

Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels

Digitale Planungsmethoden

- Handreichung für Kommunen und Planende -



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Technische
Universität
München



Impressum

Herausgeber

Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München

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

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung
Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit

Lehrstuhl für Architekturinformatik
Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold

Bearbeitung

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

Wissenschaftliche Hilfskräfte

Theresa Dehmel
Sophie Ebert
Ruxandra-Ioana Eftenie
Andrés Espinosa
Laura Lerner
Romy Weller

Finanziert durch

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München

Stand: März 2023

Inhaltsverzeichnis

Einleitung zum Forschungsprojekt	-01-	
1. Nachverdichtung und Klimawandel	-03-	
2. Klimaorientierte Planung mit digitalen Werkzeugen	-07-	
2.1 Einsatzmöglichkeiten digitaler Werkzeuge	-08-	
2.2 Überblick vorhandener Planungstools	-09-	
2.3 Auswahl weiterer digitaler Planungshilfen	-11-	
3. Kennzahlen zur Bewertung von Entwürfen	-13-	
3.1 Thermischer Außenraumkomfort	-15-	
3.2 Thermischer Innenraumkomfort	-17-	
3.3 Energiebedarf	-19-	
3.4 Ökologische Lebenszyklusanalyse	-21-	
4. Entwickelte digitale Methoden	-23-	
4.1 CDP zur kollaborativen Planung	-24-	
4.2 Energiemodell für große Gebäudebestände	-26-	
4.3 Voxelmethode für Verschattung	-27-	
5. Beispielhafte Anwendung in einer Fallstudie	-29-	
5.1 Thermischer Außenraumkomfort	-32-	
5.2 Energiebedarf	-34-	
5.3 Ökobilanz	-36-	
5.4 Gesamtbewertung der Fallstudienresultate	-37-	
6. Ausblick und Handlungsempfehlungen	-41-	
Glossar	-45-	
Quellenverzeichnis	-47-	

Grußwort
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt
und Verbraucherschutz



Liebe Leserin, lieber Leser,

unsere Städte sind von den Folgen des Klimawandels besonders betroffen. Sommerliche Hitzeperioden, Trockenheit und Unwetterereignisse sind Herausforderungen für die Gesundheit der Menschen und die Stadtnatur. Hinzu kommt der anhaltende Zuzug in die Städte und die steigende Nachfrage nach Wohnraum, woraus sich die Notwendigkeit einer baulichen Nachverdichtung des Gebäudebestands ergibt.

Es ist deshalb grundlegend wichtig, sich klug und frühzeitig auf die Folgen des Klimawandels in unseren Städten vorzubereiten. Dies gelingt durch die Integration von grüner und blauer Infrastruktur in die Planungen und durch innovative Maßnahmen zu Klimaschutz und Klimaanpassung.

Die vorliegende Handreichung für Kommunen und Planende mit dem Titel „Digitale Planungsmethoden“ möchte dabei unterstützen. Die zentrale Botschaft lautet: „Die klimaresiliente Stadt der Zukunft atmet frische Luft mit grünen Lungen!“ Eine Nutzung natürlicher Ökosystemleistungen ist ein wesentlicher Schlüssel für urbane Lebensqualität im Klimawandel: Stadtbäume und Grüngürtel spenden Schatten, kühlen und befeuchten die Luft. Grünflächen bieten Retentionsbereiche für Starkregen und sind ein Refugium für die Artenvielfalt. Neben Klimaverbesserung und Hochwasserschutz entstehen attraktive urbane Naherholungsgebiete – Flora, Fauna und Menschen gewinnen!

Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung an der Technischen Universität München (TUM) hat im Rahmen der angewandten Klimaforschung und in Zusammenarbeit mit Kommunen und Planenden eine Simulationsmethode entwickelt. Die innovative und praxistaugliche Methode spart Zeit für aufwändige Berechnungen. Sie zeigt Nutzerinnen und Nutzern auf anschauliche Weise, wie nachhaltige und klimaangepasste Nachverdichtung gelingen kann. Und sie ist vielseitig anwendbar: Von Insellösungen bis zu einem vernetzten und integrierten Ansatz als Lösung für Wohnbedarf im Quartier, mit Einbezug der grünen Infrastruktur und deren Ökosystemleistungen und zusammen mit der Öffentlichkeit und den Entscheidern.

Mein Dank gilt dem Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung und den beteiligten Lehrstühlen der TUM, unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, Herrn Prof. Dr. Stephan Pauleit und Herrn Prof. Dr. Frank Petzold sowie den jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern.

Bis 2040 soll Bayern klimaneutral werden, so sieht es das Bayerische Klimagesetz vor. Ich bitte Sie herzlich: Arbeiten Sie engagiert daran mit – ohne unsere Städte und Gemeinden geht es nicht! Sie können dabei auf staatliche Unterstützung und Förderung zum Beispiel für kommunales Energie- und Klimamanagement bauen.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre!

Staatsminister Thorsten Glauber, MdL

Grußwort

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung



Sehr geehrte Damen und Herren,

der Klimawandel erfordert ein grundlegendes Neudenken der Stadtentwicklung, denn Städte sind eine Hauptursache von Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig spüren Städte immer mehr die Folgen des Klimawandels - besonders durch zunehmende Hitzebelastungen der Bevölkerung oder auch Starkregenereignisse, die die Kanalisationen überlasten.

Das Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung unterstützt seit 2013 eine klimaresiliente Stadtentwicklung durch angewandte Forschungsprojekte. In Leitfäden und Forschungsberichten werden die kommunalen Handlungsmöglichkeiten konkret aufgezeigt. Im Mittelpunkt stehen dabei die Potenziale der grünen Infrastruktur: für die Kühlung der Städte, eine naturnahe Regenwasserbewirtschaftung und die Förderung der Biodiversität in Freiflächen, die zur Lebensqualität und menschlichen Gesundheit in Zeiten des Klimawandels wesentlich beitragen.

Mit dem Forschungsprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“ hat das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung digitale Methoden und ein Planungswerkzeug entwickelt, um Klimaschutz und Klimaanpassung umfassend und frühzeitig in Planungsprozesse zu integrieren. Bauliche Nachverdichtung schafft neuen Wohnraum, erhöht die Energieeffizienz und fördert eine Stadt der kurzen Wege. Sie bedeutet aber auch steigenden Druck auf die Grünflächen, die als grüne Infrastruktur für die Klimawandelanpassung unbedingt erforderlich sind. Kann man diesen Konflikt durch kluge Planung auflösen?

Die Collaborative Design Platform (CDP) ermöglicht es, Planungsalternativen in Echtzeit hinsichtlich der Auswirkungen auf die Energieeffizienz des Gebäudebestands in einer Lebenszyklusbetrachtung zu überprüfen, und gleichzeitig den thermischen Komfort im Außenraum zu bewerten – und zwar zu einem sehr frühen Zeitpunkt. Die interaktive CDP fördert vor allem die Zusammenarbeit zwischen den Planungsbeteiligten. Zwar ist die CDP noch ein Prototyp, aber die Methoden zur Simulation und Visualisierung der Planungsszenarien stehen frei zur Verfügung. Diese Handreichung zeigt, was sie leisten und wie sie verwendet werden können. Sie ist damit ein wichtiger Schritt zu einer smarten und grünen Stadtentwicklung, wie wir sie jetzt dringend benötigen.

Prof. Dr. Stephan Pauleit, Leitung ZSK

Einleitung zum Forschungsprojekt

Städte sind gegenüber den Folgen des Klimawandels besonders verletzlich. Um die Klimaresilienz der Städte zu stärken, muss ein besseres und systematischeres Verständnis der Auswirkungen von Planungs- und Bauprozessen auf das Klima in der Stadt entwickelt werden. Bauliche Nachverdichtung ist aus einer ganzheitlichen, klimaresilienten und ressourcenschonenden Perspektive zu planen und durchzuführen – deshalb sind Grünflächengestaltung, Mikroklima- und Lebenszyklusanalysen sowie Materialeinsatz früh in die Planungsprozesse zu integrieren. Auf Grundlage digitaler 3D-Stadtmodelle wurden in dem Forschungsprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“ Simulations- und Visualisierungsmethoden entwickelt, die diese Aspekte integrieren.

So soll in kommunalen Abwägungsprozessen die Bewertung von Planungsalternativen erleichtert werden. Diese Handreichung stellt in komprimierter Form die entwickelten Methoden vor, die an einem realen Fallbeispiel getestet und in Workshops mit Planungspraktiker:innen verfeinert wurden. Zudem werden weiterführende Hinweise und Handlungsempfehlungen für Kommunen und Planende gegeben. Das Projekt wurde am Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) durchgeführt und vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz gefördert.



Dauer

von Januar 2019
bis März 2023



Beteiligte

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges
Planen und Bauen

Lehrstuhl für Strategie und Management der
Landschaftsentwicklung

Lehrstuhl für Architekturinformatik



Ziele

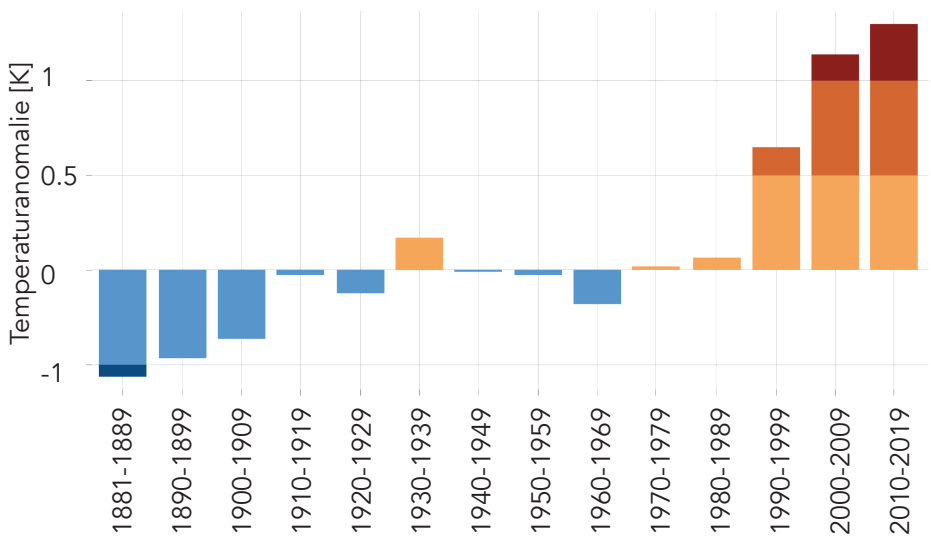
klimaorientierte Nachverdichtung
kollaborative Planungsmethoden

01

**Nachverdichtung
und Klimawandel**

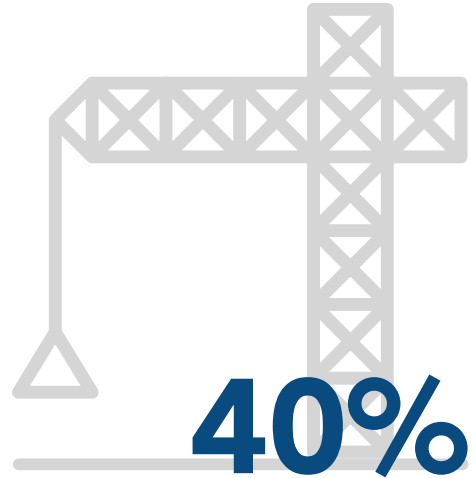
Die folgenden Infographiken zeigen die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs auf. Die Folgen des Klimawandels sind in Deutschland bereits heute zu spüren. Die Zahl der Hitzetage (mindestens 30 °C Lufttemperatur) im Jahr ist im Zeitraum von 1951 bis 2018 von 3 auf 10 °C gestiegen (DWD, 2019), vor allem in den letzten Jahrzehnten sind deutliche Temperaturabweichungen zu beobachten (siehe Abbildung). In den Jahren 2003, 2006 und 2015 wurden insgesamt 19.500 hitzebedingte Todesfälle registriert (UBA, 2019). Vegetationsperioden haben sich verlängert, Starkregenereignisse haben seit 1951 um 7 % zugenommen (DWD, 2019), während gleichzeitig niedrige Grundwasserstände immer häufiger werden (UBA, 2019). In der Siedlungsentwicklung ist es damit zwingend notwendig, Städte an Hitze, Starkregen und Trockenheit anzupassen.

Temperaturanomalie der 10-Jahresperioden in Deutschland*



*Referenzzeitraum: 1961-1990

Abweichung der Temperatur vom vieljährigen Mittel 1961-1990 für 10 Jahresperioden in Deutschland (Quelle: Kaspar & Friedrich, 2020)

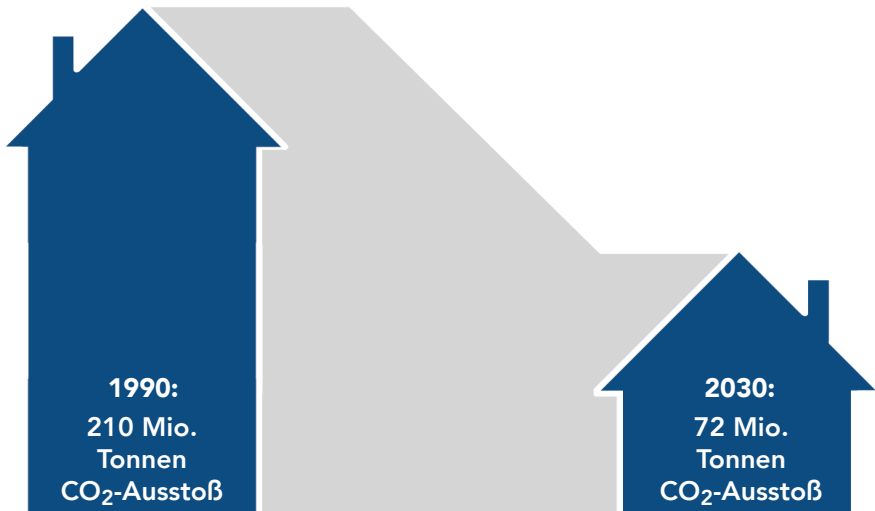


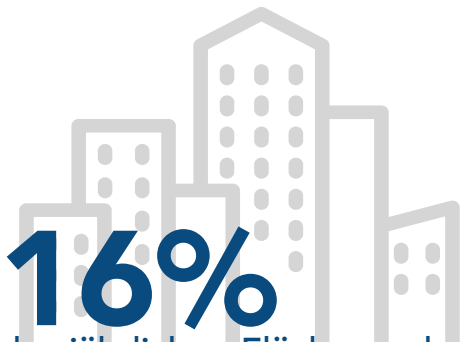
40%
der Treibhausgasemissionen in Deutschland
sind auf die Herstellung und den Betrieb von
Gebäuden zurückzuführen.

Quelle: BBSR, 2020

Reduktionsziele CO₂

Quelle: Bundesregierung, 2020



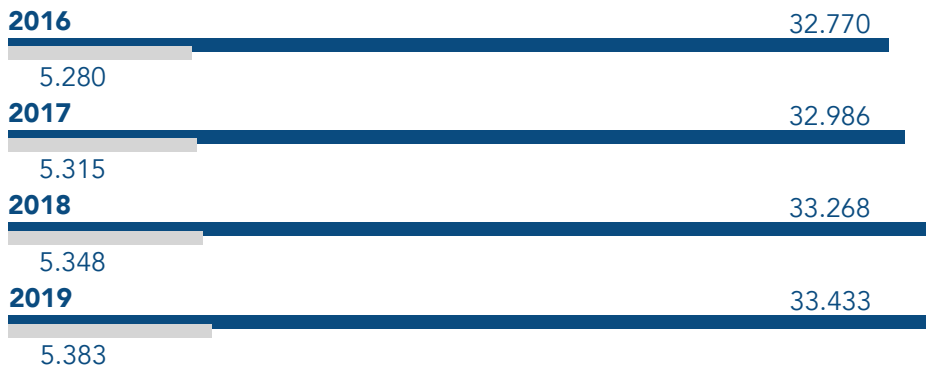


des jährlichen Flächenverbrauchs für Siedlungs-
entwicklung in Deutschland fällt in Bayern an.

Quelle: Destatis, 2020

Leitbild doppelte Innenentwicklung

- Reduzierung der Flächenneuanspruchnahme
- Erhalt und Weiterentwicklung von urbanem Grün



■ Deutschland

■ Bayern

Jährlicher Flächenverbrauch für Siedlungsentwicklung von 2016 bis 2019,
Angabe in km².

Quelle: Destatis, 2020

02

**Klimaorientierte Planung
mit digitalen Werkzeugen**

Digitale Werkzeuge können dazu beitragen, relevante Informationen und komplexe Zusammenhänge in Bezug auf den Klimawandel als Entscheidungsgrundlage für Planende und Verwaltung zur Verfügung zu stellen. Eine Erweiterung kollaborativer, digitaler Methoden wird auch durch den Trend vorangetrieben, dass interaktive Beteiligungsprozesse zunehmend in Planungsprozesse integriert werden.

2.1 Einsatzmöglichkeiten digitaler Werkzeuge

Die Potenziale der Digitalisierung können genutzt werden, um den komplexen Herausforderungen von Nachverdichtung zu begegnen. 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 Siedlungsstrukturen erarbeitet werden.

Digitale Planungswerkzeuge gewinnen insbesondere bei Eingriffen in bestehende Wohnbebauung an Bedeutung. So können beispielsweise Bedarfe und Potenziale erkannt werden, indem Betroffene gezielt und frühzeitig aktiv einbezogen werden. Dies ermöglicht den Betroffenen sich im Idealfall mit den Baumaßnahmen und angestrebten Entwicklungen zu identifizieren. Hindernisse und Barrieren können somit frühzeitig überwunden und spätere Konflikte vermieden werden.

Planer:innen setzen rechnergestützte Software häufig erst in späten Planungsphasen ein. Gerade in frühen Planungsphasen, d.h. bei Grundlagenermittlung, Testentwürfen und Auslobung von städtebaulichen Wettbewerben, bestehen jedoch die größten Möglichkeiten, Klimaschutz und -anpassung in die Planung zu integrieren. Die Auswirkungen verschiedener Szenarien können frühzeitig getestet und Leitlinien für die weitere Entwicklung definiert werden. In späteren Planungsphasen können konkrete Entwürfe miteinander verglichen und ihr Abschneiden im Hinblick auf Klimaziele bewertet werden.

2.2 Überblick vorhandener Planungstools

Folgende Planungstools existieren bereits, die Klima- und Umweltfaktoren in die Stadtplanung integrieren oder auf eine verstärkte Beteiligung setzen:



CityScope

CityScope bietet verschiedene greifbare und digitale Plattformen an, die zur Lösung von baulichen, sozialen, klimatischen und weiteren Herausforderungen in der Raumgestaltung und Stadtplanung beitragen sollen. Simulationen können die Auswirkungen von störenden Eingriffen quantifizieren, andere Werkzeuge fördern beispielsweise die kommunikative Zusammenarbeit. Die primären Zielgruppen von CityScope sind Planer:innen und Jurys städtebaulicher Wettbewerbe. CityScope wurde von einer Forschungsgruppe am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt (Larson et al., 2018).

Online verfügbar unter: <https://www.media.mit.edu/projects/cityscope/overview/>



COUP (Cockpit for Collaborative Urban Planning) ist eine interaktive Toolbox von Analyse- und Simulationswerkzeugen zur Bewertung von Stadtszenarien und steht zur Anwendung in der Stadtentwicklung und Stadtforschung zur Verfügung. Die Toolbox ermöglicht es Planungsbüros, bereits im Entwurfsprozess einen Performance-Check durchzuführen und zu zeigen, wie sich physikalische Parameter wie Verkehrslärm, Windkomfort, Sonneneinstrahlung, Regenwasserabfluss, Flächennutzung und Fußgängerbewegung im Entwurf verhalten. Vorteile sind eine objektive Vergleichbarkeit in Wettbewerben und eine Verkürzung langer Entscheidungsprozesse auf wenige Stunden oder sogar Minuten. COUP wurde gemeinsam mit dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) und den beteiligten Planungs- und Beratungsbüros konzipiert und soll zukünftig auch soziokulturelle und sozialräumliche Parameter berücksichtigen.

Online verfügbar unter: https://www.detail.de/de/de_de/cockpit-for-collaborative-urban-planning

Consul ist eine digitale Open Source-Plattform und kann als frei modifizierbares Bürger:innenbeteiligungsinstrument eingesetzt werden. Consul unterstützt partizipative Prozesse, wie Debatten, Bürger:innenhaushalte, kollaborative Gesetzesverfahren, Umfragen und Abstimmungen. In verschiedenen Foren können Bürger:innen und Politiker:innen zu unterschiedlichen Themen diskutieren. Die Plattform ist flexibel und auch für komplexe Beteiligungsprozesse oder umfassende institutionelle Pläne einsetzbar. Die Nutzung der Plattform ist kostenlos.

Online verfügbar unter: <https://consulproject.nl/de/>

DIPAS für digitale Bürgerbeteiligung

DIPAS (Digitales Partizipationssystem) ist ein integriertes digitales System zur Bürger:innenbeteiligung. Es besteht aus einer Online- und Onsite-Komponente. Die Online-Komponente ermöglicht es Bürger:innen internetgestützt Kommentare und Vorschläge zu Entwicklungen in der Stadt abzugeben, die räumlich verortet werden können. Die zweite Komponente unterstützt Präsenzveranstaltungen durch digitale Stadtmodelle, die auf einer Touch-Bedienoberfläche dargestellt werden können. DIPAS wurde für die Stadt Hamburg entwickelt und wird dort seit 2016 bei Beteiligungsverfahren eingesetzt. Als Open Source-Projekt kann DIPAS aber auch in andere Kommunen übertragen und genutzt werden.

Online verfügbar unter: <https://dipas.org>



SimStadt 2.0

SimStadt 2.0 ist eine 3D-Simulationssoftware für urbane Energiesysteme, die für die Analyse und Auslegung von Versorgungssystemen einzelner Gebäude bis ganzer Regionen verwendet wird. Die Software kann Daten einer realen städtebaulichen Situation nutzen, wodurch schon im Planungsprozess belastbare Aussagen über Entwicklungsszenarien getroffen werden können. Der Anwendungsbereich umfasst den Gebäudeheizwärmebedarf, Potenzialstudien für Photovoltaik sowie Simulationen von Gebäudesanierungs- und erneuerbarer Energieversorgungsszenarien. Vorteile sind die Effizienz und Kosteneinsparungen sowie eine bessere Einbindung der Bürger:innen.

Online verfügbar unter: <https://www.hft-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/simstadt-20>

2.3 Auswahl weiterer digitaler Planungshilfen

Für Planung von Nachverdichtungsvorhaben

Beschreibung

Einstufung

Flächenmanagement-Datenbank

- Planungshilfe zur Erfassung und Verwaltung von potenziellen Bauflächen
 - Downloadbare ZIP-Datei
 - Frei verfügbar
- Fokussiert auf Flächen und Baulücken
 - Berücksichtigt keine Klimaaspekte

Online verfügbar unter: LfU, 2011/12;

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

Folgekosten-Schätzer

- Planungshilfe zur Abschätzung der Infrastrukturfolgekosten von Wohngebieten
 - Downloadbare ZIP-Datei
 - Frei verfügbar
- Fokussiert auf Kosten
 - Berücksichtigt keine Klimaaspekte

Online verfügbar unter: LfU, 2011/12;

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

Für klimaorientierte Planung

Beschreibung

Einstufung

AKUT

- Planungshilfe zur kommunalen Überflutungsvorsorge
- Ermittlung von lokalen Gefährdungslagen und Maßnahmenvorschlägen
- Frei verfügbar
- Abschätzung der Betroffenheit von Starkregen
- Geringe Datenanforderungen
- Keine Aussagen zu Hitze/Klimaschutz

Online verfügbar unter: Hochschule Mainz, 2022;
<https://www.hs-mainz.de/microsites/technik/akut/tool/>

GreenScenario

- Simulationsplattform zum Vergleich verschiedener Planungsszenarien
- Kostenpflichtig
- Klimaparameter explizit berücksichtigt
- Berechnungsmethode unklar
- Detaillierte Analyse möglich

Online verfügbar unter: Ramboll;
<https://de.ramboll.com/greenscenario>

Stadtklimalotse

- Entscheidungshilfe für die Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen für die Klimawandelanpassung
- Maßnahmenkatalog und Good-Practice Datenbank
- Frei verfügbar
- Keine räumlichen, lokal-spezifischen Analysen
- Gut zur Sammlung erster Anregungen

Online verfügbar unter: BBSR, 2018/19;
<https://plan-risk-consult.de/stadtklimalotse/>

03

**Kennzahlen zur Bewertung
von Entwürfen**

Kennzahlen sind wichtige und relevante Werte, die in Planungen Hinweise darauf geben, mit welchen Auswirkungen und Veränderungen zu rechnen ist und welche Variante im Vergleich besser abschneidet. Im Hinblick auf energieeffiziente Quartiere und klimaangepasste Städte sind Angaben zu Energiebedarf und Treibhausgasemissionen sowie zu Klimawandelfolgen (Temperaturempfinden im Innen- und Außenraum) besonders relevant. Die lebenszyklusbasierte Bewertung von Gebäuden bildet dabei einen wichtigen Baustein, um die Einhaltung von Klimaschutzziele nachzuweisen und Klimawandelauswirkungen zu reduzieren. Auf den folgenden Seiten werden ausgewählte Kennzahlen mit ihren wichtigsten Einflussgrößen vorgestellt, die das Planungstool CDP darstellen kann:

**Thermischer
Außenraumkomfort**

Energiebedarf

**Thermischer
Innenraumkomfort**

Ökobilanz

Je früher die genannten Kennzahlen in der Objekt- oder Quartiersplanung berücksichtigt werden, desto besser können sie in Planungsprozesse integriert werden und zu einer klimaresilienten Stadtplanung und -entwicklung beitragen. Neben den genannten Kennzahlen sind für die Klimaorientierung zahlreiche weitere Aspekte von Bedeutung. Hierzu zählen beispielsweise die Anpassung an Starkregenereignisse oder der Erhalt von Biodiversität.

3.1 Thermischer Außenraumkomfort



Definition

Thermisches Wohlbefinden des Menschen im Außenraum



Hintergrund Klimarelevanz

Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Hitze und steigende Hitzebelastung durch Klimawandel

> Für weiterführende Informationen s. Quellenverzeichnis, Seite 50.

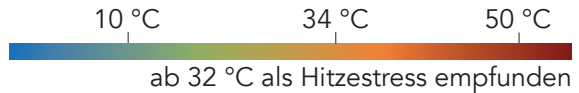
i

Vulnerable Bevölkerungsgruppen

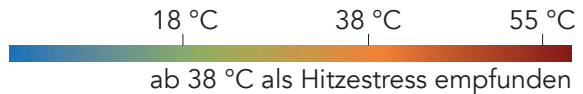
Ältere Menschen, Kleinkinder und Menschen mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen sind von Hitzewellen besonders betroffen.

Kennzahlen:

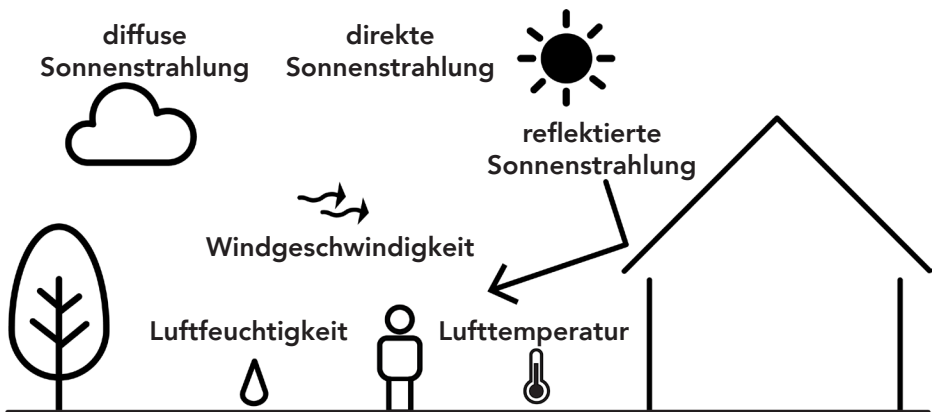
Universeller Thermischer
Klimaindex (UTCI)



Physiologisch Äquivalente
Temperatur (PET)



Einflussfaktoren auf den thermischen Außenraumkomfort



Eingriffsmöglichkeiten zur Optimierung des thermischen Außenraumkomforts

- Verschattung von hitzeanfälligen Bereichen
- Erhalt von Durchlüftungsachsen
- Anpassung Gebäudestellung an lokales Mikroklima
- Erhöhung Grünanteil und strategische Platzierung von Grün

Daten

Je nach Detaillierungstiefe des Modells unterschiedliche Anforderungen

- Wetterdaten: DWD-Stationen
- Gebäude: z.B. CityGML, beziehbar über Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
- Geoinformationssysteme, weitere 3D-Stadtmodelle
- Flächennutzung: BayernAtlas
- Bestandsvegetation: Baumkartierungen, Kataster

Methoden und Werkzeuge

- Voxelmethode
- Urban Weather Generator
- Mikroklimamodelle: z.B. ENVI-met (kommerzielle Software)

Betrachtungszeitraum

- Typischerweise Betrachtung einer Belastungssituation, d.h. Analyse eines wolkenarmen, windschwachen Hitzetages (Lufttemperatur $>30\text{ °C}$)
- Gegenüberstellung der Tag- und Nachtsituation

Mögliche Veränderungen durch Nachverdichtung

- Erhöhte Gebäudedichte
- Erhöhter Versiegelungsgrad
- Verringerung des Grünbestandes
- Blockierung von Frischluftkorridoren

Negative Auswirkungen auf den thermischen Außenraumkomfort durch

- Verringerung der Durchlüftung
- Verringerte Verschattung am Tag
- Geringere nächtliche Abkühlung

3.2 Thermischer Innenraumkomfort



Definition

Thermisches Wohlbefinden des Menschen im Innenraum



Hintergrund Klimarelevanz

Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Hitze und steigende Hitzebelastung durch Klimawandel, insbesondere aufgrund mangelnder nächtlicher Abkühlung

> Für weiterführende Informationen s. Quellenverzeichnis, Seite 50.

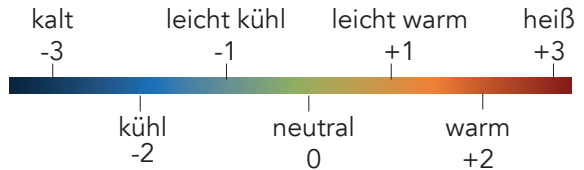
i

Besonders betroffene Gebäude

Thermisch unkomfortable Situationen in Innenräumen werden beispielsweise durch große Fensterflächen (insbesondere nach Süden) und fehlende Verschattungsmaßnahmen hervorgerufen. Davon sind Innenstadtlagen besonders betroffen, da dort die Hitze in Baumassen gespeichert und nachts weiter abgegeben wird, wodurch nächtliche Temperaturunterschiede von bis zu 10 Kelvin im Vergleich zum Umland entstehen können (Shandas et al., 2019).

Kennzahlen:

Predicted Mean Vote
(PMV)



Potenzieller Kühlbedarf

Zur Vorhersage in Zukunft zu erwartender Kühlbedarfe, sofern Klimaanlage verbaut werden.

Betrachtungszeitraum

Es können sowohl Auswertungen für spezifische, besonders unangenehme Zeiträume erfolgen, als auch Auswertungen über das Gesamtjahr.

Eingriffsmöglichkeiten zur Optimierung des thermischen Innenraumkomforts von Gebäuden

- Bäume im Außenraum zur Verschattung
- Fassadengrün zur Verschattung
- Sonnenschutzverglasung
- Außenliegender Sonnenschutz
- Monitoring im Betrieb, um Schwachstellen zu identifizieren

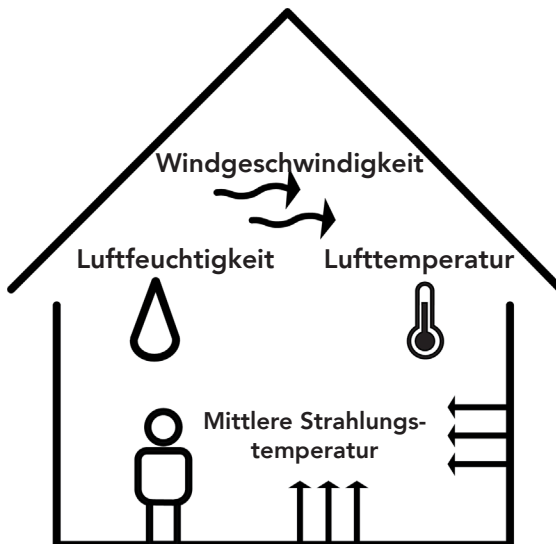
Daten

- Gebäudebestand: TABULA Gebäude-typologie
- Grenzwerte und Normen: DIN 4108-2, DIN V 18599-10, DIN V 4108-6, DIN V 4701-10

Methoden und Werkzeuge

- Berechnung nach Normen
- Thermisch-dynamische Simulation (detaillierte Berücksichtigung von z.B. Nutzer:innen, Verschattungen, Außenraum)
- Energiemodell für potenziellen Kühlbedarf

Einflussfaktoren auf den thermischen Innenraumkomfort



3.3 Energiebedarf



Definition

Zum Betrieb eines Gebäudes (Heizung, Lüftung, Warmwasser, Beleuchtung, ggf. Kühlung) notwendige Energiemenge



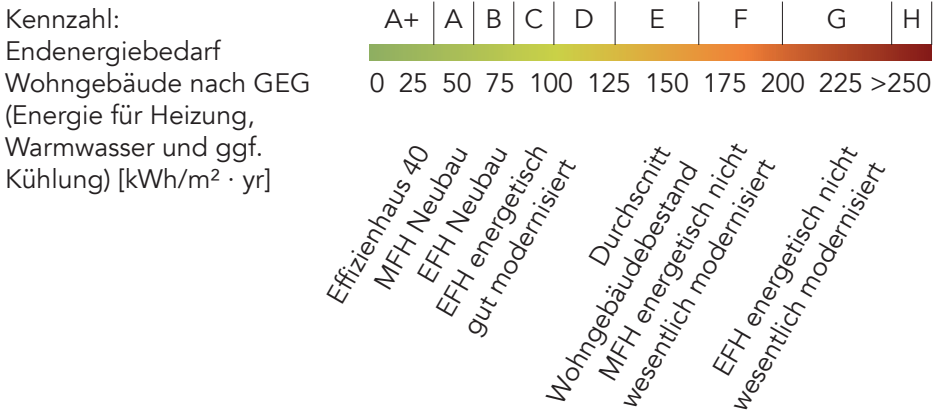
Hintergrund Klimarelevanz

Die Energie zum Betrieb von Gebäuden stellt nach wie vor einen der Haupttreiber von Treibhausgasemissionen dar und sollte daher möglichst minimiert werden.

> Für weiterführende Informationen s. Quellenverzeichnis, Seite 50.

Energie für Heizen und Kühlen?

Im deutschen Wohngebäudebestand sind Klimageräte nur wenig verbreitet. Durch den voranschreitenden Klimawandel ist aber künftig mit einem Anstieg der potenziellen Kühlbedarfe zu rechnen. Es gilt daher, diesen Bedarf so gering wie möglich zu halten, um die Anschaffung solcher Anlagen und ihren Betrieb zu minimieren, da dieser mit zusätzlichen Energiebedarfen und damit Treibhausgasemissionen verbunden wäre. Siehe hierzu auch 3.2 Thermischer Innenraumkomfort.



Betrachtungszeitraum

Die benötigte Energiemenge wird jährlich und je Quadratmeter Wohn- oder Nutzfläche angegeben.

Eingriffsmöglichkeiten zur Optimierung des Endenergiebedarfs von Bestandsgebäuden

- Wärmerückgewinnung
- Hoher Energiestandard
- Effiziente Leuchtmittel
- Sanierung Warmwasserverteilung
- Energieträger mit geringen Emissionen
- Hydraulischer Abgleich Heizungsanlage
- Verbesserung Luftdichtigkeit

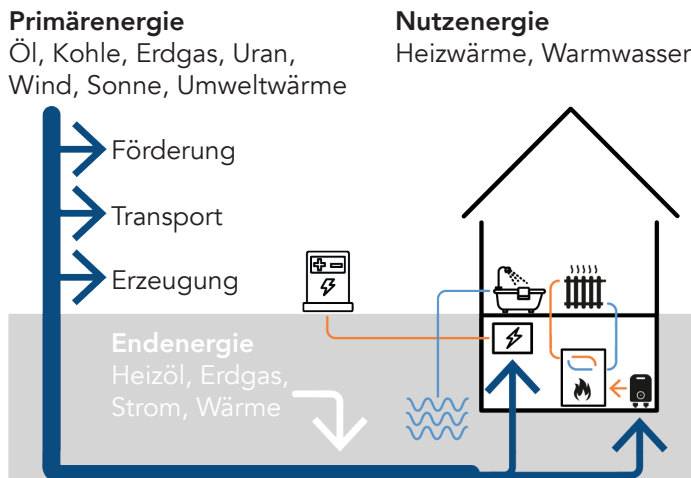
Daten

- Gebäudebestand: TABULA Gebäude-typologie
- Grenzwerte und Normen: Energieausweise des Gebäudeenergiegesetzes (GEG), DIN V 18599-10, DIN V 4108-6, DIN V 4701-10

Methoden und Werkzeuge

- Berechnung nach GEG und Normen
- Thermisch-dynamische Simulation für komplexe Situationen (detaillierte Berücksichtigung von z.B. Nutzer:innen, Verschattungen, Energieerzeugung)
- Energiemodell für potenziellen Kühlbedarf
- Sanierungskonfigurator des Bundes

Begriffsunterscheidung Energiebezeichnungen



3.4 Ökologische Lebenszyklusanalyse



Definition

Erfassung der Umweltwirkungen von Gebäuden über deren gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Betrieb, Rückbau)



Hintergrund Klimarelevanz

Treibhausgasemissionen entstehen nicht nur beim Betrieb, sondern auch im Zuge der Herstellung und dem Rückbau von Gebäuden. Eine ganzheitliche Bewertung ist daher zwingend notwendig, um Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

> Für weiterführende Informationen s. Quellenverzeichnis, Seite 51.

Bezeichnung und Anwendung

Die ökologische Lebenszyklusanalyse wird auch als Ökobilanz oder eLCA (ecological Life Cycle Assessment) bezeichnet. Die Einhaltung von Grenzwerten der lebenszyklusbasierten Treibhausgasemissionen ist im Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) als Voraussetzung zum Erhalt staatlicher Förderungen für Bauvorhaben festgesetzt.

Kennzahlen:

Treibhausgasemissionen
[kgCO₂eq/m² · yr]

QNG Siegel-Premium: 20 kgCO₂/m² · yr
QNG Siegel-Plus: 28 kgCO₂/m² · yr

Nicht erneuerbare
Primärenergie
[kWh/m² · yr]

QNG Siegel-Premium: 68 kWh/m² · yr
QNG Siegel-Plus: 96 kWh/m² · yr

Weitere Kennzahlen

- Ozonabbaupotenzial (ODP) [kgR₁₁-eq]
- Versauerungspotenzial (AP) [kgSO₂-eq]
- Eutrophierungspotenzial (EP) [kgPO₄-eq]
- Bodennahe Ozonbildung (POCP) [kg C₂H₄-eq]

Betrachtungszeitraum

Gebäudeerstellung, Nutzung sowie Rückbau, in der Regel 50 Jahre

Lebenszyklusphasen



Wirkung von Nachverdichtung auf lebenszyklusbasierte Treibhausgasemissionen eines Quartiers

- Verlängerung Nutzungszeit Bestand: keine Emissionen aus Bestandsabriss, Verringerung Neubautätigkeit
- Kombination mit Sanierung möglich
- Aufstockungen: energetisch oft vorteilhaft, keine Gründung notwendig
- Verschattung durch Gebäude und Grün: verringert die Notwendigkeit von Klimatisierung und damit Emissionen aus der Anschaffung von Klimageräten und deren Betrieb

Eingriffsmöglichkeiten zur Optimierung der Ökobilanz von Nachverdichtungsvorhaben

- Ökologische Materialauswahl
- Langlebige Konstruktionen
- Notwendigkeit von Bautätigkeiten hinterfragen (Suffizienz)
- Hoher Energiestandard
- Energieträger mit geringen Emissionen
- Baumbestand erhalten
- Gebäudebestand erhalten
- Begrünungsmaßnahmen

Daten

- Gebäudebestand: TABULA Gebäudetypologie
- Ökobilanzdatensätze: Ökobaudat oder Environmental Product Declaration (EPD) der Hersteller:innen
- Gebäudemodelle: CityGML, beziehbar über Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

Methoden und Werkzeuge

- eLCA - Bilanzierungstool des Bundes
- Kommerzielle Software: CAALA, SimaPro

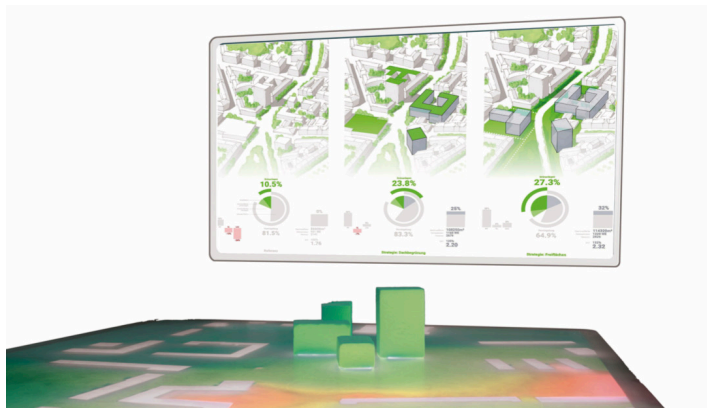
04

**Entwickelte
digitale Methoden**

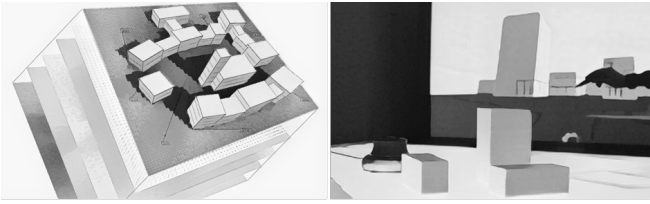
Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden eigene digitale Methoden zur kollaborativen Planung und Echtzeitsimulation entwickelt. In den folgenden Kapiteln werden die dafür verwendete Collaborative Design Platform (CDP) vorgestellt sowie die prototypisch implementierten und z.T. öffentlich zugänglichen Methoden für Energiesimulation sowie Außenraumkomfort erläutert.

4.1 CDP zur kollaborativen Planung

Die Collaborative Design Platform (CDP) wurde entwickelt, um die Bewertung von Planungsentscheidungen für die Projektentwicklung und kommunale Stadtentwicklungsprozesse zu verbessern. Sie ermöglicht relevante Analysen in Echtzeit darzustellen. Die CDP besteht aus einer Bedienoberfläche, die durch Berührungen gesteuert wird und Monitoren, die das Arbeitsmodell als digitalen 3D-Körper anzeigen (siehe Abbildung). Verschiedene Sensoren ermöglichen es, physische Interaktionen, wie Positionsänderungen von Gebäuden und Verformungen sowie Hinzufügen von Gebäuden in das digitale Modell zu integrieren. Veränderungen und Berechnungen werden in Echtzeit dargestellt. Dies ermöglicht direkte und objektive Rückschlüsse auf den Entwurf und bietet die Möglichkeit der Variantenoptimierung (Schubert, 2014; Petzold, 2017). Im Zuge des Forschungsprojekts wurde die CDP um Analysemethoden erweitert, die eine Bewertung der klimatischen Auswirkungen von Nachverdichtungsvorhaben (Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und städtisches Mikroklima) ermöglichen. Die Funktionen der Plattform sind auf der folgenden Seite beispielhaft dargestellt.



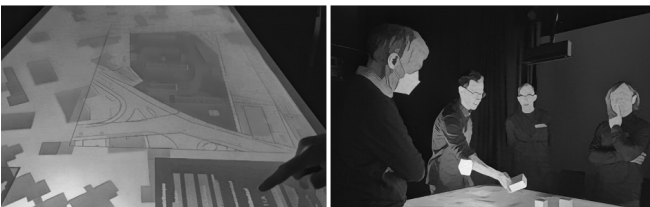
Collaborative Design Platform (CDP).



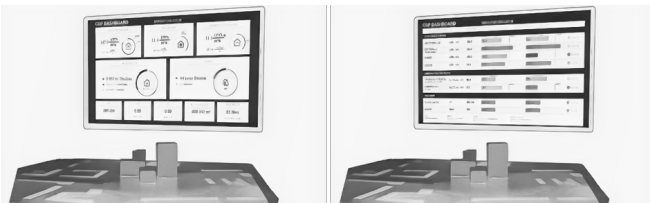
- [1] Überlagerung von Daten, um die Informationsdichte zu erhöhen.
 [2] Übertragung der Bauklötze in das 3D-Modell.



- [3] Das Untersuchungsgebiet kann durch Suchfunktion oder per Fingergesten geladen werden.
 [4] Arbeitsmodelle werden direkt in die CDP geladen und als Gebäude erkannt.



- [5] Über Menüfelder sind Informationen ein- und ausblendbar.
 [6] Diskussion mit Planungsbeteiligten unterschiedlicher Disziplinen.

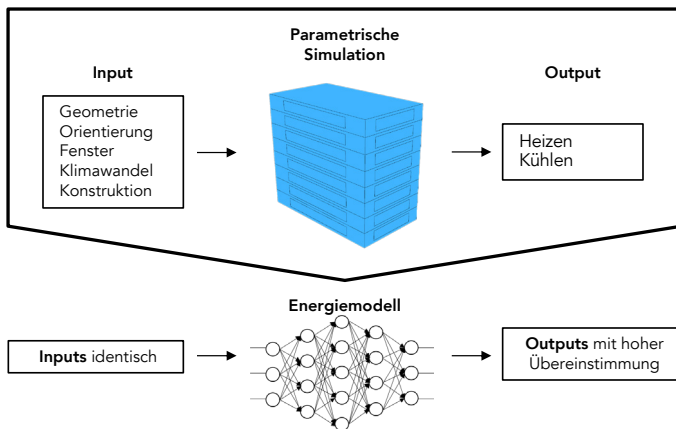


- [7] Auswertung von Kennzahlen zu einem Szenario.
 [8] Vergleich mehrerer Szenarien.

4.2 Energiemodell für große Gebäudebestände

Die Ermittlung des Energiebedarfs großer Gebäudebestände stellt eine Herausforderung für die Eigentümer:innen solcher Liegenschaften dar. Dabei müssen Genauigkeit und Simulationsaufwand abgewogen werden, um mit vertretbarem Aufwand belastbare Aussagen zu generieren. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Methodik zur Energiesimulation entwickelt und erprobt, welche auf Methoden der künstlichen Intelligenz beruht und für einen breiten Anwender:innenkreis zugänglich ist.

Das als eigenständiger Baustein veröffentlichte Energiemodell ist in der Lage, Aussagen hinsichtlich des Energiebedarfs für beliebige Modellkonfigurationen in Millisekunden zu treffen.



Aufbau des Energiemodells: Mehr als 20.000 parametrische Gebäudesimulationen dienen als Grundlage für dessen Erstellung. Anschließend können Outputs in Millisekunden abgerufen werden.

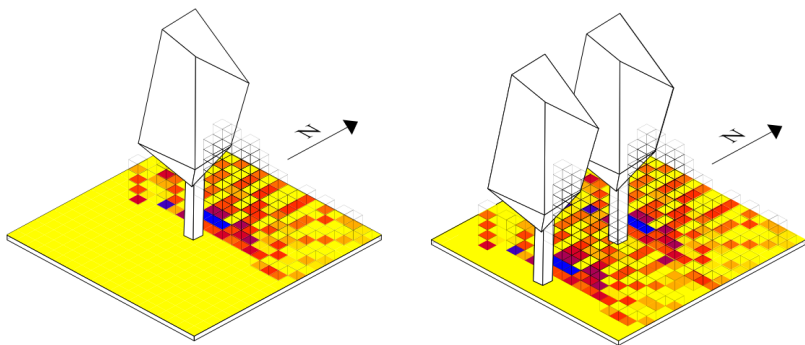
Mit dem Energiemodell können beispielsweise Planer:innen, Eigentümer:innen oder auch Kommunen die Auswirkungen zusätzlicher Verschattung oder von Sanierungen auf ihre Gebäudebestände abschätzen und so eine Entscheidungsunterstützung erhalten. Als Eingabeparameter sind unter anderem Gebäudeabmessungen, Energiestandard (ggf. aus Baujahr erschließbar), Fensterflächenanteile und Konstruktionstyp (leicht/massiv) notwendig. Weitere Angaben, etwa zur Ausrichtung oder zu umliegenden Objekten mit einer Verschattungswirkung auf die Gebäude, bleiben optional

und können zur Detaillierung der Ergebnisse eingesetzt werden. Nachdem die Eingangswerte eingegeben sind und die Berechnung abgeschlossen ist, werden Heiz- sowie Kühlbedarf der Gebäude ermittelt und Sanierungsszenarien aufgezeigt. Die Daten stehen zudem für weitere Auswertungen in Microsoft Excel zur Verfügung. Nähere Erklärungen und der Zugang zum Energiemodell finden sich auf der Homepage des Lehrstuhls für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) oder des ZSK unter Teilprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“.

Online verfügbar unter: <https://www.zsk.tum.de/zsk/die-teilprojekte-des-zsk/abgeschlossene-projekte/nachverdichtung-im-kontext-des-klimawandels/>
<https://www.cee.ed.tum.de/enpb/methoden-und-tools/quartier-und-stadtsimulation>

4.3 Voxelmethode für Verschattung

Neben Auswirkungen auf die Gebäude wurde im Rahmen des Projekts der thermische Außenraumkomfort an einem heißen Sommertag betrachtet (Bewertungskennzahl UTCI, siehe 3.1 Außenraumkomfort). Wie bereits für den Energiebedarf stellt auch für den Außenraumkomfort die Ermittlung von Ergebnissen in Echtzeit eine wesentliche Herausforderung dar. Hierfür wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, welches die zeitlich aufwändigen Schritte der Simulation vorverlagert und schnelle Ergebnisse während der Kollaborationsphase liefert. Als Bewertungskennzahl wurde der Universal Thermal Climate Index (UTCI) gewählt, welcher die gefühlte Temperatur unter Einbezug von Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit wiedergibt (siehe 3.1 Außenraumkomfort).

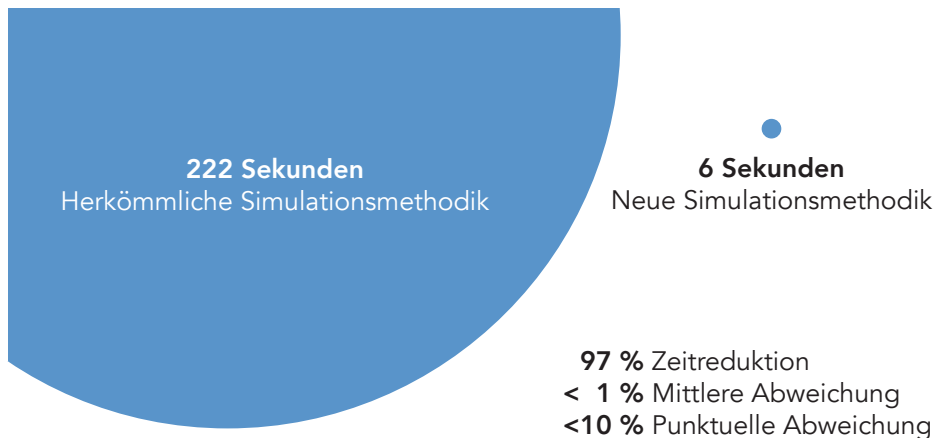


Voxelmethode zur Echtzeitsimulation von Verschattung durch Bäume.

Da die Strahlungsverhältnisse einen wesentlichen Einfluss auf den thermischen Außenraumkomfort an Hitzetagen nehmen, wurde zunächst eine Methode zur Vorberechnung und Überlagerung von Schattenwürfen durch Bäume oder Gebäude entwickelt (Gabriel et al., 2021). Ein zweiter Berechnungsschritt berücksichtigt die Verschattungssituation sowie Temperatur, Luftfeuchte und Windverhältnisse aus stationären Daten und ermittelt daraus den thermischen Komfort im Außenraum. Dieser kann sowohl als Karte als auch als Durchschnittswert über das Planungsgebiet ausgegeben werden.

Der zugehörige Programmcode zur Vorberechnung und Überlagerung von Schattenmasken (sogenannte „Voxelmethode“) wurde im Rahmen einer Open Source Veröffentlichung zugänglich gemacht (MIT-Lizenz). Dies soll insbesondere die Integration in künftige Planungstools ermöglichen und Entwickler:innen die Möglichkeit geben, auf den Erkenntnissen dieses Projekts aufzubauen. Die Veröffentlichung richtet sich daher vorwiegend an Berater:innen und Start-Ups, welche eigene Ressourcen zur Weiterentwicklung der bereitgestellten Grundlagen investieren können. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich auf der Homepage des Lehrstuhls ENPB oder des ZSK unter Teilprojekt „Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels“.

Online verfügbar unter: <https://www.zsk.tum.de/zsk/die-teilprojekte-des-zsk/abgeschlossene-projekte/nachverdichtung-im-kontext-des-klimawandels/>
<https://www.cee.ed.tum.de/enpb/methoden-und-tools/quartier-und-stadtsimulation/pyvoxel/>



Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen herkömmlicher und neuer Simulationsmethodik.

05

**Beispielhafte Anwendung
in einer Fallstudie**

Als Fallstudie wurde ein ca. 9.000 m² großer Wohnstandort in Kempten herangezogen. Beim vorhandenen Gebäudebestand handelt es sich um eine Zeilenbebauung aus den 1950er Jahren mit drei bis vier Geschossen. Dieser Bautypus ist in Bayern und Deutschland weit verbreitet (ZSK, 2017), weshalb die Ergebnisse gut auf ähnliche Gebiete übertragen werden können.

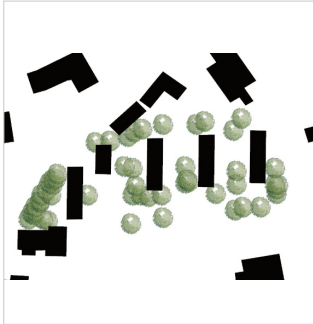


Planskizze Fallstudienggebiet (Kühner, 2022).

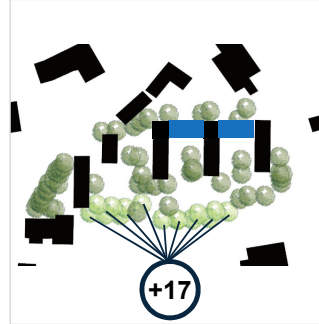
Für das Gebiet wurden verschiedene Nachverdichtungsszenarien entwickelt, die sich in der Art der Nachverdichtung und den Begrünungsmaßnahmen unterscheiden (siehe folgende Abbildung). Die Szenarien umfassen die Nachverdichtungsmaßnahmen Aufstockung, Zeilenschluss sowie die Kombination aus beiden mit jeweils einer dichten Begrünung im Südbereich, die die dortige Überhitzung in den Sommermonaten reduzieren soll. Die Winterlinde wird als stellvertretende Baumart eingesetzt. Als weitere Variante wird eine Nachverdichtung mit zusätzlichen Gebäuden im Südbereich betrachtet.

Szenarienübersicht zur Fallstudie

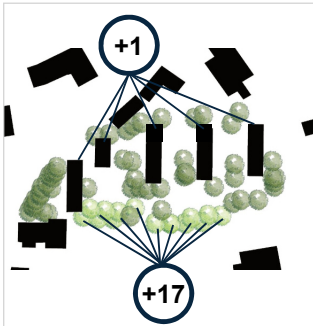
Status Quo



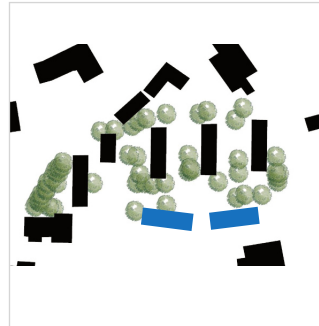
Zeilenschluss + max. Grün



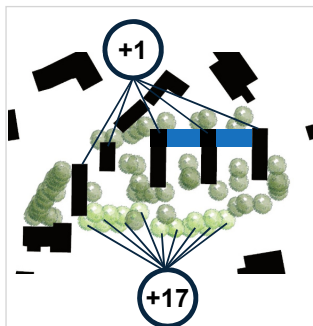
Aufstockung + max. Grün



Südliche Neubauten

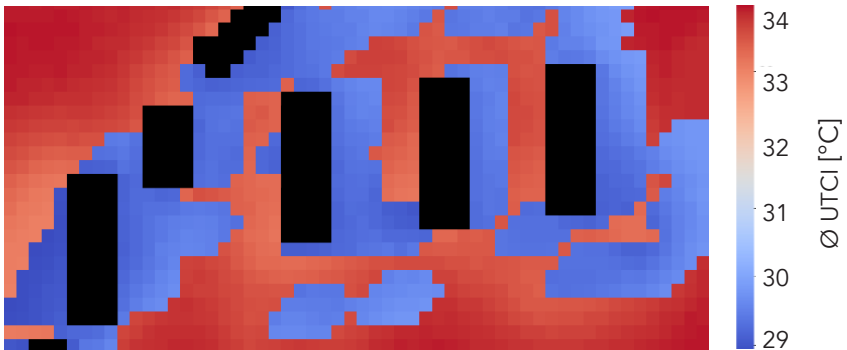


Aufstockung + Zeilenschluss + max. Grün



5.1 Thermischer Außenraumkomfort

Zur Bewertung der thermischen Aufenthaltsqualität im Außenraum wurde der Komfortindex Universal Thermal Climate Index (UTCI) verwendet. Dieser gibt das Wärmeempfinden an einem bestimmten Ort deutlich detaillierter an als beispielsweise die Lufttemperatur (siehe 3.1 Thermischer Außenraumkomfort).

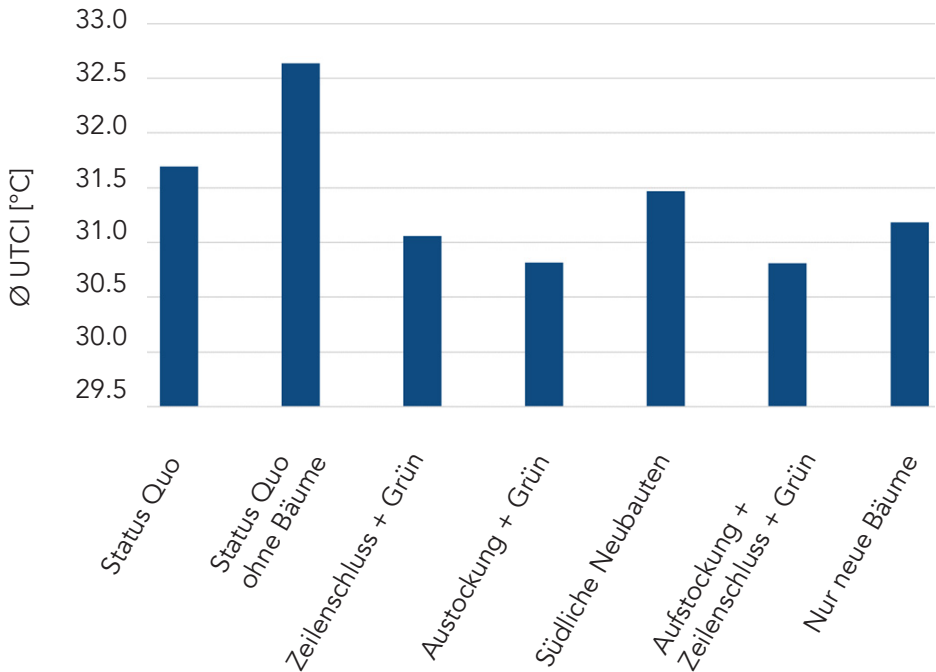


Thermischer Außenraumkomfort (UTCI) für den Status Quo am 1. August um 16 Uhr.

Die größte Hitzebelastung tritt in den Nachmittagsstunden auf – dann sind sowohl die Strahlungsintensität als auch die Lufttemperatur am höchsten. Eine Betrachtung der belastungsintensivsten Stunden liefert wichtige Hinweise, wo besondere Anpassungsbedarfe bestehen, um gesundheitliche Folgen von Hitzestress zu vermeiden. Werte von über 32 °C gelten dabei bereits als starker Hitzestress und somit als gesundheitsgefährdend.

Die Abbildung zeigt die räumliche Verteilung der Hitzebelastung an einem Hitzetag um 16 Uhr. Die kühlest Bereiche (blau eingefärbt) befinden sich im Schatten von Gebäuden und Bäumen; der Unterschied zu besonnten Bereichen (rot eingefärbt) beträgt bis zu 5 °C. Dies entspricht einer Hitzeempfindungsstufe, sodass der Aufenthalt in den kühleren Bereichen deutlich angenehmer ist. In den besonders hitzebelasteten Bereichen sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die Hitzebelastung zu reduzieren. In den Nachverdichtungsszenarien wurden diese Bereiche daher, z.B. mit zusätzlichen Bäumen, verschattet.

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass mögliche Konflikte mit der thermischen Situation in der Nacht bestehen. Während Verschattung den Hitzestress am Tag reduziert, sind offene Flächen für die nächtliche Abkühlung vorteilhaft. Enge Häuserschluchten oder geschlossene Kronendecken sind daher zu vermeiden. Zusätzliche Verschattung kann zudem dazu führen, dass sich die Verfügbarkeit von Tageslicht in den Wintermonaten verschlechtert.



Vergleich Gebietsdurchschnitt thermischer Außenraumkomfort für alle Szenarien: 1. August, 16 Uhr.

Erkenntnisse zum thermischen Außenraumkomfort:

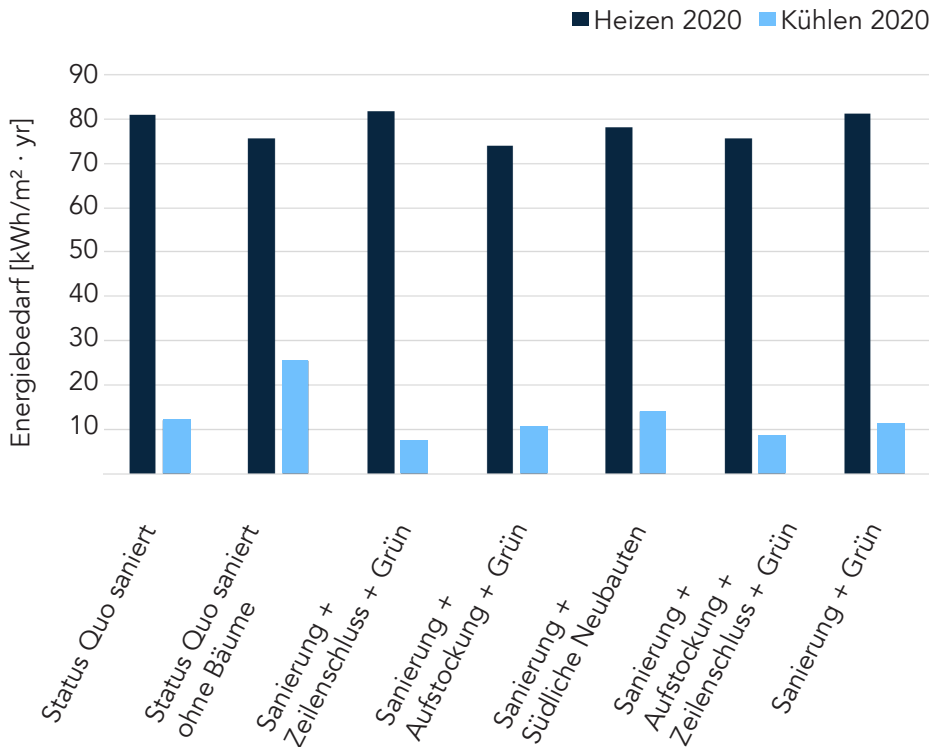
- Die Entfernung des existierenden Baumbestands (Szenario „Status Quo ohne Bäume“) führt zu einer Erhöhung des UTCI um durchschnittlich 0,9 °C.
- Die Verschattung durch neue Bäume reduziert die Hitzebelastung in allen Szenarien.
- Auch der Schatten durch höhere oder zusätzliche Gebäude führt zu einer Reduktion der Hitzebelastung am Tag. Im Fallbeispiel schneiden die Szenarien „Aufstockung“ sowie „Aufstockung + Zeilenschluss“ in Kombination mit Neupflanzungen am besten ab.

5.2 Energiebedarf

Zur Bewertung des Energiebedarfs wird neben dem Heizwärmebedarf auch der potenzielle Kühlbedarf als Indikator für den Innenraumkomfort betrachtet, da in Deutschland nur ein geringer Anteil der Wohngebäude mit aktiver Kühlung ausgestattet ist (UBA, 2011; dena 2021). Ziel ist es, diesen möglichst gering zu halten, um auch in Zukunft den großflächigen Einsatz aktiver Kühlung zu vermeiden. Die Simulation erfolgte mittels des entwickelten Energiemodells (siehe 4.2 Energiemodell für große Gebäudebestände) und wurde mit realen Verbrauchsdaten sowie den Energieausweisen der Gebäude abgeglichen. Die Ergebnisse basieren auf einem Referenzjahr für den Standort Kempten, welches die Witterungsverhältnisse aus mehreren vergangenen Jahren repräsentiert. Daher sind stichprobenartige Realverbräuche aus einzelnen Jahren nicht unmittelbar vergleichbar, können aber zeigen, ob die Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung liegen und Simulationsmodelle realitätsnah konfiguriert wurden. Für die Auswertungen der Energiebedarfe wurden sowohl für die Sanierung als auch für den Neubau der gesetzliche Standard (GEG) herangezogen. Im Fall der unsanierten Bestandsgebäude ergab sich ein durchschnittlicher Heizwärmebedarf von $179 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yr}$ und ein potenzieller Kühlbedarf von $8 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yr}$.

Erkenntnisse aus den Energiesimulationen:

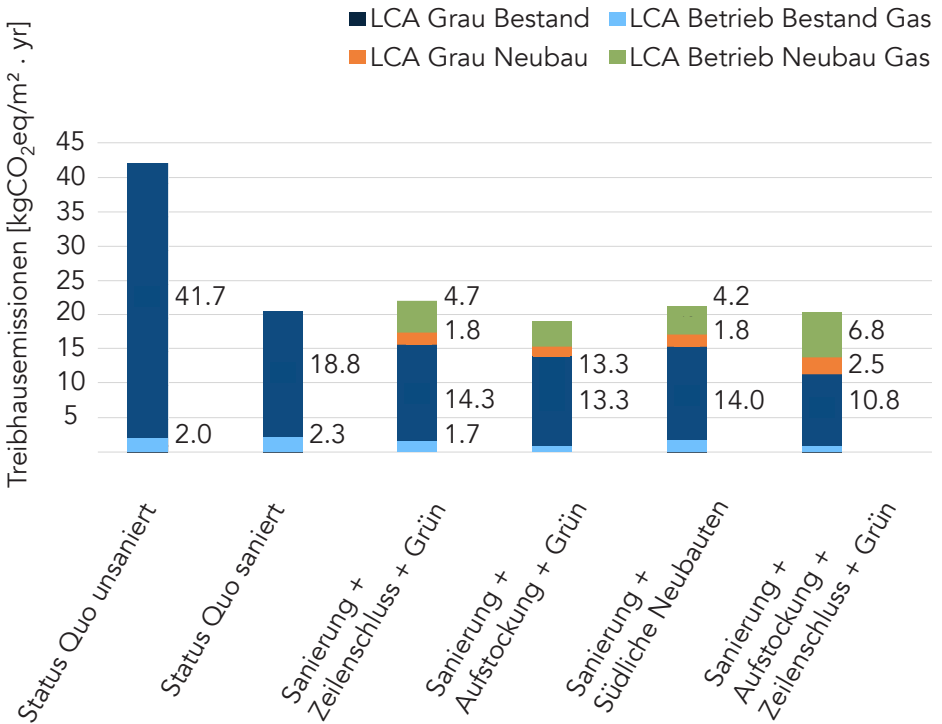
- Bäume verschatten die Gebäudefassaden, wodurch der potenzielle Kühlbedarf reduziert und der thermische Innenraumkomfort verbessert wird. Die Abweichung zwischen saniertem Bestand mit und ohne Bäume liegt bei mehr als 100 %.
- Die Aufstockungen führen im Vergleich zu Neubauten zu einer kompakteren Bauweise. Im Zusammenspiel mit hoher Solargewinne reduzieren sie den Heizbedarf um 8 %.
- Die Energiebedarfe des Szenarios „Südliche Neubauten“ ähneln dem Status Quo. Die hohen solaren Einträge bewirken leichte Verbesserungen beim Heizbedarf, wirken sich jedoch nachteilig auf den potenziellen Kühlbedarf aus. Die Integration von Verschattungs- und passiven Kühlmaßnahmen (z.B. Begrünung auf der Südseite der Gebäude) bei den Neubauten sollte daher untersucht werden.
- Die Kombination aus Aufstockung und Zeilenschluss weist einen relativ geringen potenziellen Kühlbedarf auf, da die Aufstockungen zur Verschattung der neu gebauten Zeilenschlüsse beitragen.



Energiebedarfe der Szenarien für Heizen und Kühlen im heutigen Klima; Sanierungsstandard = Gebäudeenergiegesetz (GEG).

5.3 Ökobilanz

Für die Ökobilanzierung wurde eine Verlängerung der Lebensdauer der Bestandsgebäude um 50 Jahre angenommen. Während dieser Zeit erforderliche Austauschzyklen von bestehenden Bauteilen und Materialien wurden als „LCA Grau Bestand“ berücksichtigt. Für den Betrieb von bestehenden und zusätzlichen Wohnflächen wurde die Weiternutzung der bestehenden Gaskessel angesetzt. Alle Neubauten werden als Holzrahmenbau nach gesetzlichem Standard (GEG) ausgeführt. Nachfolgende Ergebnisse der Bilanzierung beziehen sich auf die gesamte Nutzfläche des jeweiligen Szenarios, getrennt nach den Anteilen für Betrieb und Baukonstruktion (graue Emissionen) von Neubau und Bestand.



Ergebnisse Ökobilanz Szenarienvergleich bezogen auf die gesamte Nutzfläche des jeweiligen Szenarios; Sanierungsstandard = Gebäudeenergiegesetz (GEG).

Den größten Anteil an Treibhausgasemissionen weist die Betriebsphase von Neubau und Bestand auf. Eine Untersuchung der Sensitivität von Ökobilanzen hat gezeigt, 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 (Reitberger et al., 2022). So würde im Fallbeispiel eine Umstellung der Wärmeerzeugung von Gas auf Wärmepumpen (Arbeitszahl (COP) von 3,5) zu einer Reduktion der betrieblichen Emissionen um 28 % (mit Strommix aus dem Jahr 2018) und 57 % (mit dem erwarteten Strommix im Jahr 2050) führen. Weitere Reduktionen sind beispielsweise durch die Integration einer Photovoltaikanlage zur Stromversorgung der Gebäude denkbar.

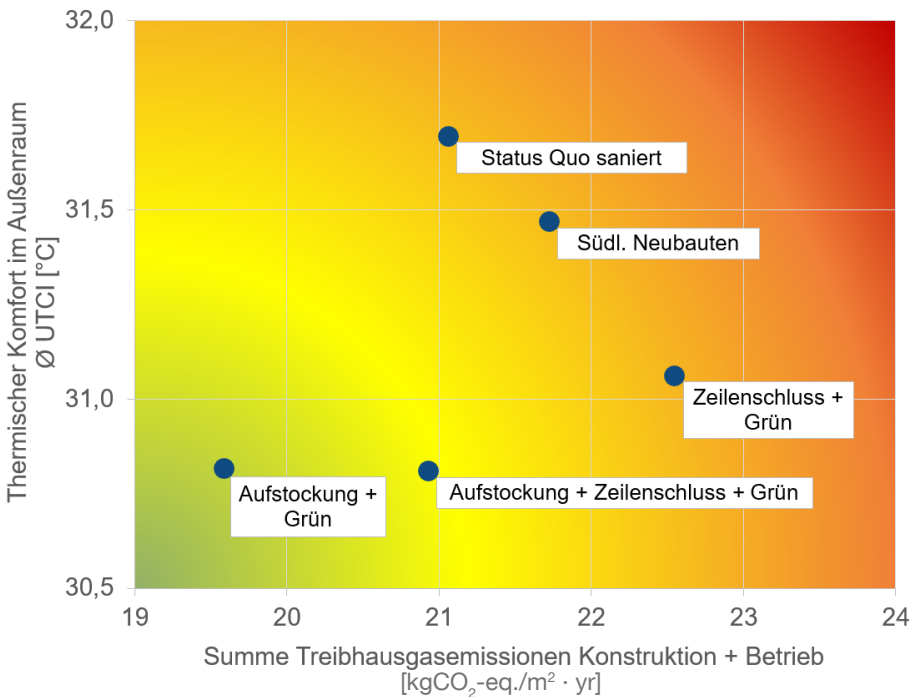
Erkenntnisse aus der Ökobilanzierung:

- 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 Vermeidung und ggf. Kompensation der Treibhausgasemissionen erforderlich.
- Wird Gas als Energieträger beibehalten, weist der Gebäudebetrieb den größten Anteil an Treibhausgasemissionen auf. Bei Umstellung auf z.B. Wärmepumpen 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 anderen Nachverdichtungstypen (Zeilenschluss, Neubau).

5.4 Gesamtbewertung der Fallstudienenergebnisse

Mithilfe der durchgeführten Analysen konnten die jeweiligen Vor- und Nachteile der Nachverdichtungsszenarien für das Fallbeispiel in Hinblick auf einzelne Aspekte (thermischer Außenraumkomfort, Energiebedarf, Ökobilanz) dargelegt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengeführt, um Synergien und Widersprüche aufzuzeigen und daraus eine Empfehlung für die Fallstudie abzuleiten.

Es kann festgestellt werden, dass Maßnahmen zur Verbesserung des Außenraumkomforts (wie zusätzliche Verschattung) häufig zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs der Gebäude führen. Dieser Konflikt ist bei den Szenarien allerdings unterschiedlich stark ausgeprägt und kann durch die Wahl geeigneter Nachverdichtungsmaßnahmen kompensiert und teils sogar verbessert werden. Im Fallbeispiel tragen Aufstockungen zu einer kompakten Bauweise des Quartiers bei. Sie verschatten zudem den Außenraum und reduzieren so die Hitzebelastung und Kühlbedarfe angrenzender Gebäude. Zudem bieten Aufstockungen Vorteile hinsichtlich der lebenszyklusbasierten Treibhausgasemissionen, da im Vergleich zum Neubau geringere Materialaufwände für Fundamente bzw. Anschlüsse an den Bestand notwendig sind. Die Gegenüberstellung der beiden Aspekte Treibhausgasemissionen und thermischer Außenraumkomfort verdeutlicht die Vorteile der Aufstockungsvarianten im Vergleich zu den anderen Szenarien.



Zielkonflikt zwischen Treibhausgasemissionen und thermischen Komfort im Außenraum.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden neben den hier dargelegten Aspekten weitere Indikatoren zur Bewertung der Szenarien herangezogen. Hierzu zählen etwa die Tageslichtsituation, die absoluten Treibhausgasemissionen sowie der geschaffene Wohnraum. Nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse aller durchgeführten Analysen zusammen und setzt sie in einen relativen Kontext.

Szenario	Tageslicht Außenraum im Winter	Außenraumkomfort tagsüber	Innenraumkomfort Kühlenergie	Heizenergiebedarf	Treibhausgasemissionen absolut	Treibhausgasemissionen 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

Dabei ist festzustellen, dass keines der Szenarien ein Optimum in allen Aspekten bietet; es müssen stets Kompromisse eingegangen und damit Einschränkungen bei manchen Bewertungsaspekten akzeptiert werden. Durch die vorangegangene Gegenüberstellung einzelner Bewertungskriterien konnte allerdings die Aufstockung in Verbindung mit zusätzlichem Grün als vorteilhaft in Hinblick auf Außenraumkomfort, Energiebedarf und Ökobilanz herausgearbeitet werden. Diese Variante ist daher unter dem Gesichtspunkt der notwendigen Schaffung von Wohnraum als moderate Nachverdichtungsmaßnahme im Fallstudienquartier zu empfehlen. Soll eine intensivere Nachverdichtung etwa mit zusätzlichen Zeilenschlüssen stattfinden, schließen die Ergebnisse dieser Untersuchung dies nicht im Vorfeld aus.

Es sollten allerdings detailliertere Untersuchungen zu den Auswirkungen und Optimierungsmöglichkeiten im Innen- und Außenraum erfolgen. Das Fallbeispiel zeigt exemplarisch die Anwendung der entwickelten Auswertungsmethoden auf. Der Einsatz kollaborativer Methoden, wie beispielsweise der CDP, ermöglicht dabei den Aufbau eines breiten Szenarienspektrums und unterstützt so Abwägungsprozesse zwischen den dargelegten Planungskonflikten.



Darstellung des Fallstudienquartiers mit Aufstockung und Zeilenschluss sowie intensiver Begrünung (Espinosa, 2022).

06

**Ausblick und
Handlungsempfehlungen**

Nachverdichtungsvorhaben stellen in der Regel komplexe Planungsverfahren dar, da im Siedlungsbestand unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen sind. Diese Handreichung zeigt auf, wie digitale Planungsmethoden Kommunen und Planer:innen bei der Integration von Klimaorientierung und der Abwägung von Belangen unterstützen können. Die vorgestellten Kennzahlen und Methoden helfen dabei, Planungsalternativen zu bewerten und ihre Auswirkung auf Klimaschutz und Klimaanpassung zu untersuchen.

Ein Einsatz digitaler Planungsmethoden in frühen Planungsphasen ist sinnvoll, um frühzeitig die Wechselbeziehungen zwischen Gebäuden und Außenraum zu verstehen, Konflikte zu vermeiden und Synergien zu nutzen. Um fallspezifische Klimaschutz- bzw. Klimaanpassungsmaßnahmen für ein Nachverdichtungsvorhaben zu entwickeln, ist eine genaue Analyse des Bestands und der Planungsalternativen notwendig. Hierfür leisten die vorgestellten digitalen Methoden wertvolle Unterstützung, indem sie konkrete Fakten und Argumentationsgrundlagen liefern. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass Planungswerkzeuge nicht in der Lage sind, die vollständige Realität abzubilden. Soziale Faktoren, wie Aufenthaltsqualität, Wahrnehmung von Sicherheit und sozialer Zusammenhalt lassen sich nur eingeschränkt quantifizieren, sind aber entscheidend für die Qualität von Quartieren.

Kollaborative Werkzeuge, wie die hier vorgestellte Collaborative Design Platform (CDP), erlauben in Echtzeit unterschiedliche Planungsvarianten zu bewerten. Dadurch können Planungsbeteiligte in Workshops an gemeinsamen Lösungen arbeiten und Ideen zur Quartiersgestaltung intuitiv testen. Visualisierungen durch die CDP können dabei auch in Bürger:innenbeteiligungsverfahren eingesetzt werden, um soziale Anforderungen zu integrieren. So entstehen Transparenz und Kommunikation im Planungsprozess, welche dabei helfen einen Austausch zwischen den Beteiligten anzustoßen.

Digitale Methoden und kooperative Planung



Digitale Planungsmethoden können die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen kommunalen Abteilungen sowie Entscheidungsträger:innen fördern und erleichtern. Es sollte daher bereits zu Beginn von Planungsprozessen geprüft werden, welche Methoden geeignet sind, um die spezifischen Anforderungen im Verlauf eines Projekts im Blick zu behalten (siehe 2.2 Überblick vorhandener Planungstools bzw. 2.3 Auswahl weiterer digitaler Planungshilfen).



Eine Verwendung besonders zu Beginn eines Prozesses ist sinnvoll, um alle Daten und Disziplinen zusammenzubringen. Auch im späteren Verlauf, beispielsweise bei der Kommunikation mit der Öffentlichkeit, unterstützen die digitalen Werkzeuge, z.B. durch Visualisierungen.



Der Einsatz digitaler Methoden sollte insbesondere bei Projekten im Gebäudebestand erfolgen. Hier müssen oft zahlreiche Informationen zu Bestand und Neubau überlagert und parallel bewertet werden. Eine digitale Aufarbeitung und bestehende Bewertungssysteme können dabei wertvolle Unterstützung leisten (siehe 5.4 Gesamtbewertung der Fallstudienresultate).



Kommunen sollten sich einen umfassenden Überblick der verfügbaren Daten verschaffen und diesen aktuell halten. Besonders hilfreich sind neben geometrischen Informationen Angaben zum Gebäudealter oder dem Sanierungszustand. Je präziser und hochauflösender die vorhandenen Datengrundlagen sind, desto besser können damit belastbare Aussagen mithilfe der vorgestellten Simulations- und Bewertungsmethoden generiert werden.



Die Beteiligung in kommunalen Austauschnetzwerken, die Teilnahme an Forschungsprojekten und die Nutzung von Förderprogrammen kann helfen, finanzielle und personelle Ressourcen zu schonen.

Handlungsempfehlungen

Nachverdichtung im Kontext des Klimawandels



Der Erhalt vitaler Altbäume spielt eine bedeutende Rolle für die Verbesserung des Innen- und Außenraumkomforts im Sommer. Das Bestandsgrün sollte daher dokumentiert und die damit verbundenen Ökosystemleistungen (z.B. Kühlung des Außenraums, Emissionsbindung) bewertet werden.



Zusätzliches Grün und die Verschattung durch neue Gebäude sollten so geplant werden, dass klimawandelbedingt steigende Kühlbedarfe der Gebäude möglichst gering ausfallen. Gebäude- und Verschattungssimulationen können hierfür wertvolle Hilfestellung geben.



Gebäudeaufstockungen bieten die Möglichkeit für Synergieeffekte hinsichtlich Außenraumkomfort, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen. Zudem kommen sie ohne eine weitere Flächenversiegelung aus. Sofern es die Bestandsgebäude zulassen, sollte daher die Möglichkeit zur Aufstockung geprüft werden.



Ältere Gebäudebestände weisen in der Regel sehr hohe Energiebedarfe im Vergleich zum Neubaustandard auf. Daher ist im Zuge von Nachverdichtungsmaßnahmen die energetische Sanierung sinnvoll. Im Fall von Aufstockungen kann zudem die Dämmung des Bestandsdachs eingespart werden.



Auch nach einer Sanierung fällt bei fossiler Energieversorgung noch ein großer Anteil an Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase an. Ein Wechsel auf erneuerbare Energieträger (insbesondere auch bei Bestandsgebäuden) ist daher anzustreben.



Die frühzeitige Bereitstellung und Berücksichtigung klimarelevanter Informationen im Planungsprozess sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützt eine klimaresiliente Planung und spart Ressourcen.

Handlungsempfehlungen

Collaborative Design Platform (CDP)	Ein Prototyp einer kollaborativen Entwurfsplattform für kreative Entwurfsphasen, um digitale und analoge Inhalte zu verknüpfen.
GEG	Das Gebäudeenergiegesetz legt fest, welche energetischen Anforderungen beheizte und klimatisierte Gebäude erfüllen müssen. Ihm können Vorgaben zu Heizungs- und Klimatechnik sowie zum Wärmedämmstandart und Hitzeschutz von Gebäuden entnommen werden.
Hitzetag	Tag mit einer maximalen Lufttemperatur von oder über 30 °C.
Potenzieller Kühlbedarf	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 i.d.R. mit den Übergradtemperaturstunden.
Universal Thermal Climate Index (UTCI)	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.
Übergradtemperaturstunden	Kumulierte Stunden pro Jahr, in denen die Innentemperatur einen Grenzwert überschreitet. Gewichtet mit der Differenz der Grenzwertüberschreitung.
Voxel	3D-Gitterpunkt, 3D-Pixel.

Quellenverzeichnis

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. BBSR-Online-Publikation 17/2020, Bonn.

Dena Gebäudereport 2022 (dena) (2021): Zahlen, Daten, Fakten. Berlin. Deutsche Energie-Agentur. Online verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Gebaeudereport_2022.pdf.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019): Klimawandel in Deutschland: Neuer Monitoringbericht belegt weitreichende Folgen. Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/191126/dwd_bmu_uba_monitoringbericht.html.

Espinosa, A. (2022): SDG-driven Design. Masterarbeit, Technische Universität München.

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 +, S. 1–8.

Kaspar, F.; Friedrich, K. (2020): Rückblick auf die Temperatur in Deutschland im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung. Deutscher Wetterdienst (DWD). Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200102_bericht_jahr2019.pdf;jsessionid=3C7AD1A6B1D2BC0F2E7369D0C1A1466D.live21072?__blob=publicationFile&v=7.

Kühner, E. (2022): Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen – Quantifizierung der THG-Emissionen am Beispiel eines Entwurfs für die Aufstockung von Mehrfamilienhäusern. Masterarbeit, Technische Universität München.

Larson, K.; Alonso, Pastor L. A.; Zhang, Y.; Grignard, A.; Noyman, A.; Sakai, Y.; Doorley, R.; Elkastsha, M. (Hg. v. MIT Media Lab) (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/>.

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

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. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.679>.

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. Online verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1207655>.

Shandas, V.; Voelkel, J.; Williams, J.; Hoffman, J. (2009): Integrating Satellite and Ground Measurements for Predicting Locations of Extreme Urban Heat. Climate 2019, 7, 5. <https://doi.org/10.3390/cli7010005>.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Destatis) (2020): Fläche für Siedlung und Verkehr 31. Dezember 2016 - 31. Dezember 2019 nach Bundesländern. Online verfügbar unter: <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl/ergebnisse/flaeche-und-raum/ffsv>.

Umweltbundesamt (UBA) (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Climate Change 10/2011. Ecofys Germany GmbH, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf.

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) (2017): Teilprojekt 1: Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München. Online verfügbar unter: http://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Berichte/ZSK_TP1_Schlussbericht_20170731_mitUnterschriften_aktJan18.pdf.

Zum weiteren Nachlesen

Thermischer Außenraumkomfort

DWD (o.J.): Erläuterungen zur gefühlten Temperatur. Online verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrenindizes/thermisch/gefuehltetemp.html>.

Laue, H. M. (2019): Klimagerechte Landschaftsarchitektur. Handbuch zum Umgang mit Elementen und Faktoren des Klimas im Freiraum. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.

Jendritzky, G.; Bröde, P.; Fiala, D.; Havenith, G.; Weihs, P.; Batchvarova, E.; DeDear, R. (2009): Der Thermische Klimaindex UTCI, Klimastatusbericht 2009, S. 96-101. Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb2009_pdf/artikel11.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Thermischer Innenraumkomfort

Ran, F.; Frohn, B. (2013): Natürliche Klimatisierung. Birkhäuser, Basel. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7921-7>.

Schlitzberger, S.; Kempkes, C.; Maas, A. (2013): Ermittlung aktueller Randbedingungen für den sommerlichen Wärmeschutz und weiterer Gebäudeeigenschaften im Lichte des Klimawandels. Online verfügbar unter: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/13079032770.pdf>.

Beausoleil-Morrison, I. (2020): Fundamentals of Building Performance Simulation. CRC Press LLC.

Energiebedarf

Lenz, B.; Schreiber, J.; Stark, T. (2010): Nachhaltige Gebäudetechnik - Grundlagen Systeme Konzepte. Detail-Verlag, München.

Wagner, O. (2020): Die kommunale Klimaschutzpraxis - Städte und Gemeinden gestalten den Wandel. WEKA media Verlag, Kissing.

Ökologische Lebenszyklusanalyse

König, H.; Kohler, N.; Kreißig, J.; Lützkendorf, T. (2009): Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung. Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge. Detail-Verlag, München.

Klöpffer, W.; Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.

König, H. (2017): Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt.

