment 136, S. 227–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>
- Climate Service Center Germany (GERICS) (2021): Klimawandel und Starkregen. Online abrufbar unter: <https://www.klimanavigator.eu/themenportal/100183/index.php>
- Cremers, J. (Hg.) (2015): Atlas Gebäudeöffnungen – Fenster Lüftungselemente Außentüren. München: Detail. Online verfügbar unter [https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/flachdach/Leitfaden\\_zur\\_Anwendung\\_Planungshilfe\\_Flachdach.pdf](https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/flachdach/Leitfaden_zur_Anwendung_Planungshilfe_Flachdach.pdf)



- Day, T., Franklin, B., Fry, M., Holmes, Michael, Johnston, Tony, Mansfield, J., Wood, D., & Davies, H. (2006): TM41 Degree days: Theory and application. London. CIBSE.
- Deilami, K.; Kamruzzaman, M.; Liu, Y. (2018): Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. In International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 67, pp. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- dena. (2021): Dena Gebäudereport 2022: Zahlen, Daten, Fakten. Berlin. Deutsche Energie-Agentur.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012-10): Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode (Norm DIN EN 15978:2012-10). Berlin. Beuth Verlag.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018-09): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten (Vornorm DIN V 18599-10). Berlin. Beuth Verlag.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2021-09): Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität; Deutsche und Englische Fassung prEN (DIN EN 15978-1:2021-09-Entwurf). Berlin. Beuth Verlag.
- Emmanuel, R.; Steemers, K. (2018): Connecting the realms of urban form, density and microclimate. In Building Research & Information 46 (8), pp. 804–808. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1507078>
- Erell, E. (2017): Urban Greening and Microclimate Modification. In Puay Yok Tan, Chi Yung Jim (Eds.): Greening Cities. Singapore: Springer Singapore, pp. 73–94.
- Erlwein, S., Wamsler, C., Meister, J. & Pauleit, S. (in re-review): Governance of densification and climate change adaptation: How to solve conflicting demands for densification and greening in cities? Land Use Policy
- Erlwein, S., Zölch, T. and Pauleit, S. (2021): Regulating the microclimate with urban green in densifying cities: joint assessment on two scales. In Building and Environment 205, 108233, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108233>

- Erlwein, S.; Pauleit, S. (2021): Trade-Offs between Urban Green Space and Densification: Balancing Outdoor Thermal Comfort, Mobility, and Housing Demand. In: UP 6 (1), S. 5–19. DOI: 10.17645/up.v6i1.3481.
- Everding, D. (2017): Energetische Potenziale und klimatische Grenzen der Nachverdichtung städtischer Quartiere am Beispiel der Region FrankfurtRheinMain.
- Fath, M.; Storck, M.; Kurzer, C.; Willmy, S.; Schridde, J.; Sieder, M. et al. (2019): „Leitlinie zur Vereinfachung der Planung und Durchführung von Aufstockungs- / Erweiterungsmaßnahmen als Nachverdichtungsmaßnahme in innerstädtischen Bereichen. Hg. v. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Braunschweig.
- FLL (2018): Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. Bonn.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2018): Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen.
- Gabriel, M.; Fellner, J.; Reitberger, R.; Lang, W.; Petzold, F. (2021): Voxel based method for real-time calculation of urban shading studies. In: SimAUD 2021 - HUMAN +
- Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728) (2020): Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf> 13886.
- Geletič, J., Lehnert, M., Resler, J., Krč, P., Middel, A., Krayenhoff, E. S., & Krüger, E. (2022): 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, 109484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109484>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M. & Andresen, J. A. (2009): Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science & Technology*, 43(19), 7564–7570. DOI: <https://doi.org/10.1021/es901539x>
- Giebeler, G.; Fisch, R.; Krause, H.; Musso, F.; Petzinka, K.-H.; Rudolphi, A. (2008): Atlas Sanierung – Instandsetzung Umbau Ergänzung. Basel: Birkhäuser.
- Grudin, J. (1988): Why CSCW applications fail: Problems in the design and evaluation of organizational interfaces. In Proceedings of CSCW '88, Portland, Oregon, New York: ACM Press, pp. 85-93.

- HafenCity Universität Hamburg (2022): Blue Green Streets, <https://www.hcu-hamburg.de/research/forschungsgruppen/reap/reap-projekte/bluegreenstreets/>
- Hafner, A.; Storck, M. (2019): Life Cycle Analysis of Vertical Building Extensions – Environmental Impacts of Different Material Selection. In: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 290, S. 12046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012046>.
- Hansen, R.; Born, D.; Lindschulte, K.; Rolf, W.; Schröder, A.; Becker, C. et al. (2018): Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung. Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben "Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung" (FKZ 3515 82 0800). Deutschland. Bonn - Bad Godesberg (BfN-Skripten, 503)
- Harlan, S. L.; Ruddell, D. M. (2011): Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. In Current Opinion in Environmental Sustainability 3 (3), pp. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.01.001>
- Harter, H. (2021): Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle, Dissertation. Technische Universität München, München.
- Hemsath, T. L.; Bandhosseini, K. A. (2015): Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use. In: Renewable Energy 76, S. 526–538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.044>
- Holzforschung Austria (2021): dataholz.eu. Wien: Holzforschung Austria. Online verfügbar unter <https://www.dataholz.eu/>
- Informationszentrum Beton (Hg) (2021): Planungsatlas Hochbau. Online verfügbar unter <https://planungsatlas-hochbau.de/>
- Ingram, D. L. (2012): Life cycle assessment of a field-grown red maple tree to estimate its carbon footprint components. In: Int J Life Cycle Assess 17 (4), S. 453–462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0398-7>
- Ingram, D. L. (2013): Life Cycle Assessment to Study the Carbon Footprint of System Components for Colorado Blue Spruce Field Production and Use, Journal of the American Society for Horticultural Science J. Amer. Soc. Hort. Sci., 138(1), 3-11. Online verfügbar unter <https://journals.ashs.org/jashs/view/journals/jashs/138/1/article-p3.xml>

- Kalisch, C. (2021): Untersuchung von Stadtgrün. Eine ökologische Lebenszyklusanalyse von Dach- und Außenraumbegrünung. Bachelorarbeit. Technische Universität München.
- Karunaratne, S., Dharmarathna, D. (2022): A review of comprehensiveness, user-friendliness, and contribution for sustainable design of whole building environmental life cycle assessment software tools. *Building and Environment*(212), Article 108784.
- Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2017): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. München: Detail.
- Kendall, A.; McPherson, E. G. (2012): A life cycle greenhouse gas inventory of a tree production system. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (4), S. 444–452. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0339-x>
- KfW (2021a): Energieeffizient Bauen - Für den Bau oder Kauf eines neuen KfW-Effizienzhauses - 153 Kredit. Frankfurt: KfW. Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-%28153%29/>
- KfW (2021b): Energieeffizient Sanieren - Für die komplette Sanierung oder für einzelne energetische Maßnahmen - 151, 152 Kredit. Frankfurt: KfW. Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-%28153%29/>
- KfW (2021c): Infoblatt Energieeffizient Bauen und Sanieren - Wohngebäude - Liste der Technischen FAQ - Wohngebäude - 151/152/430/153 Kredit, Zuschuss. Frankfurt: KfW. Online verfügbar unter [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-%28Inlandsf%C3%B6rderung%29/PDF-Dokumente/6000004242\\_Info\\_Techn\\_FAQ\\_151-152-153-430.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-%28Inlandsf%C3%B6rderung%29/PDF-Dokumente/6000004242_Info_Techn_FAQ_151-152-153-430.pdf).
- Konarska, Janina; Holmer, Björn; Lindberg, Fredrik; Thorsson, Sofia (2016): Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. In *Int. J. Climatol.* 36 (5), pp. 2379–2395. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4502>
- König, H. (2017): Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- König, U. (2020): Das neue Gebäudeenergiegesetz GEG - Herbstveranstaltung der EnBW Energiegemeinschaft e. V. 9. Dezember 2020. Stuttgart: Energieberatungszentrum Stuttgart e. V. Online verfügbar unter <https://enbw-eg.de/wp-content/uploads/2021/07/02-GEG-091220-16-9-1.pdf>

- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kühner, E. (2022): Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen – Quantifizierung der THG-Emissionen am Beispiel eines Entwurfs für die Aufstockung von Mehrfamilienhäusern. Masterarbeit, TU München.
- Larson, K., Alonso Pastor L. A., Zhang Y., Grignard A., Noyman A., Sakai Y., Doorley R., Elkastsha M. (MIT Media Lab, Hrsg.). (2018): CityScope: A Data-Driven Interactive Simulation Tool for Urban Design. Use Case Volpe. Online verfügbar unter <https://www.media.mit.edu/publications/cityscope-a-data-driven-interactive-simulation-tool-for-urban-design-use-case-volpe/>
- Lehmann, S. (2017): Sustainable urbanism: towards a framework for quality and optimal density? In: Future Cities and Environment 2 (0), S. 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40984-016-0021-3>
- Lieven, C. (2017): DIPAS – Towards an integrated GIS-based system for civic participation. International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, KES2017, 6-8 September 2017, Marseille, France
- Lobaccaro, G.; Acero, J. A.; Martinez, G. S.; Padro, A.; Laburu, T.; Fernandez, G. (2019): Effects of Orientations, Aspect Ratios, Pavement Materials and Vegetation Elements on Thermal Stress inside Typical Urban Canyons. In International journal of environmental research and public health 16 (19). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16193574>
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015): 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". 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. Online verfügbar unter [http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE\\_TABULA\\_TypologyBrochure\\_IWU.pdf](http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf)
- Longo, S.; Montana, F.; & Riva Sanseverino, E. (2019): A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. In: Sustainable Cities and Society, 45, 87–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.027>

- LSML (Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung (LSML), Hrsg.). (2021): Grüne Stadt der Zukunft - Publikationen. Zugriff am 07.12.2021. Online verfügbar unter <https://www3.ls.tum.de/lapl/forschung/gruene-stadt-der-zukunft/publikationen/>
- Martynova, M.; Sultanova, R.; Odintsov, G.; Sazgutdinova, R.; Khanova, E. (2020): Growth of *Tilia cordata* Mill. in Urban Forests. In: South-East European Forestry SEEFOR 11 (1), S. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.20-04>
- Matzarakis, A.; Muthers, S., & Rutz, F. (2015): Application and comparison of UTCI and PET in temperate climate conditions. *Finisterra*, 49(98). DOI: <https://doi.org/10.18055/Finis6453>
- McKay, M. D.; Beckman, R. J.; Conover, W. J. (1979): A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21 (2), 239-245. <https://doi.org/10.2307/1268522>
- Meteonorm, Remund, J.; Müller, S.; Schmutz, M.; Graf, P.; Barsotti, D.; Cattin, R. (2020): *Meteonorm. Handbook part I: Software*. Hg. v. Meteotest AG. Meteotest AG. Bern.
- Monterusso, M.; Rowe A., Bradley D.; Clayton, R. L. (2005): Establishment and Persistence of *Sedum* spp. and Native Taxa for Green Roof Applications. In: *HortScience*.
- Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. (2015): Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 14 (4), S. 1110–1121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.10.005>
- Moser-Reischl, A.; Rahman, M. A.; Pauleit, S.; Pretzsch, H.; Rötzer, T. (2019): Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species. In *Landscape and Urban Planning* 183, pp. 88–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.11.004>
- Naboni, E.; Meloni, M.; Coccolo, S.; Kaempf, J.; Scartezzini, J. (2017): An overview of simulation tools for predicting the mean radiant temperature in an outdoor space. In: *CISBAT 2017 International Conference*, S. 1111–1116, zuletzt geprüft am 05.08.2020.

Norm DIN EN 15978:2012-10, 2012-10: DIN EN 15978 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode

Norton, B. A.; Coutts, A. M.; Livesley, S. J.; Harris, R. J.; Hunter, A. M.; Williams, N. S.G. (2015): Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. In *Landscape and Urban Planning* 134, pp. 127–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>

Nowak, D. J.; Stevens, J.; Sisinni, S.; Luley, C. (2002): Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. In: *Journal of Arboriculture* 2002 (3), S. 113–122.

Onomura, Shiho; Holmer, Björn; Lindberg, Fredrik; Thorsson, Sofia (2016): Intra-urban nocturnal cooling rates: development and evaluation of the NOCRA model. In *Met. Apps* 23 (3), pp. 339–352. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.1558>

Otto, A.; Kern, K.; Haupt, W.; Eckersley, P.; Thieken, A. H. (2021): Ranking local climate policy: assessing the mitigation and adaptation activities of 104 German cities. In *Climatic Change* 167 (1-2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03142-9>

Pan, J., & Jakubiec, J. A. (2022): Simulating the Impact of Deciduous Trees on Energy, Daylight, and Visual Comfort: Impact Analysis and a Practical Framework for Implementation. *Proceedings of ESim 2022 in Ottawa*.

Pérez, G.; Coma, J.; Martorell, I.; Cabeza, L. F. (2014): Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, pp. 139–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>

Petzold, F.; Schubert, G.; Bratoev, I.; Fellner, J.; Förster, N. (2022): Crowd Safety: Interaktive Entwurfsplanung unter Berücksichtigung von Personenströmen und deren Sicherheitsaspekten. *BBSR-Online-Publikation* 16/2022, Bonn, Mai 2022.

Pfeifer, G.; Ramcke, R.; Achtziger, J.; Zilch, K. (2001): *Mauerwerk Atlas*. München: Detail.

Petzold, F.; Auer, T. (2017): Simulationsgestützte Entwurfsplanung im städtebaulichen Kontext unter Berücksichtigung energetischer und raumklimatischer Aspekte. *ZukunftBau (BBSR)*.

Rahman, M. A.; Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. (2017): Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting

- street canyons in Munich, Germany. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 232, S. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.006>
- Reitberger, R., Banihashemi, F., & Lang, W. (2022): 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) 2022(2)*, 629–638. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.679>
- Röck, M.; Saade, M. Ruschi M.; Balouktsi, M.; Rasmussen, F. N.; Birgisdottir, H.; Frischknecht, R. et al. (2019): Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. In: *Applied Energy* 258, S. 114107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Rosenberger, L., Leandro, J., Pauleit, S., & Erlwein, S. (2021): Sustainable stormwater management under the impact of climate change and urban densification. *Journal of Hydrology*, 596, 126137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126137>
- Rötzer, T.; Moser, A.; Strachwitz, M. von; Pretzsch, H. (2018): Stadtbäume im Klimawandel. Wuchsverhalten, Umweltleistungen und Perspektiven. Tabellenwerk und Abbildungssammlung. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München. München.
- Rötzer, T.; Rahman, M. A.; Moser-Reischl, A.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. (2019): Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. In: *The Science of the total environment* 676, S. 651–664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235>
- Roudsari, M. S., & Pak, M. (2013): 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*, 3128–3135.
- Sakret Trockenbaustoffe Europa (2021): Wärmedämmverbundsysteme - Konstruktionsdetails. Online verfügbar unter <https://www.sakret.de/de/kompetenz/konstruktionsdetails/warmeverbund-systeme>
- Salata, F., Falasca, S., Ciancio, V., Curci, G., Grifgnaffini, S., & de Wilde, P. (2021): Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study. *Sustainable Cities and Society*, Article 103518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103518>



- Saphörster, O. (2008): Neue Qualitäten für den Außenraum von 50er Jahre Zeilensiedlungen. - zwischen gestalterischen, umweltpolitischen und wohnungswirtschaftlichen Herausforderungen. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Schneider-Marín, P.; Harter, H.; Tkachuk, K.; Lang, W. (2020): Uncertainty Analysis of Embedded Energy and Greenhouse Gas Emissions Using BIM in Early Design Stages. In: Sustainability 12 (7), S. 2633. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12072633>
- Schubert, G. (2014): Interaktionsformen für das digitale Entwerfen. Konzeption und Umsetzung einer rechnergestützten Entwurfsplattform für die städtebaulichen Phasen in der Architektur. Dissertation. Technische Universität München, München. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1207655>
- Simon, H.; Linden, J.; Hoffmann, D.; Braun, P.; Bruse, M.; & Esper, J. (2018): Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees: A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. Landscape and Urban Planning, 174, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.003>
- Strohbach, M. W.; Arnold, E.; Haase, D. (2012): The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach. In: Landscape and Urban Planning 104 (2), S. 220–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.013>
- Strohmeier, S.: CONSUL Open Software für Bürgerbeteiligung. [https://consulproject.org/docs/consul\\_dossier\\_deutsch.pdf](https://consulproject.org/docs/consul_dossier_deutsch.pdf)
- Sundling, R.; Blomsterberg, Å.; Landin, A. (2019): Enabling energy-efficient renovation: the case of vertical extension to buildings. In: CI 19 (1), S. 2–14. DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-04-2018-0034>
- Susca, T. (2019): 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, 106273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106273>
- Tams, L.; Nehls, T.; Calheiros, C. S. C. (2022): Rethinking green roofs- natural and recycled materials improve their carbon footprint. In: Building and Environment 219, S. 109122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109122>
- Tichelmann, K.; Groß, K.; Günther, M. (2016): Wohnraumpotentiale durch Aufstockungen. Deutschlandstudie 2015. Darmstadt.

- Ubakus (2021): Ubakus U-Wert-Rechner. Online verfügbar unter <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/>
- Umweltbundesamt (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Climate Change 10/2011. Dessau-Roßlau. Ecofys Germany GmbH.
- Umweltbundesamt (2018): Umwelt- und Aufenthaltsqualität in kompakt-urbanen und nutzungsgemischten Stadtstrukturen. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- Upmanis, H.; Eliasson, I.; Lindqvist, S. (1998): The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). In Int. J. Climatol. 18 (6), pp. 681–700.
- Verbraucherzentrale (2020): GEG: Was steht im neuen Gebäudeenergiegesetz? Online verfügbar unter <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/energetische-sanierung/geg-was-steht-im-neuen-gebaeudeenergiegesetz-13886>.
- Waibel, C., Bystricka, L., Kubilay, A., Evins, R., & Carmeliet, J. (2017): Validation of Grasshopper-based Fast Fluid Dynamics for Air Flow around Buildings in Early Design Stage. Proceedings of the 15th IBPSA Conference (San Francisco).
- Zankel, F. (2013): Die Zeile der 50er. Vitalisierung einer 50er Jahre Siedlung. Technische Universität Graz Erzherzog-Hohann Universität.
- Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) (2017): Teilprojekt 1: Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt: Abschlussbericht. Online verfügbar unter: [https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Berichte/ZSK\\_TP1\\_Schlussbericht\\_20170731\\_mitUnterschriften\\_aktJan18.pdf](https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Berichte/ZSK_TP1_Schlussbericht_20170731_mitUnterschriften_aktJan18.pdf)
- Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) (2017b): Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (Technische Universität München & Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung, Hrsg.). Online verfügbar unter: [https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Leitfaeden/ZSK-TP1\\_Leitfaden\\_deutsch\\_komprimiert.pdf](https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Leitfaeden/ZSK-TP1_Leitfaden_deutsch_komprimiert.pdf)
- Zhao, D.; Lei, Q.; Shi, Y.; Wnag, M.; Chen, S.; Shah, K.; Ji, W. (2020): Role of Species and Planting Configuration on Transpiration and Microclimate for Urban Trees. Forests 2020, 11 (8), 825. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080825>

- ZinCo (2020): Nürtingen: Planungshilfe - Systeme für begrünte Schrägdächer. ZinCo. Online verfügbar unter [https://www.zinco.de/sites/default/files/2020-08/ZinCo\\_Schraegdachbegruenung.pdf](https://www.zinco.de/sites/default/files/2020-08/ZinCo_Schraegdachbegruenung.pdf)
- Zölch, T.; Maderspacher, J.; Wamsler, C.; Pauleit, S. (2016): Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. In *Urban Forestry & Urban Greening* 20, pp. 305–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>
- Zölch, T.; Rahman, M. A.; Pfeleiderer, E.; Wagner, G.; Pauleit, S. (2019): Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort. In *Building and Environment* 149, pp. 640–654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.051>

## Abkürzungsverzeichnis

AnDeKaT	Ansprenger-, Degenfeld- und Karl-Theodor-Straße
AP	Arbeitspaket
BAK	Baualtersklassen
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BayBO	Bayrische Bauordnung
BGF	Brutto Geschossfläche
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CDP	Collaborative Design Platform
CFD	Computer Fluid Dynamic
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> -eq.	CO <sub>2</sub> -Equivalent
COP	Coefficient of Performance – Arbeitszahl (von Wärmepumpen)
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DL	Deep Learning
ENPB	Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
FFD	Fast Fluid Dynamics
GEWOFAG	GEWOFAG Holding GmbH (ehem.: Gemeinnützige Wohnungsfürsorge AG)
GWG	GWG Städtische Wohnungsgesellschaft München mbH
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISEK	Integriertes Städtebauliches Entwicklungskonzept
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse
LCC	Life Cycle Costing, Lebenszykluskostenanalyse
LfU	Landesamt für Umwelt
LS	Lehrstuhl
LSML	Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung
MGS	Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung mbH
MIT	Massachusetts Institute of Technology

ML	Machine Learning
MRT	Mean Radiant Temperature
NRF	Nutzbare Grundfläche eines Gebäude
OSM	Open Street Maps
RCP	Representative Concentration Pathways
RMSE	Root Mean Square Error
SMLE	Strategie und Management der Landschaftsentwicklung
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
TABULA	Typology Approach for Building Stock Energy Assessment
TGA	Technischen Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgas
TMY	Typical Meteorological Year
TP	Teilprojekt
TUM	Technische Universität München
UHI	Urban-Heat-Island-Effekt, Wärmeinseleffekt
UTCI	Universal Thermal Climate Index
UWG	Urban Weather Generator
WWR	Window to Wall Ratio (Fensterflächenanteil)
ZSK	Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

## Glossar

<b>Akteur:innen</b>	An einem Projekt beteiligte Personen.
<b>C#</b>	Eine objektorientierte, plattformunabhängige Programmiersprache.
<b>C++</b>	Effiziente und maschinennahe Weiterentwicklung der Programmiersprache C.
<b>Collaborative Design Platform (CDP)</b>	Ein Prototyp einer kollaborativen Entwurfsplattform für kreative Entwurfsphasen, um digitale und analoge Inhalte zu verknüpfen.
<b>Computer Fluid Dynamics (CFD)</b>	Computergestützte numerische Strömungssimulation.
<b>Deep Learning</b>	Deep Learning ist ein Teilbereich des maschinellen Lernens, der es Computeralgorithmen ermöglicht, durch mehrere Schichten künstlicher neuronaler Netze zu lernen.
<b>eLCA</b>	Ökobilanzierungstool des Bundes.
<b>Evapotranspiration</b>	Verdunstungskühlung
<b>Fast Fluid Dynamics (FFD)</b>	Methode zur schnellen Strömungssimulation, wodurch Kompromisse hinsichtlich der Genauigkeit eingegangen werden müssen.
<b>Grafana</b>	Webbasiertes Dashboard für Visualisierungen
<b>Graue Emissionen</b>	(Treibhausgas-)Emissionen, die aus der Herstellung, dem Austausch sowie dem Rückbau der Baukonstruktion resultieren.
<b>Latin Hypercube Sampling</b>	Latin Hypercube Sampling (LHS) wird verwendet, um eine nahezu zufällige Stichprobe von Parameterwerten aus einer mehrdimensionalen Verteilung zu erzeugen.
<b>Machine Learning</b>	Maschinelles Lernen ist eine Disziplin der künstlichen Intelligenz, die es Computeralgorithmen ermöglicht, aus Daten zu lernen und präzise Vorhersagen zu treffen.
<b>Mean Radiant Temperature (MRT)</b>	Die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) ist ein Maß für die mittlere Temperatur der Oberflächen, die einen bestimmten Punkt umgeben, mit denen er Wärmestrahlung austauscht.
<b>Monatsbilanzverfahren (DIN 4108)</b>	Anforderungen an den Wärmeschutz sind in der DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden und der Energieeinsparverordnung (EnEV) formuliert.
<b>Nutzer:innen</b>	Anwender:innen von Computerprogrammen oder der Collaborative Design Platform (CDP).

<b>Plug-In</b>	Erweiterung einer Computersoftware.
<b>Potenzieller Kühlbedarf</b>	Da Wohngebäude in Deutschland nur selten mit einer aktiven Kühlung ausgestattet sind, entsteht ein potenzieller Kühlbedarf. Dieser ist mit Kennzahlen zum Innenraumkomfort vergleichbar und korreliert beispielsweise in der Regel mit den Übergradtemperaturstunden.
<b>Qt</b>	Softwareprodukt des Unternehmens „The Qt Company“ und „Digia“ Anwendungsframework zur plattformübergreifenden Entwicklung von grafischen Benutzeroberflächen und Programmen.
<b>Root Mean Square Error (RMSE)</b>	Der RMSE gibt die Differenz zwischen simulierten und erwarteten Werten wieder. Seine Einheit ist identisch zu den untersuchten Werten. Für eine gute Übereinstimmung sollte der RMSE möglichst gering ausfallen.
<b>Semantische Informationen</b>	Zusätzliche Informationen eines 3D-Modells, um weitere Merkmale des Objekts zu beschreiben.
<b>Sensitivitätsanalyse</b>	Untersuchung der Auswirkung von Unsicherheiten in den Eingangswerten auf die Unsicherheiten (Schwankungen) der Ausgangswerte.
<b>Sequestration</b>	Bindung und Speicherung von CO <sub>2</sub> aus der Luft.
<b>Testreferenzjahr</b>	Testreferenzjahre sind typische Jahresverläufe für Wetterdaten. Sie bilden kein konkretes Jahr ab sondern stellen vielmehr einen typischerweise zu erwartenden Jahresverlauf der Witterungsverhältnisse dar.
<b>Übergradtemperaturstunde</b>	Kumulierte Stunden pro Jahr, in denen die Innentemperatur einen Grenzwert überschreitet. Gewichtet mit der Differenz der Grenzwertüberschreitung.
<b>Universal Thermal Climate Index (UTCI)</b>	Der Universal Thermal Climate Index gibt unter Einbezug von Windgeschwindigkeit, Einstrahlung, Temperatur und Luftfeuchte eine empfundene Vergleichstemperatur an. Diese kann dem physiologischen Empfinden (z.B. extremer Kältestress - extremer Hitzestress) zugeordnet werden.
<b>Urbaner Wärmeinseleffekt (Urban Heat Island, UHI)</b>	Der urbane Wärmeinseleffekt bezeichnet die relative Erwärmung einer Stadt im Vergleich zu den umliegenden ländlichen Gebieten. Er hängt mit Veränderungen der Kubatur, Wärmespeicherkapazitäten der Baukörper, Strahlungsverhältnissen und weiteren Einflüssen zusammen.
<b>U-Wert</b>	Maß für die Dämmeigenschaften eines Bauteils, Einheit: W / m <sup>2</sup> .K
<b>Voxel</b>	3D-Gitterpunkt, 3D-Pixel.

## Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts

### *Journal Artikel und Konferenzbeiträge*

- Banihashemi, F., Reitberger, R., & Lang, W. (2022): 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 (CAADRIA) 2022(2), 679–688. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.679>
- Erlwein, S., Wamsler, C., Meister, J. & Pauleit, S. Governance of densification and climate change adaptation: How to solve conflicting demands for densification and greening in cities? Land Use Policy (in re-review)
- Gabriel, M.; Fellner, J.; Reitberger, R.; Lang, W.; Petzold, F. (2021): Voxel based method for real-time calculation of urban shading studies. In: SimAUD 2021 - HUMAN +
- Huang, J., Reitberger, R., Banihashemi, F., & Lang, W. (2022). A novel risk-based design framework for urban heat island: A case study of Kempten, Germany. Building and Environment, 109671. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109671>
- Reitberger, R., Banihashemi, F., & Lang, W. (2022). 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) 2022(2), 629–638. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.679>
- Reitberger, R., Schade, C., Banihashemi, F., & Lang, W. (2022). A Life Cycle Perspective on Vertical Densification - Embodied Impact Assessment of Vertical Building Extensions. Proceedings of the Passive Low Energy Architecture (PLEA) Conference 2022, 702-707



### *Konferenzposter*

Espinosa, A.; Reitberger, R.; Banihashemi, F.; Lang, W. (2022): Analyzing the simplification of context shading for use in building energy simulation. Turning points in the energy transition: Setting the course for the next decades, 12th Energy Colloquium of the Munich Institute of Integrated Materials, Energy and Process Engineering (MEP) p. 45

Reitberger, R.; Fellner, J.; Gabriel, M.; Lang, W.; Petzold, F. (2021): Using voxel masks to assess evapotranspirative cooling from urban tree arrangements. 11th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering, 2021 Energy Sciences for Europe's Green Deal, p. 65

Reitberger, R.; Fellner, J.; Lang, W.; Petzold, F. (2021): Life Cycle Assessment of vertical building extensions in early design stages. 11th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering , 2021 Energy Sciences for Europe's Green Deal , p. 60

### *Vorträge und Öffentlichkeitsarbeit*

Eigene Abschlusskonferenz des Projekts mit Vorstellung der erarbeiteten Inhalte und Veröffentlichungen (09.11.2022)

Vorstellung des Projekts beim Online Kongress des Zukunftsrats der bayerischen Wirtschaft, ausgerichtet vom Verband der bayerischen Wirtschaft (27.07.2021)

Vorstellung der Umfrage- und Interviewergebnisse zum Thema Governance im Rahmen der International Association for Landscape Ecology (IALE 2021; 12.07.2021)

Vorstellung des Projekts im Arbeitskreis Stadtplanung des Bayerischen Städte- und Gemeindetags (27.06.2022)

Vorstellung des Projekts und der Collaborative Design Plattform auf der BIMworld 2020 (24.11.2020)

## Anhang

Anhang 1: Zusammenfassung der Ergebnisse und Anforderungen aus dem internen Workshop. ....	131
Anhang 2: Detaillierte Übersicht der geführten Expert:inneninterviews. ....	132
Anhang 3: Phasen der Aufstellung eines Bebauungsplanes mit Berücksichtigung der beteiligten Akteur:innen und ihrer Einflussgrößen. ....	133
Anhang 4: Darstellung der nicht erneuerbaren Primärenergie (PENRT, oben) und der erneuerbaren Primärenergie (PERT, unten) nach Baualtersklassen (BAK) und Bauteilen je m <sup>2</sup> Bauteilfläche für die betrachteten Lebenszyklusphasen der Entsorgung (C3 + C4) für Mehrfamilienhäuser. ....	134
Anhang 5: Generierte Datensätze für Dämmmaterialien in verschiedenen ökologischen Standards. ....	135
Anhang 6: Überarbeitete Dashboarddarstellung an der Collaborative Design Plattform (CDP). ....	136
Anhang 7: Zwischenergebnisse für Sonnenstunden und Außenraumkomfort bei der Entwicklung des Szenarios „Aufstockung + max. Grün“ auf der Planungsplattform. ....	138
Anhang 8: Ergebnisse der UTCI Simulation mittels Ladybug Tools für den 1. August, 16 Uhr. ....	139
Anhang 9: Vergleichswerte für durchschnittliche Sonnenstunden im Januar am Standort Kempten bei verschiedenen Bautypen. ....	140
Anhang 10: Zusammensetzung der absoluten Treibhausgasemissionen des Szenarienvergleichs. ....	141
Anhang 11: Spinnennetzdiagramme der Nachverdichtungsszenarien zu fünf verschiedenen Bewertungsaspekten. ....	142
Anhang 12: Barrieren und Erfolgsfaktoren für die Integration von Stadtgrün in Nachverdichtungsprozessen. ....	143
Anhang 13: Agenda zum Workshop mit Kommunen und Wirtschaft. ....	145
Anhang 14: Auswertung der Onlinebefragung bayerischer Kommunen zum Umgang mit Nachverdichtung. ....	146
Anhang 15: Einladung zur Abschlusskonferenz des Forschungsprojekts. ....	153
Anhang 16: Feedback zum Projekt, welches im Zuge der Abschlussveranstaltung eingeholt wurde. ....	154

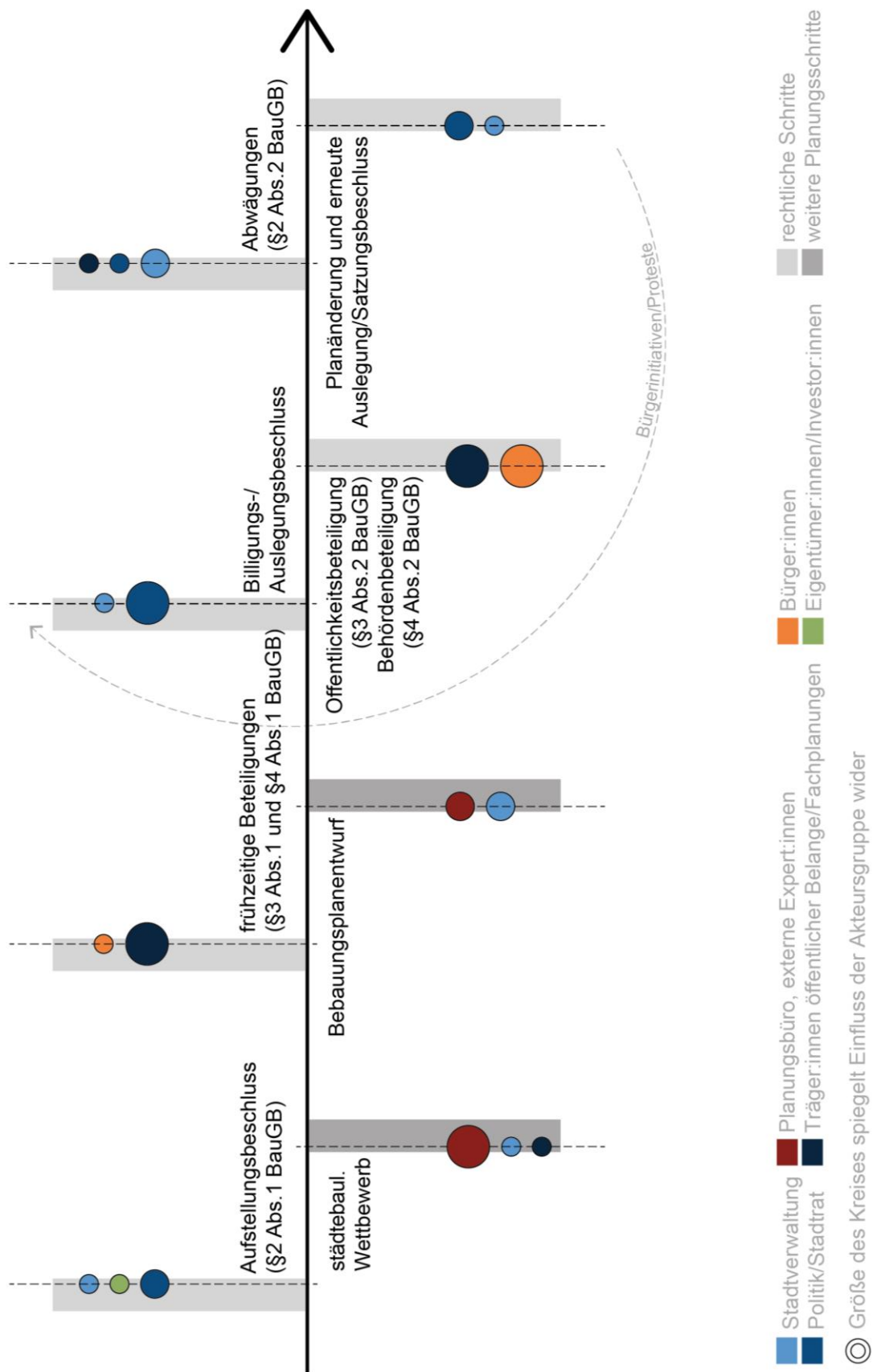
Anhang 1: Zusammenfassung der Ergebnisse und Anforderungen aus dem internen Workshop.

Ziele Workshop	Workshop Ablauf	Workshop Gestaltung	Ergebnisdarstellung prüfen	CDP entwickeln
<p><b>+</b> Verständlichkeit, Funktion CDP</p> <p><b>+</b> CDP als Kommunikationstool sinnvoll?</p> <p><b>+</b> Austauschmöglichkeiten prüfen</p> <p><b>0</b> Nutzbarkeit Tool für Zielgruppen</p> <p><b>-</b> Teilnehmenden nützliche Event bieten</p> <p>Einbindung in Planungsprozess wann? wie? weif?</p> <p>Was brauchen Kommunen noch?</p> <p>Must have</p> <p>Nice to have</p> <p>Priorisieren</p> <p>Sammeln</p>	<p><b>Ablauf</b></p> <p><b>Agenda:</b> Stimmung „Katzen“, Aufgabenstellung, Ablauf, Zusammenfassung</p> <p>Anzahl der Sessions reduzieren</p> <p>Einführung: -&gt; Leute einbinden -&gt; Verhalten am Tisch</p> <p>Symbole und Abkürzungen Erklären</p> <p>Plug In's schrittweise erklären</p> <p><b>Bedienungsanleitung</b></p> <p><b>Verhalten CDP:</b> -&gt; nur Händekontakt -&gt; abwarten bis CDP reagiert -&gt; hintereinander bedienen, -&gt; Kamera bedienen (Standort)</p> <p>Symbole und Abkürzungen Erklären</p> <p>Erklärung Plug In's</p> <p>To Do's</p> <p>Raumverfügbarkeit prüfen</p> <p>Netz / Speicher (LRZ) prüfen für den Workshoptag</p>	<p><b>+</b> Offene Fragen</p> <p>Soll jeder die Möglichkeit haben den Tisch zu bedienen?</p> <p><b>Reihenfolge CDP:</b> Gebiet Kamera Klötzchen Menü Plug In's</p> <p>Von groß zu klein oder andersrum?</p> <p>Ablauf: 1 Gebäudearbeit 2 Quartierszenario 3 Doku Vergleich</p> <p>Überschaubares Einstiegsgebiet</p> <p>Handlung bei Absturz Zeit nutzen für Diskussion.</p> <p>Raumnutzung / Wechsel -&gt; Vorschlag erarbeiten</p> <p><b>Raumeinrichtung:</b> Stühle, Beistelltisch, Magnetwand, Kameras, Desinfektion, Agenda Bedienungsanleitung</p> <p>Pausenraum Gestaltung -&gt; Anregung zur Diskussion</p> <p>Fragen nach Pausen -&gt; Erkenntnisse?</p>	<p>Weiche Ergebnisse (Ebene) Darstellen?</p> <p>Priorisierung -&gt; max. 3 Ergebnisse (Zahlen, Diagramme)</p> <p><b>Energieauf</b> Quartiersebene (CO2-Ausstoß)</p> <p><b>Grün</b> Verhältnis Grün zu Gesamtfäche</p> <p><b>Bestand</b> -&gt; Grün darstellen</p> <p>Wohneinheiten visualisieren: -&gt; wie viel Grünfläche, Stellplätze notwendig?</p> <p>Stellplätze</p> <p>-&gt; Visualisieren in Fläche (ins Verhältnis setzen zu Grundstückfläche)</p> <p>Plug Ins (aktuell) Abstandsflächen, Landmarker, Pfad, Sichtbeziehung</p>	<p><b>+</b> Dropdown Menü</p> <p>Gebäudeinfo am Gebäude anzeigen</p> <p>Nordpfeil am Tisch wenn nur von einer Seite lesbar</p> <p>Darstellung f. d. Szenario</p> <p><b>LCA:</b> Kg CO2 &gt;&lt; DGNB</p> <p><b>Grün:</b> Anzahl Bäume (weg) Grünfläche (Rasen)</p> <p><b>Fläche:</b> Vgl. BGF vorher &gt;&lt; nachher</p> <p>Stellplätze [m²]</p> <p>Plug Ins (Zukunft) Schatten (Gebäude und Innenraum)</p>

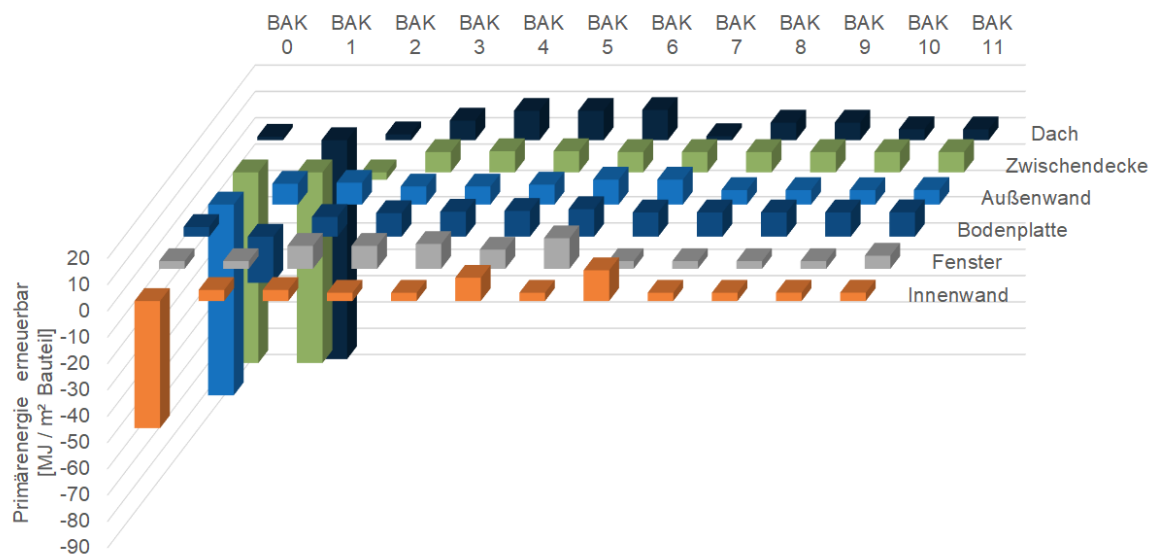
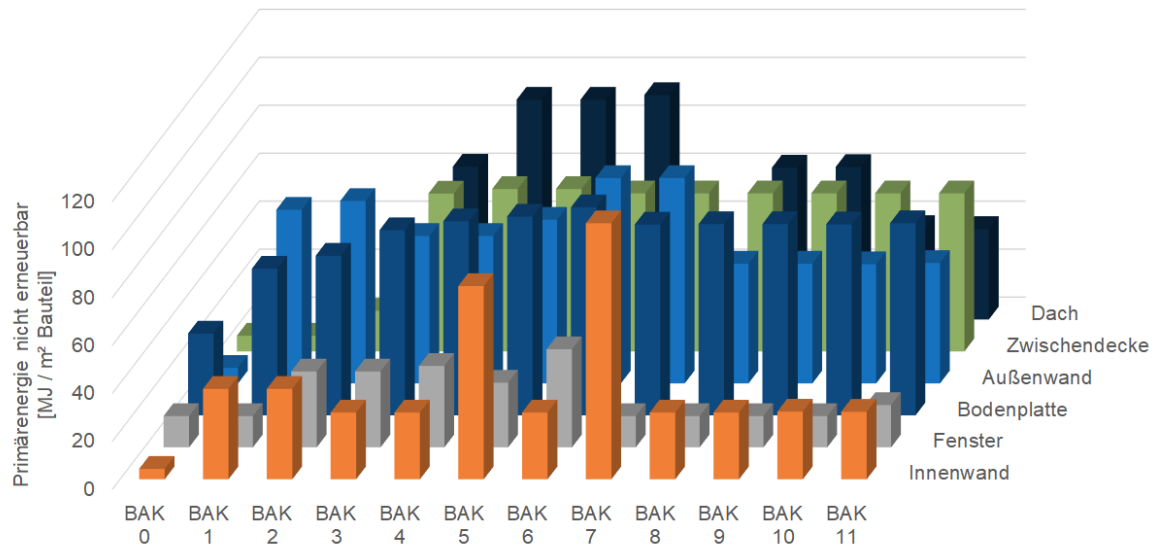
*Anhang 2: Detaillierte Übersicht der geführten Expert:inneninterviews.*

<b>Nr</b>	<b>Gruppe</b>	<b>Interviewpartner:in</b>	<b>Datum</b>
1	Träger öffentlicher Belange	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU), Abteilung medienübergreifender Umweltschutz	02.09.2020
2	Eigentümer:in / Investor:in	Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung mbH	13.10.2020
3	Eigentümer:in / Investor:in	GEWOFAG, städtische Wohnungsbaugesellschaft München, Ressort Bau	14.09.2020
4	Kommune	Stadt Dachau, Stadtplanung	24.07.2020
5	Kommune	Stadt Dachau, Grünplanung	11.06.2021
6	Kommune	Stadt Regensburg, Entwicklungsplanung	24.07.2020
7	Kommune	Stadt Regensburg, Dritter Bürgermeister	07.12.2020
8	Kommune	Stadt Regensburg, Gartenamt	25.05.2020
9	Kommune	Stadt Straubing, Stadtentwicklung und -planung	03.08.2020
10	Kommune	Stadt Straubing, Abteilung für Grün- und Freiflächen mit Stadtgärtnerei	31.05.2021
11	Kommune	Stadt Kempten, Stadtplanung	01.10.2020
12	Kommune	Stadt Kempten, Abteilung Stadtgrün	09.06.2021
13	Planungsbüro	WGF-Landschaftsarchitektur, Umweltmanagement, Stadtgestaltung	29.09.2020
14	Zivilgesellschaft	mitbauzentrale münchen, Beratungsstelle	11.10.2021
15	Zivilgesellschaft	Mietergemeinschaft AnDeKaT/Bezirksausschuss	30.10.2020
16	Zivilgesellschaft	Green City e.V., Beratungsbüro / Wagnis, gemeinschaftliches Wohnprojekt	24.11.2021

Anhang 3: Phasen der Aufstellung eines Bebauungsplanes mit Berücksichtigung der beteiligten Akteur:innen und ihrer Einflussgrößen.



Anhang 4: Darstellung der nicht erneuerbaren Primärenergie (PENRT, oben) und der erneuerbaren Primärenergie (PERT, unten) nach Baualtersklassen (BAK) und Bauteilen je m<sup>2</sup> Bauteilfläche für die betrachteten Lebenszyklusphasen der Entsorgung (C3 + C4) für Mehrfamilienhäuser.



Anhang 5: Generierte Datensätze für Dämmmaterialien in verschiedenen ökologischen Standards.

Tabelle 9: LCA Datensätze für Global Warming Potenzial (GWP) von Dämmstoffen.

Kategorisierung	GWP nach Lebenszyklusphasen jeweils in [kgCO <sub>2</sub> -eq. / m <sup>3</sup> Dämmstoff]			
	A1 - A3	B4	C3 - C4	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

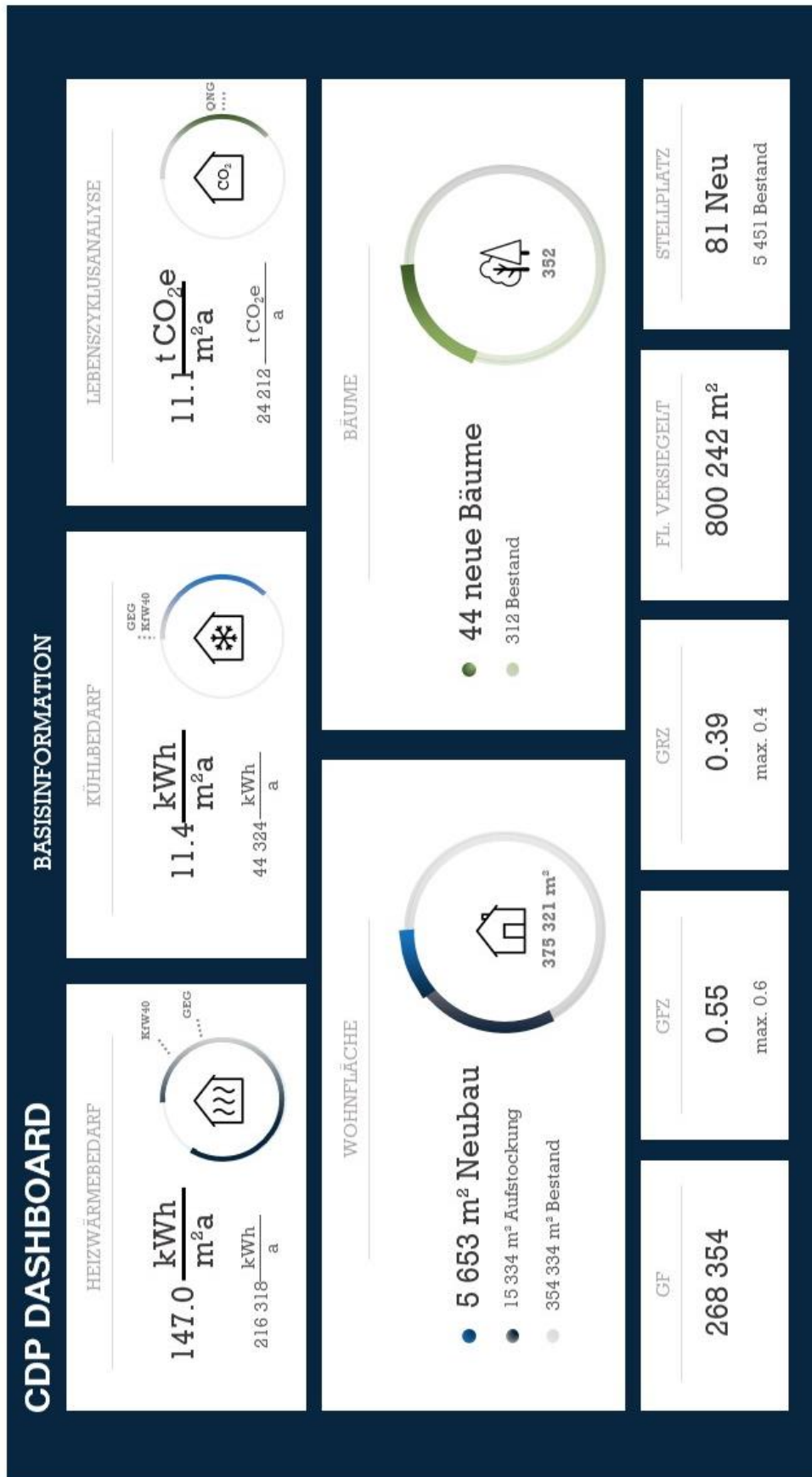
Tabelle 10: LCA Datensätze für erneuerbare Primärenergie (PERT) von Dämmstoffen.

Kategorisierung	PERT nach Lebenszyklusphasen jeweils in [MJ / m <sup>3</sup> Dämmstoff]			
	A1 - A3	B4	C3 - C4	D
eco	1.470,26	0,00	-625,12	-109,01
eco standard	959,55	0,00	1,71	-60,93
standard	1.154,77	0,00	-446,15	-49,59
konventionell	726,37	0,00	9,80	-316,69

Tabelle 11: LCA Datensätze für nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) von Dämmstoffen.

Kategorisierung	PENRT nach Lebenszyklusphasen jeweils in [MJ / m <sup>3</sup> Dämmstoff]			
	A1 - A3	B4	C3 - C4	D
eco	339,24	0,00	-14,99	-414,77
eco standard	1.606,77	0,00	14,24	-237,63
standard	1.581,19	0,00	-39,50	-696,15
konventionell	5.098,22	0,00	56,46	-1.173,39

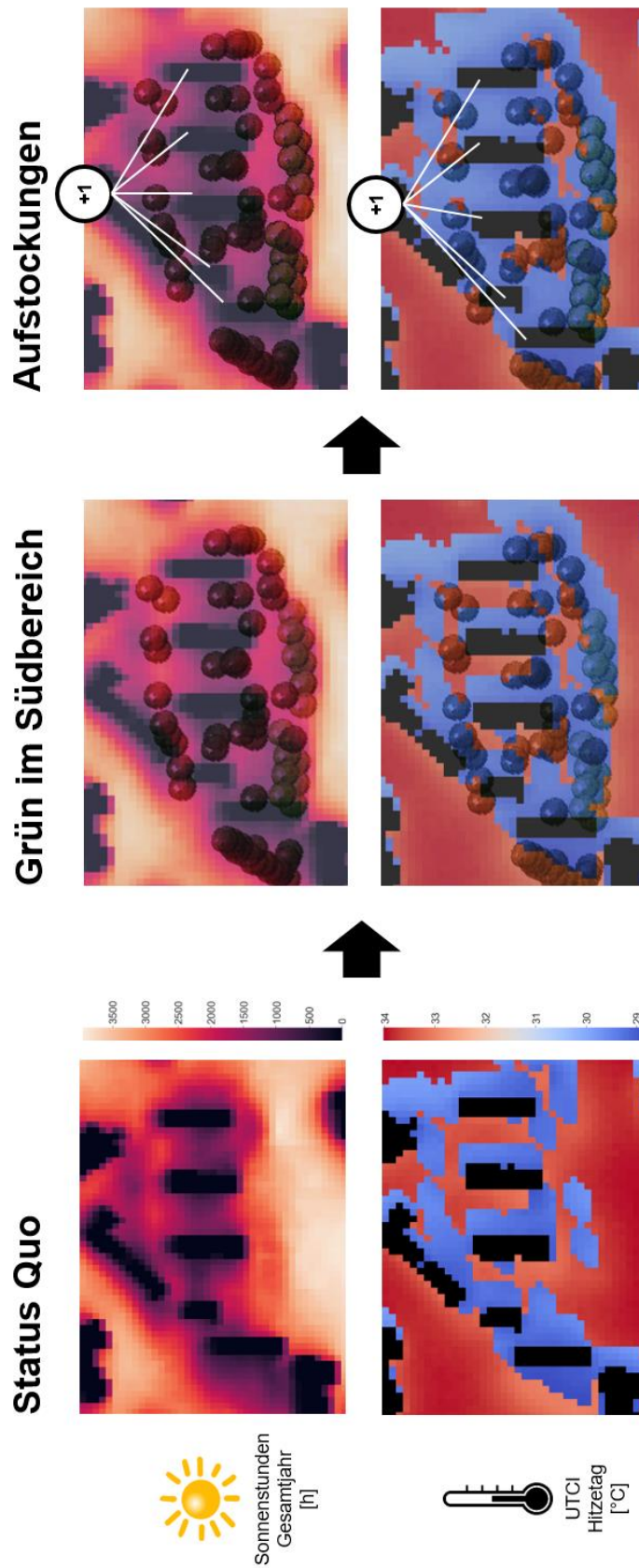
Anhang 6: Überarbeitete Dashboarddarstellung an der Collaborative Design Plattform (CDP).



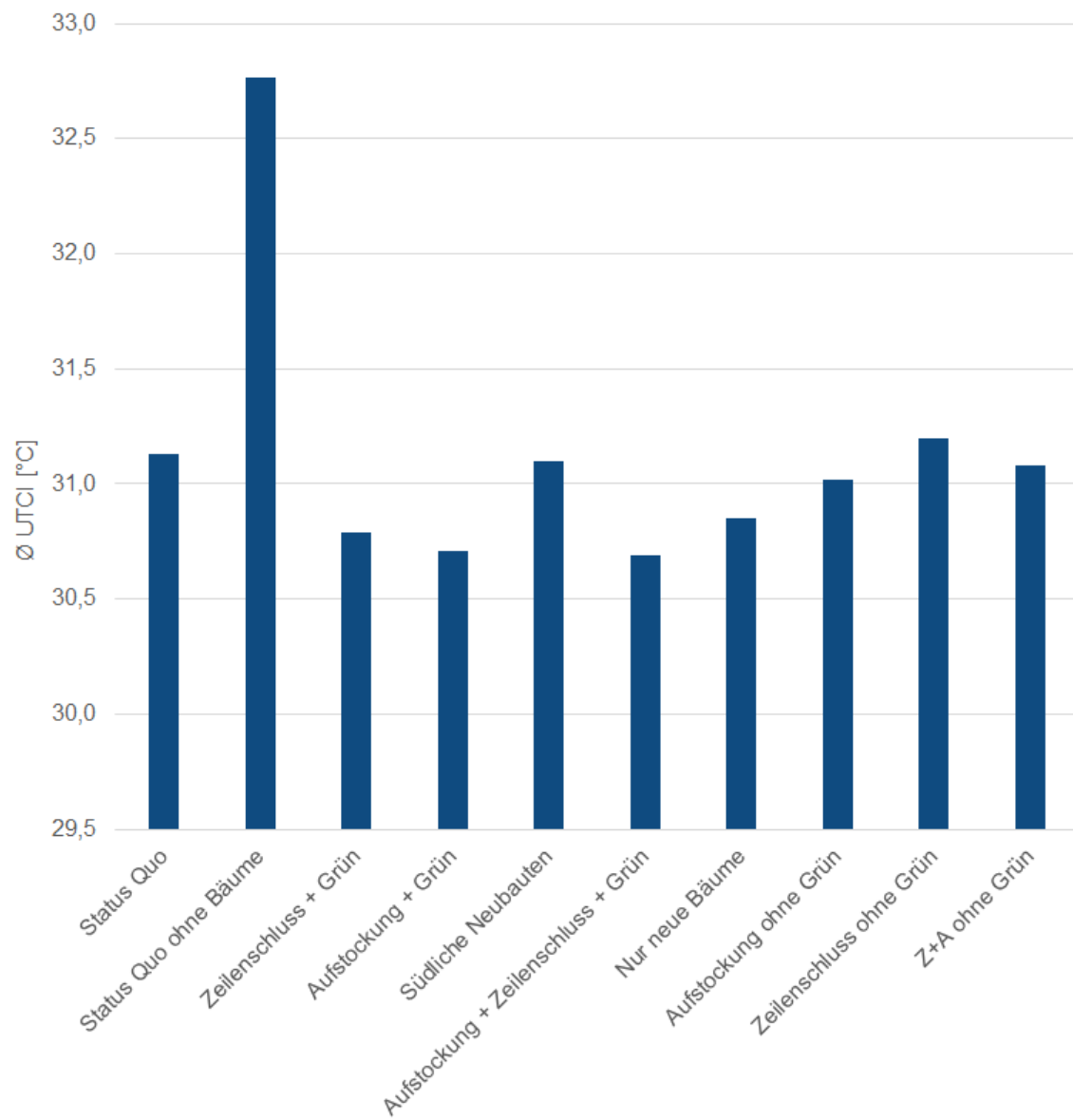




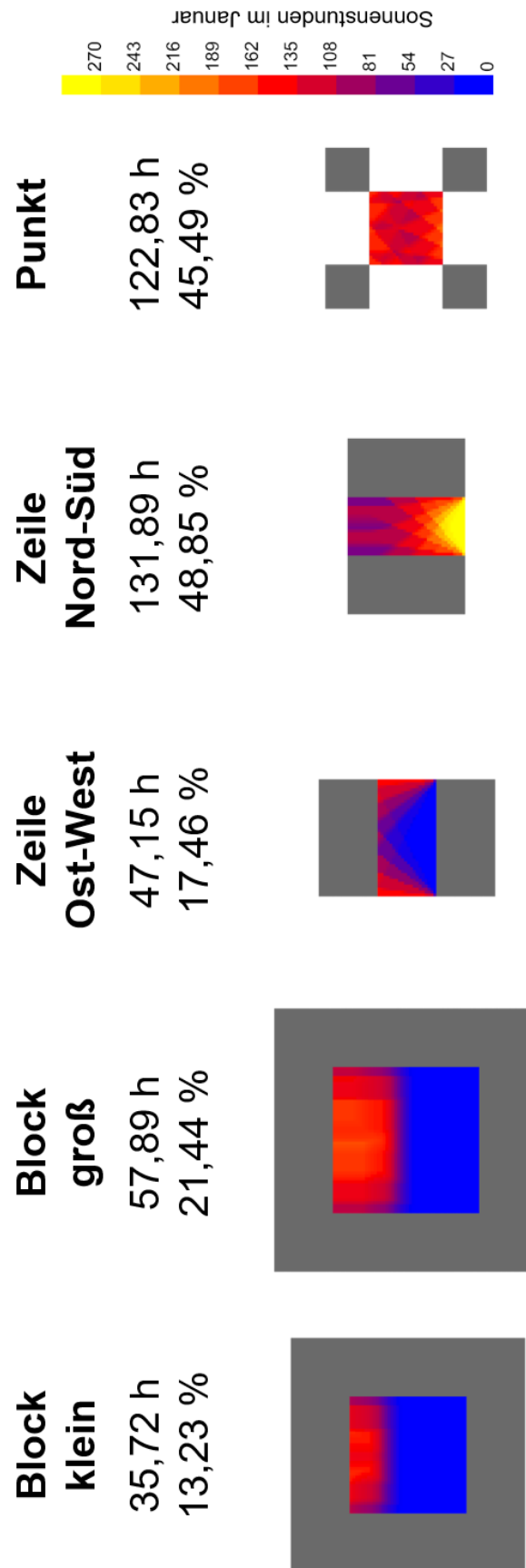
Anhang 7: Zwischenergebnisse für Sonnenstunden und Außenraumkomfort bei der Entwicklung des Szenarios „Aufstockung + max. Grün“ auf der Planungsplattform.



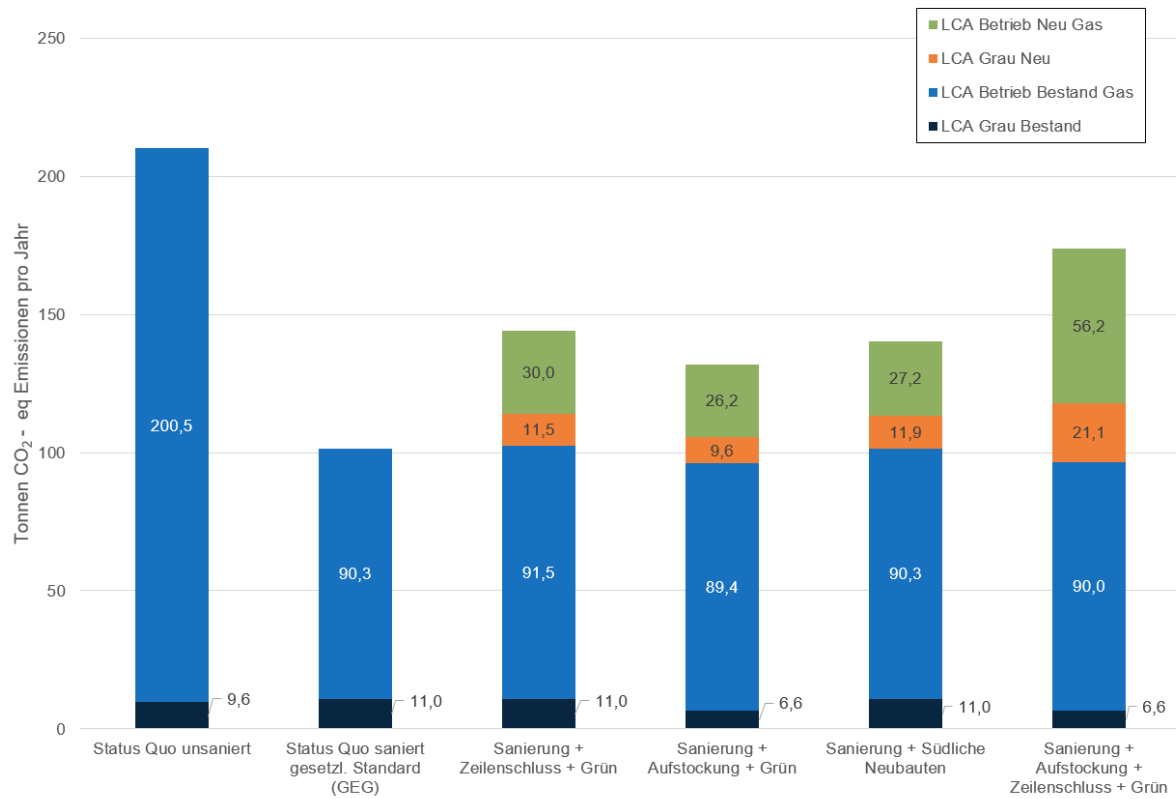
Anhang 8: Ergebnisse der UTCI Simulation mittels Ladybug Tools für den 1. August, 16 Uhr.



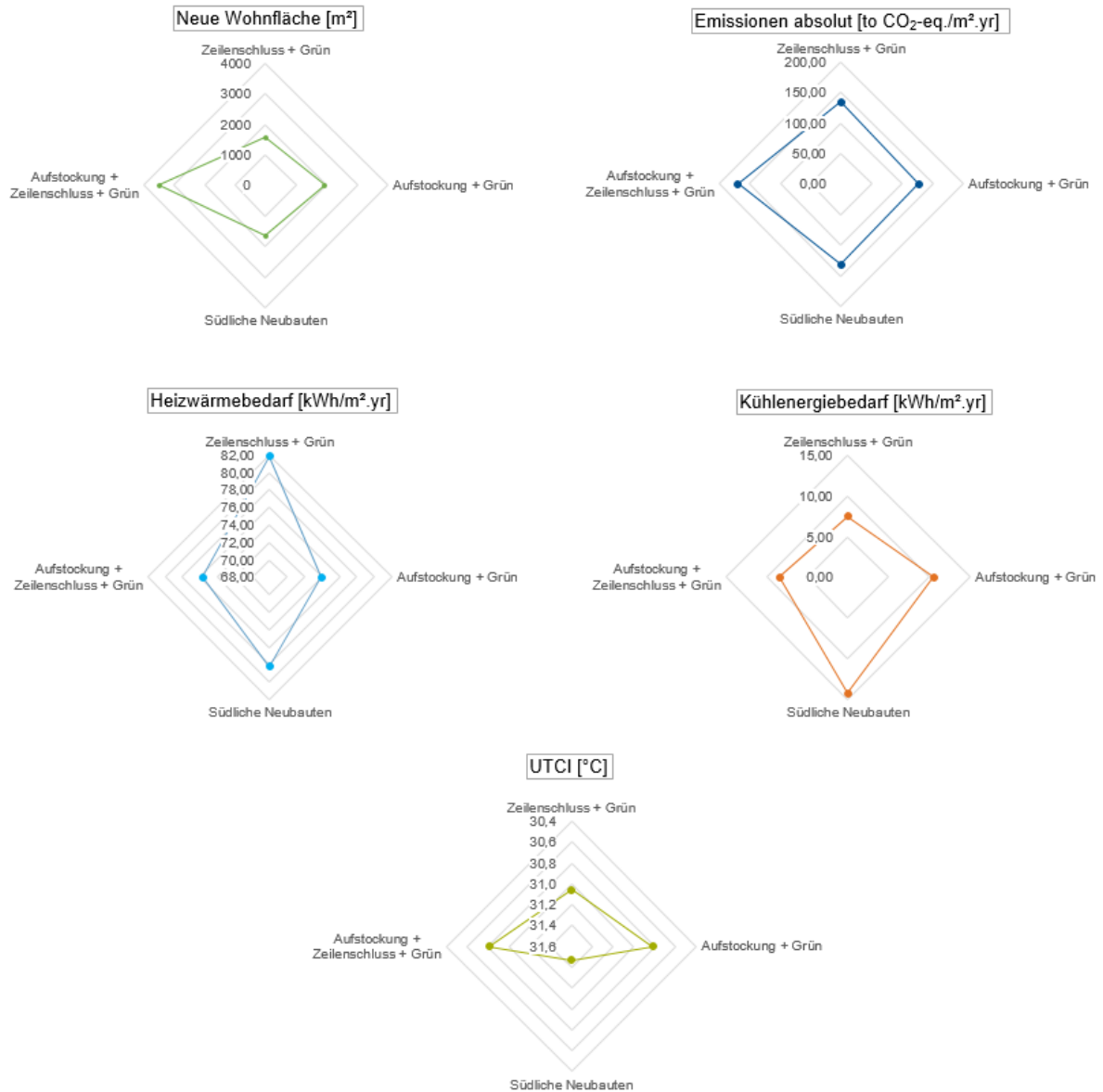
Anhang 9: Vergleichswerte für durchschnittliche Sonnenstunden im Januar am Standort Kempten bei verschiedenen Bautypen.



Anhang 10: Zusammensetzung der absoluten Treibhausgasemissionen des Szenarienvergleichs.



Anhang 11: Spinnennetzdiagramme der Nachverdichtungsszenarien zu fünf verschiedenen Bewertungsaspekten.



Anhang 12: Barrieren und Erfolgsfaktoren für die Integration von Stadtgrün in Nachverdichtungsprozessen.

<b>Dimen sion</b>	<b>Barriere</b>	<b>Erfolgsfaktor</b>	<b>Beispiel für Veränderung</b>
<b>Diskurs</b>	i. Vorhandenes kommunales Selbstbild schließt Stadtgrün aus	i. Glauben an eigene Handlungsmöglichkeit	Gestiegenes Bewusstsein für städtische Grünflächen durch Reisebeschränkungen im Zuge der Corona Pandemie
	ii. Verhärtete Fronten zwischen den Planungsbeteiligten	ii. Entwicklung gemeinsamer Zielvorstellungen unter Beteiligung relevanter Stakeholder	
	iii. Verlagern von Verantwortlichkeit auf andere hierarchische Ebenen	iv. Übereinstimmender interner Diskurs, gemeinsames Verständnis von Planungszielen	
		v. Regelmäßiger Austausch mit allen Beteiligten, wiederkehrender öffentlicher Dialog	
		vi. Krisen als Möglichkeitsfenster für Wandel begreifen	
<b>Macht und Ressourcen</b>	i. Abhängigkeit von Investor:innen in der Stadtentwicklung	i. Zusammenspiel von politischem Willen und qualifizierten Mitarbeiter:innen	Anstellung Klimaresilienzmanager
	ii. Pfadabhängigkeiten für die Verteilung und den Erhalt von Ressourcen	ii. Strategische Nutzung von externen Ressourcen (Beratung, Fördermittel)	
	iii. Unzureichendes Wissen und fehlende Qualifikation	iii. Austausch mit anderen Kommunen	
		iv. Aufbau auf bereits bestehenden Anstrengungen	
<b>Regeln und Abläufe</b>	i. Fehlendes öffentliches Verständnis	iv. Vorhandensein einer politischen Leitlinie für die Entwicklung von städtischem Grün	Änderungen im Baugesetzbuch
	ii. Fehlender politischer Wille zum Monitoring von Maßnahmen	v. Verbindliche Regelungen und Satzungen zum Erhalt und der Entwicklung von Stadtgrün	
	iii. Fehlende oder zu späte Beteiligung von Grünplaner:innen in Planungsprozessen	vi. ressortübergreifende Arbeitsroutinen	

<b>Akteure und Koalitionen</b>	i.	fehlendes Vertrauen	i.	Zusammenarbeit von Verwaltung und Politik	Änderung von politischen Mehrheiten
	ii.	fehlendes gemeinsames Verständnis	ii.	Zusammenarbeit von Stadt- und Grünplanung	
	iii.	„Silo“- Denken in der Verwaltung	iii.	Mitgliedschaft in Austauschnetzwerken, Zusammenarbeit mit externen Stakeholdern (NGOs, Forscher:innen)	



## Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels

### Workshop an der Collaborative Design Platform (CDP)

Ort: Technische Universität München  
Loge Pförtner\*in  
Arcisstraße 21  
80333 München

Datum: 5. Mai 2022



Jede Workshop-Session besteht aus zwei Teilen:

In einem praktischen Teil werden die Funktionen an der Collaborative Design Platform (CDP) getestet. Dafür arbeiten alle eingeladenen Gäste zusammen an dem interaktiven Planungswerkzeug, um konkrete Planungssituationen zu lösen.

In dem anschließenden Feedback werden die Erfahrungen reflektiert und festgehalten. Es wird besprochen, was gut funktioniert und welche konkreten Verbesserungsvorschläge aus der Praxis heraus sinnvoll sind.

Der Workshop wird moderiert und begleitet vom Nachverdichtungs-Projektteam. In den Pausen besteht die Möglichkeit bei Essen und Getränken ungezwungen ins Gespräch zu kommen.

11:00 – 11:45	Begrüßung und Einführung
11:45 – 12:30	Session #1
12:30 – 13:30	Mittagspause
13:30 – 15:00	Session #2
15:00 – 15:15	Kaffeepause
15:15 – 15:45	Session #3
15:45 – 16:00	Zusammenfassung
16:00	Ende

## Forschungsprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“

### Auswertung der Onlinebefragung bayrischer Kommunen zum Umgang mit Nachverdichtung

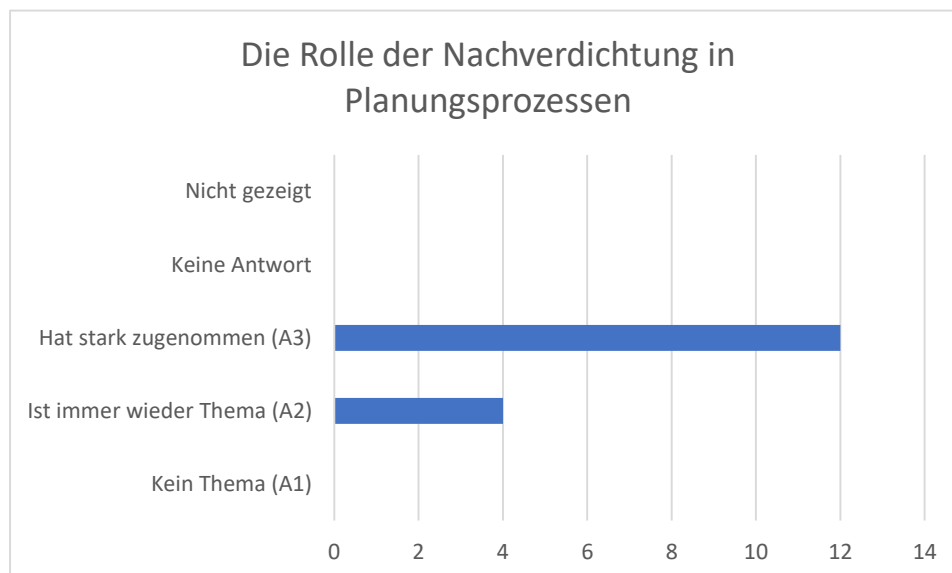
Befragungszeitraum: 30.06. - 31.07.2020

Angeschriebene Kommunen: 29

Vollständige Antworten: 16

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“ am Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung in München erforschen wir, welche Strategien und Werkzeuge bei der Bewältigung von Planungskonflikten im Zusammenhang mit Nachverdichtung hilfreich sein können. Die hierzu durchgeführte Onlineumfrage zum Umgang mit Nachverdichtung richtete sich an bayrische Kommunen mit mehr als 35.000 Einwohner\*innen und einer positiven bzw. ausgeglichenen Bevölkerungsprognose\*. Die Teilnehmenden gehörten der Stadtentwicklung, der Stadtplanung, der Bauverwaltung, dem Umweltamt an oder waren Klimaschutzbeauftragte. In der Auswertung werden sechs der insgesamt 10 gestellten Fragen vorgestellt und visualisiert (die übrigen vier Fragen waren nicht inhaltlicher Natur, sondern dienten der Einordnung der Studienergebnisse).

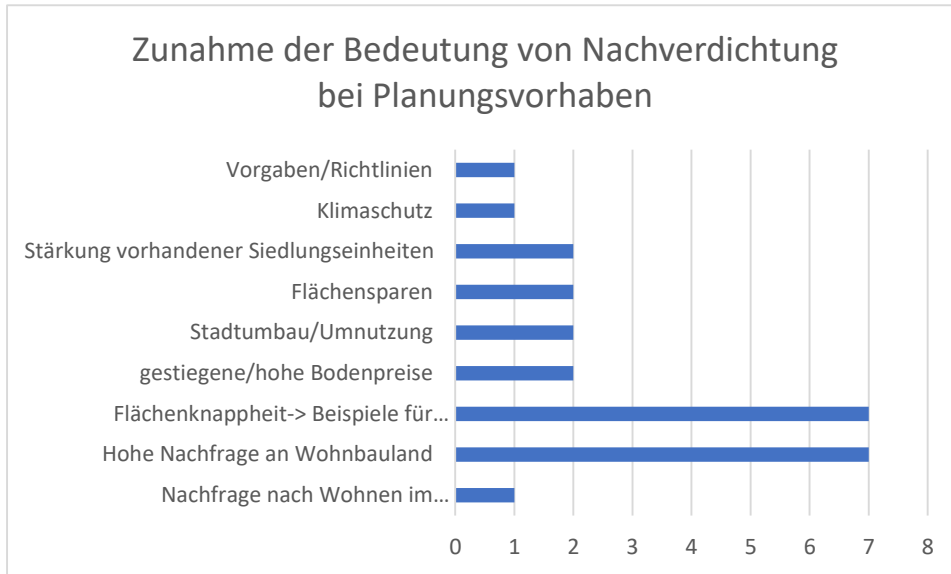
#### F1 - Welche Rolle spielt Nachverdichtung bei Ihnen in der Planung?



Nachverdichtung im Bereich der Stadtplanung ist ein wichtiges Thema. Die Mehrheit mit 75 % der befragten Teilnehmer hat angegeben, dass die Rolle der Nachverdichtung stark zugenommen hat, vier der Befragungsteilnehmer stufen Nachverdichtung als ein immer wiederkehrendes Thema ein.

\*lt. Bayr. Landesamt f. Statistik (2020). Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Bayern bis 2038.

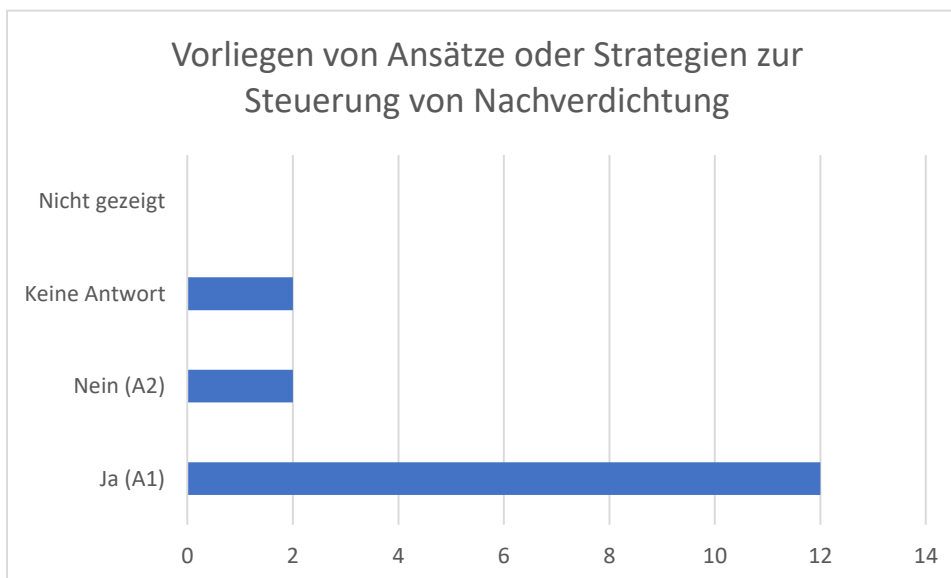
**F1a - Sie haben angegeben, dass das Thema Nachverdichtung in Ihrer Planung stark zugenommen hat. Bitte erläutern Sie kurz die Gründe hierfür:**



Der Großteil der Befragten hat angegeben, dass das Thema Nachverdichtung in den letzten Jahren stark zugenommen hat.

Insbesondere die Themen Flächenknappheit und Wohnungsnot führen zu einer starken Präsenz von Nachverdichtungsthemen. Eher positive und gestalterische Assoziationen wie beispielsweise Umnutzung und Stadtumbau oder die Stärkung vorhandener Siedlungseinheiten werden dagegen seltener genannt. Haupttreiber ist vorrangig die Bewältigung der Wohnraumknappheit.

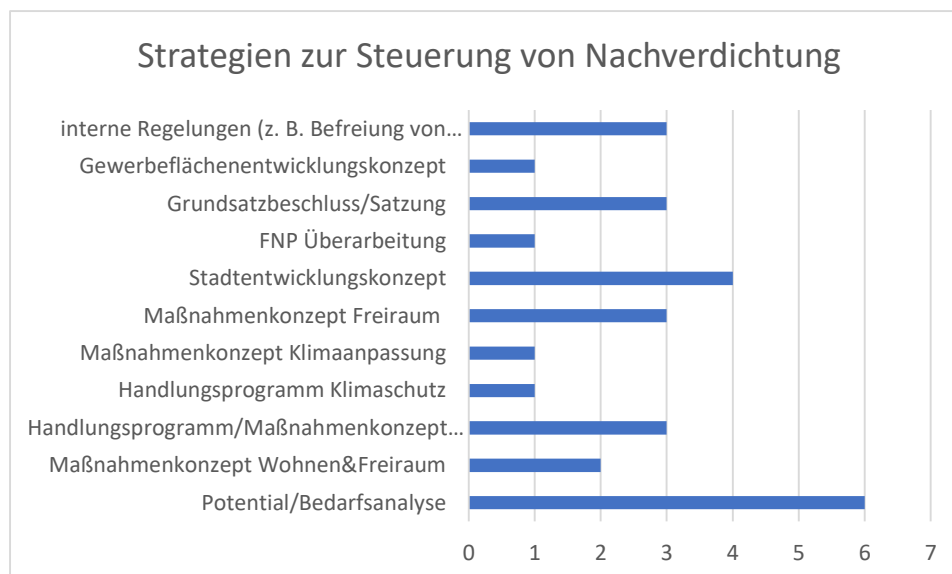
**F2 – Liegen in Ihrer Kommune Ansätze oder Strategien vor, um Nachverdichtung bzw. Bauvorhaben der Innenentwicklung zu steuern?**



Die Mehrheit der befragten Kommunen hat bereits Ansätze oder entwickelte Strategien, um Bau- oder Nachverdichtungsvorhaben im Bereich der Innenentwicklung zu steuern. Dies spiegelt die Dringlichkeit des Themas Nachverdichtung wieder. Nur zwei kommunale Vertreter\*innen gaben an, dass keine Strategien vorliegen.

### F2a - Welche Strategien gibt es, um Nachverdichtung zu steuern?

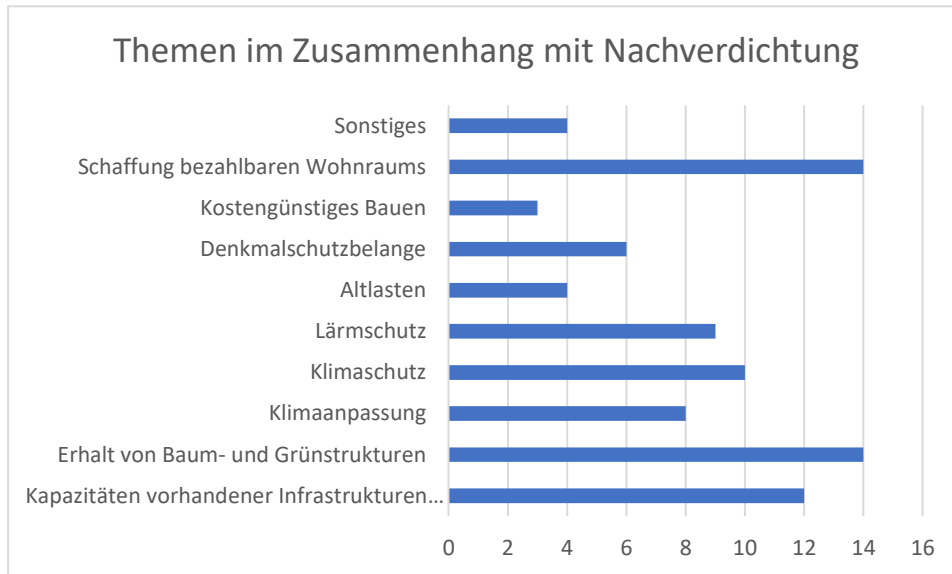
Die häufigsten Instrumente, um Nachverdichtung innerhalb der Kommune zu steuern, sind Potenzial- und Bedarfsanalysen wie etwa Flächenmanagement- oder Baulandkataster. Weiterhin werden oft Stadtentwicklungskonzepte, wie etwa ISEKS genannt. Ein gebräuchliches Instrumentarium im Zusammenhang mit Nachverdichtung sind Grundsatzbeschlüsse und Satzungen (z.B. Freiflächenkonzepte, Baulandmodelle) oder die Vereinbarung von strategischen Entwicklungszielen (z.B. zur Wohnbaulandentwicklung). Die meisten der befragten Kommunen gaben mehrere Strategien an, die im Zusammenhang mit Nachverdichtung stehen. Während einige der genannten Instrumente eher regulierend wirken und Rahmen setzen, sollen Maßnahmen wie die Zusprechung von Befreiungen und die Erhebung von Baulücken Nachverdichtung fördern.



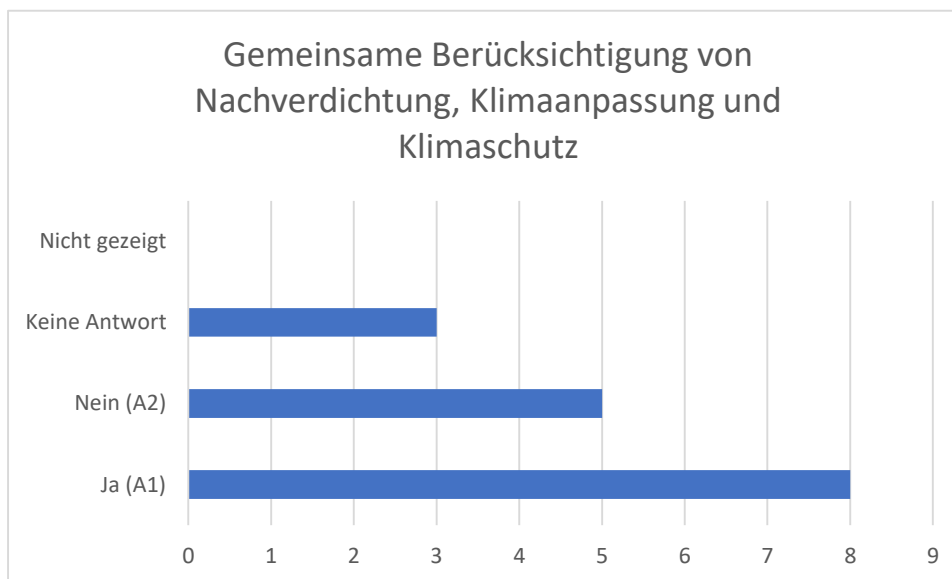
### F3 - Welche der folgenden Themen werden in Zusammenhang mit Nachverdichtung bei Ihnen immer wieder diskutiert?

Das Themenspektrum im Zusammenhang mit Nachverdichtung ist breit, am häufigsten wurden der Erhalt von Baum- und Grünstrukturen, Schaffung von bezahlbarem Wohnraum und Kapazitäten vorhandener Infrastrukturen (Verkehr) angegeben. Klimaschutz, Lärmschutz, Klimaanpassung und Denkmalschutzbelange sind weitere Themen, die im Zusammenhang mit Nachverdichtung diskutiert werden. Aus der hohen Anzahl an Mehrfachantworten (N=84)

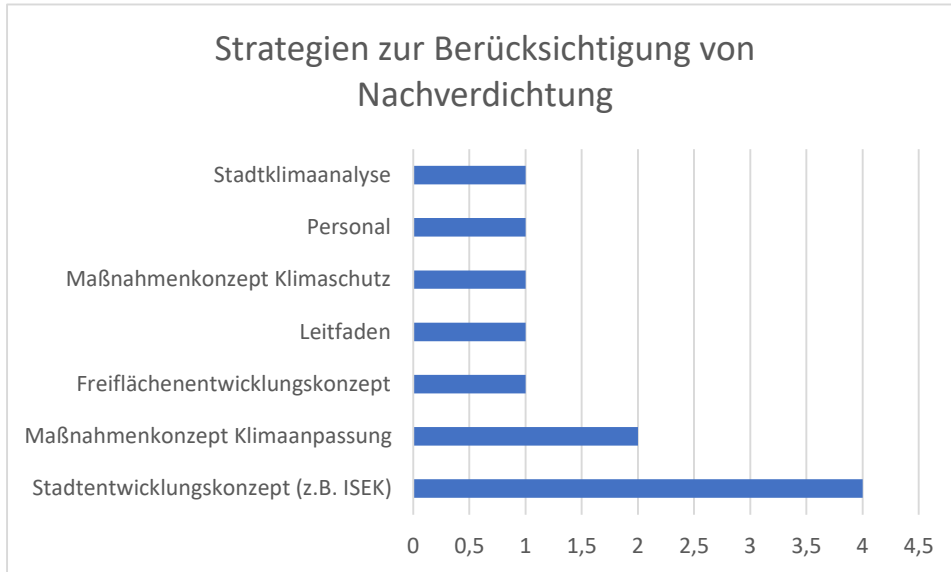
lässt sich schließen, dass im Zusammenspiel mit Nachverdichtung zahlreiche Aspekte eine Rolle spielen, die im Planungsprozess gegen und miteinander abgewogen werden müssen.



**F4/F4a – Liegen in Ihrer Kommune Ansätze oder Strategien vor, die Nachverdichtung, Klimaanpassung und Klimaschutz gemeinsam berücksichtigen?**

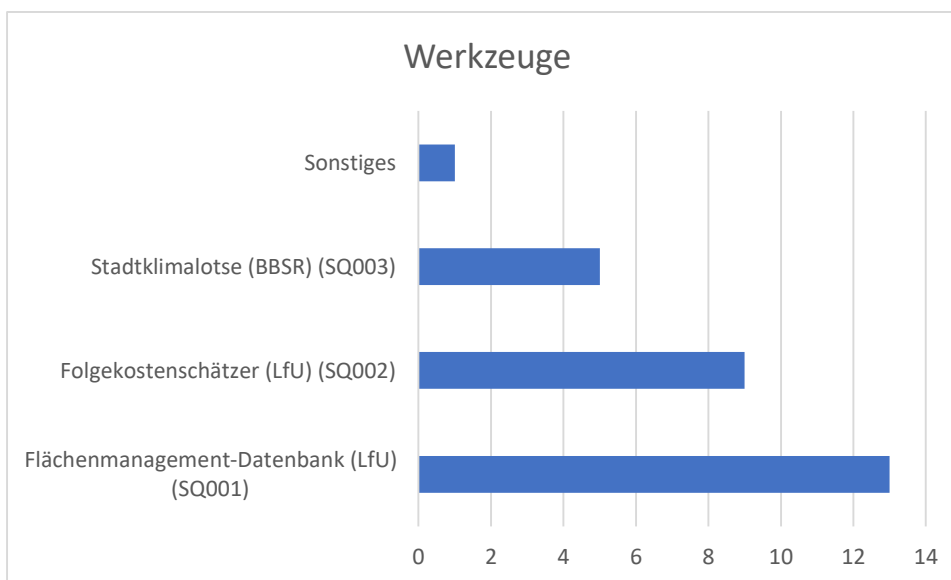


Eine gemeinsame Berücksichtigung von Nachverdichtung, Klimaanpassung und Klimaschutz findet vorwiegend durch integrierte städtebauliche Entwicklungskonzepte (ISEK) statt. Gesondert wurden zudem Maßnahmenkonzepte zur Klimaanpassung/zum Klimaschutz genannt.



Die Ansätze zur gemeinsamen Berücksichtigung der Themen Nachverdichtung, Klimaanpassung und Klimaschutz sind breit gefächert. Neben Stadtentwicklungskonzepten, wurden vermehrt Maßnahmenkonzepte zur Klimaanpassung angegeben. Vereinzelt wurden Freiflächenentwicklungskonzepte, Stadtklimaanalysen, Maßnahmenkonzepte für Klimaschutz sowie Maßnahmen im Bereich Personal als Ansätze genannt.

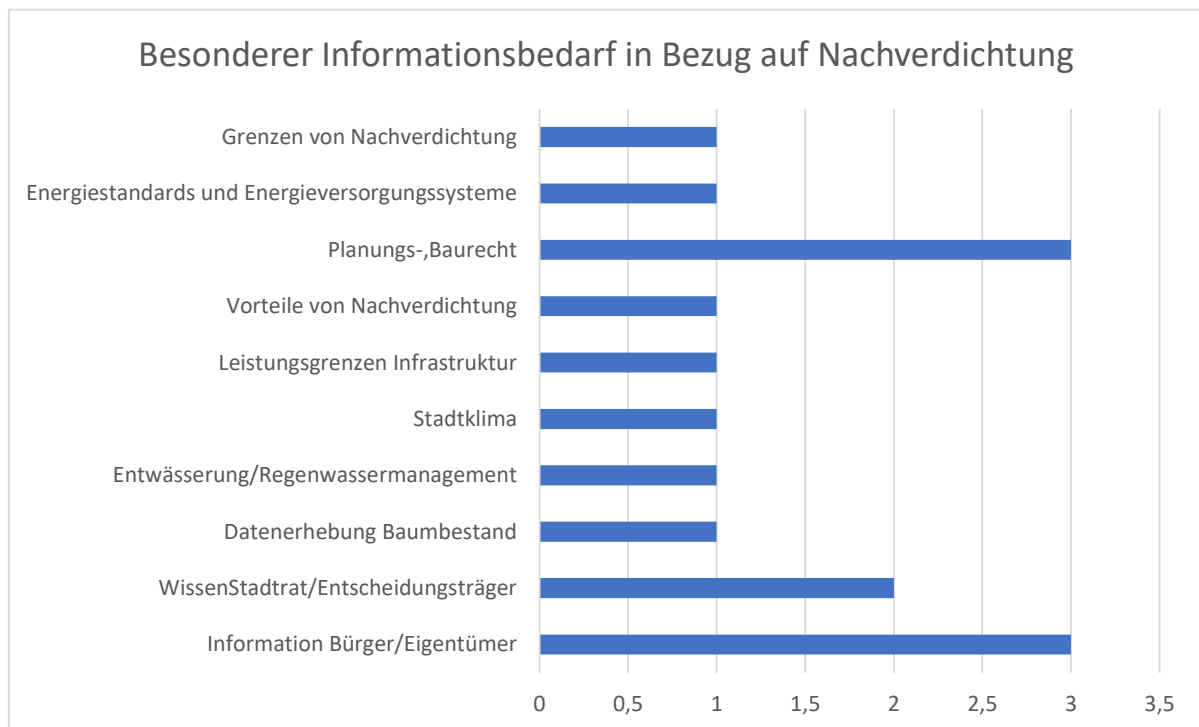
**F5 - Welche der folgenden Werkzeuge sind Ihnen bekannt?**



Unter den abgefragten Werkzeugen stellt die Flächenmanagement-Datenbank des Landesamtes für Umwelt (LfU) das bekannteste Werkzeug dar, gefolgt vom Folgekostenschätzer (LfU). Eher unbekannt ist der Stadtklimalotse des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Darüber hinaus wurden der KlimaAtlas Bayern und die Klimaanalyse genannt, diese sind jedoch weniger Werkzeug als Hintergrundinformation.

Instrument	Beschreibung	Link
Flächenmanagement-Datenbank	Tool zum Umgang mit Innenentwicklungspotenzialen	<a href="https://www.lfu.bayern.de/umweltkommunal/flaechenmanagement/fmdb/index.htm">https://www.lfu.bayern.de/umweltkommunal/flaechenmanagement/fmdb/index.htm</a>
Folgekostenschätzer	Kostenschätzung für langfristige Kosten neuer Wohngebiete	<a href="https://www.lfu.bayern.de/umweltkommunal/flaechenmanagement/folgekostenschaetzer/index.htm">https://www.lfu.bayern.de/umweltkommunal/flaechenmanagement/folgekostenschaetzer/index.htm</a>
Stadtklimalotse	Unterstützung bei der Auswahl und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen	<a href="http://www.plan-risk-consult.de/stadtklimalotse/">http://www.plan-risk-consult.de/stadtklimalotse/</a>

### F6 - Besonderer Informationsbedarf in Planungsprozessen bezüglich Nachverdichtung



Besonderer Informationsbedarf beim Thema Nachverdichtung wird hinsichtlich der Information von Bürger\*innen und Eigentümer\*innen sowie bei Handlungsmöglichkeiten des Planungs- und Baurechtes gesehen (z.B. Welche Festsetzungen sind in Bebauungsplänen oder städtebaulichen Verträgen möglich? Welche Möglichkeiten besitzen Kommunen, Baulücken mit Baurecht zu akquirieren?). Die Themen Energie, Infrastruktur, Regenwassermanagement, Stadtklima und Baumbestand werden ebenfalls genannt.

## **Schlussfolgerungen aus der Onlinebefragung bayrischer Kommunen zum Umgang mit Nachverdichtung**

Die Onlineumfrage zeigt klar, dass Nachverdichtung in den Planungsprozessen der teilnehmenden Kommunen eine große Rolle spielt. Besonders die innerstädtische Flächenknappheit und der hohe Wohnraumbedarf sind Treiber für diese Entwicklung. Das Themenspektrum, das in engem Zusammenhang mit Nachverdichtung diskutiert wird, ist breit und reicht vom Erhalt der Baum- und Grünstrukturen, der Schaffung von bezahlbarem Wohnraum, Klimaschutz und Klimaanpassung, Lärmschutz und Denkmalpflege bis zu Kapazitäten vorhandener Infrastrukturen (Verkehr).

Größtenteils liegen in den befragten Kommunen bereits Strategien oder Ansätze zur Nachverdichtung oder zur Steuerung von Bauvorhaben der Innenentwicklung vor. Als wichtige Instrumentarien werden hier die Umsetzung von Stadtentwicklungs- und Maßnahmenkonzepten zur Klimaanpassung genannt. Weitere Strategien sind Potenzial- und Bedarfsanalysen wie etwa Flächenmanagement- oder Baulandkataster. Besonderer Informationsbedarf in Bezug auf Planungsprozesse der Nachverdichtung besteht im Planungs- und Baurecht. Auch die rechtzeitige Beteiligung von Bürger\*innen und Eigentümer\*innen wird oftmals unterschätzt.

Derzeit werden Interviews mit verschiedenen Beteiligten an Planungs- und Nachverdichtungsverfahren (Kommunen, Planungsbüros, Anwohnerinitiativen, Politik, Wohnungsbaugesellschaften) ausgewertet. Die Befragungen sollen Erkenntnisse über die Planungskonflikte, Schwierigkeiten und Lösungsansätze in Rahmen von Nachverdichtungsprojekten bringen, um daran festzustellen, welche Anforderungen an ein hilfreiches Visualisierungswerkzeug gestellt werden und welche Funktionen bei der Planung unterstützen können. In einem weiteren Schritt wird ein Workshop vorbereitet, bei dem die Teilnehmer\*innen das Unterstützungswerkzeug kennenlernen werden und testen können.

Aktuelle und weitere Informationen sind auf der [Webseite](#) des Forschungsprojekts bzw. der [Webseite](#) des Zentrums für Stadtnatur und Klimaanpassung erhältlich. Das Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert.



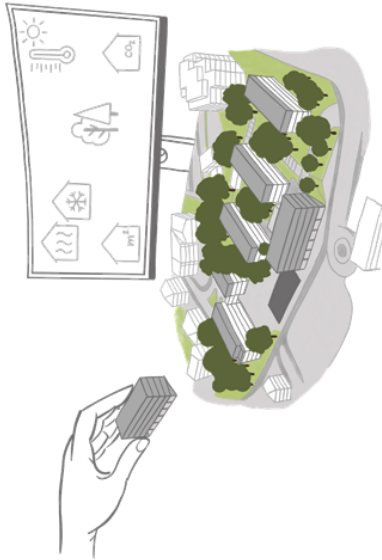
Anhang 15: Einladung zur Abschlusskonferenz des Forschungsprojekts



**09. November 2022**  
13:30 bis 17:15 Uhr

**PROGRAMM**

13:15	Freischaltung Plenum (Digitale Anknüpfung und Zugang zum Videokonferenzsystem)
13:30	<b>Grußworte</b> <b>Staatsminister Thorsten Glauber, Mdl</b> Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz <b>ZSK Vorsitzender Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit</b> Technische Universität München
13:50	<b>Themenblock I: Klimaresiliente Stadtplanung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einführung &amp; Kurzvorstellung Forschungsprojekt</li> <li>• Kommunale Handlungsmöglichkeiten im Spannungsfeld zwischen Nachverdichtung und Klimaresilienz</li> <li>• Anwendungsfelder kollaborativer Instrumente</li> </ul>
15:00	Pause
15:20	<b>Themenblock II: Qualität im Quartier &amp; Digitale Methoden</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kennzahlen und entwickelte Methoden</li> <li>• Praxisanwendung: Präsentation der Fallstudienresultate (Thermischer Außenraumkomfort, Energiebedarfe, Ökobilanz)</li> </ul>
16:20	<b>Abschlussdiskussion</b> mit Kommunen, Wissenschaft und Wirtschaft
17:00	Ausblick und Verabschiedung
17:15	Ende der Online-Konferenz



**ONLINE  
ABSCHLUSSVERANSTALTUNG**

**NACHVERDICHTUNG IM KONTEXT  
DES KLIMAWANDELS**

Der anhaltende Zuzug in bayerischen Städten geht mit einer gesteigerten Nachfrage nach Wohnraum einher. Parallel dazu steigt die Dringlichkeit von **Klimaschutz und Klimaanpassung**. Dadurch entstehende **Flächenkonkurrenzen** und notwendige intensive Abstimmungen mit allen Projektbeteiligten stellen eine Herausforderung für Kommunen sowie Eigentümerinnen und Eigentümer dar. Das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz geförderte Projekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“ hat daher in den vergangenen drei Jahren ein **kollaboratives Planungstool** für **ressourceneffiziente und klimaresiliente** Lösungen in der Stadtplanung entwickelt und erprobt.

Im Rahmen der Online-Abschlussveranstaltung werden die Ergebnisse des interdisziplinären Forschungsprojektes vorgestellt. Die Veranstaltung führt in zwei Blöcken durch die ermittelten Anforderungen aus der **kommunalen und planerischen Praxis**, die Entwicklung der **Simulationen** und das Feedback aus dem weiterführenden **Praxistest** des Planungstools.

Online-  
Registrierung



Hier klicken

Anhang 16: Feedback zum Projekt, welches im Zuge der Abschlussveranstaltung eingeholt wurde

Unbedingt weiterentwickeln! Vielen Dank!

Veranstaltung war super. Der Tisch hat auch mich begeistert. Eine Entwicklung für allg. Abwägungen bleibt spannend. Dankeschön

Herzlichen Dank für diesen sehr interessanten Ergebnisbericht und den Ausblick, den ich als richtig und wichtig unterstreichen darf.

Die vorgestellte cdp scheint bahnbrechend zur Vereinfachung und Darstellung der verschiedenen zu berücksichtigenden Belange. Gerade die Verknüpfung der Realität mit der virtuellen Darstellung scheint das ganze bedienfreundlich zu machen.

Thema und Tool trifft absolut den aktuellen Bedarf in der Immobilienwirtschaft. Würde mir Wünschen, die für uns tätigen Planer könnten bereits darauf zugreifen.

Aus Sicht d. Landesplanung erscheint d. Einbettung d. Quartiersbezogenen Betrachtung in einen regionalen Kontext gerade was großräumige Luftaustausch Beziehungen betrifft noch von Bedeutung. Tool wird sicher in

Als Mitarbeiterin der Verwaltung nehme ich v.a. mit, dass es wichtige Tools gibt, die die Arbeit in der Planung erleichtern können und insbesondere auch wie wichtig es ist, Analysen durchzuführen, auch wenn diese viele Zeit in Anspruch nehmen.

Das Thema wird weiter interessant und brisant sein müssen.

Ich habe viele neue Impulse bekommen und werde die neuen Ideen versuchen in meinen Stellungnahmen zur Stadtplanung aus gesundheitlicher Sicht mitzunehmen. Das Tool nicht nur auf Umwelt beziehen sondern auf Soziales und Gesundheit, wäre mir wichtig

Bravo! für die inhaltliche Vermittlung, die bravurös gemanagt war. Dank professioneller Formate (Q&A mit Feedback, Menti, Links im Chat! ect.). Sehr gute Interaktion. Glückwunsch zum Ergebnis. Gerne mit mehr konkreten Fallbeispielen im Endbericht.