

Hochschule für Technik Stuttgart

FAKULTÄT FÜR
BAUINGENIEURWESEN, BAUPHYSIK UND WIRTSCHAFT

BACHELORSTUDIENGANG INFRASTRUKTURMANAGEMENT

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
BACHELOR OF ENGINEERING (B. ENG.)

Analyse der Wechselwirkungen zwischen Mobilität, Stadtgrün und thermischen Gebäudeenergiebedarf anhand zweier Fallbeispiele

Vorgelegt von
Matrikelnummer

Marieke Kreye
1002127

Betreuer
Zweitbetreuer

Herr Prof. Dr. Bastian Schröter
Herr Mario Flammann

Abgabedatum

20.06.2024

Gender Disclaimer

Hinweis zur Verwendung geschlechtsneutraler Formulierungen.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung von geschlechtsspezifischen Doppelnennungen und Kurzformen verzichtet. Werden Personengruppen in der vorliegenden Arbeit genannt, wird stellvertretend die männliche Form für alle Geschlechter verwendet. Hierdurch werden Frauen, Männer und Diverse im Rahmen der Ausarbeitung gleichermaßen berücksichtigt.

Zusammenfassung

Die thermische Belastung in urbanen Gebieten nimmt kontinuierlich zu. Um städtische Räume an die prognostizierten klimatischen Veränderungen anzupassen, ist eine Verstärkung der grünen Infrastruktur von entscheidender Bedeutung. Bei der Entwicklung und Implementierung von Anpassungsstrategien müssen die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen urbanen Komponenten berücksichtigt werden, um eine langfristig nachhaltige Stadtentwicklung zu gewährleisten.

In dieser Arbeit werden insbesondere die Wechselwirkungen zwischen der Reduktion des motorisierten Individualverkehrs (MIV), der Erweiterung urbaner Grünflächen und dem thermischen Energiebedarf von Gebäuden untersucht. Diese Interaktionen wurden mittels Fallstudien an zwei Quartieren in Süddeutschland analysiert.

Ein sich veränderndes Mobilitätsverhalten führt im Idealfall zu einer Reduktion des MIV, wodurch unterschiedlich große Flächenpotentiale für neue Pflanzungen freigesetzt werden. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass ein zunehmender Anteil an Stadtgrün Auswirkungen auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf und das urbane Mikroklima hat. Die Simulationen des veränderten thermischen Gebäudeenergiebedarfs und die Auswirkungen auf die Evapotranspiration wurden mit dem Softwaretool SimStadt durchgeführt. Bei einer Reduktion des MIV-Anteils im Modal Split um 20 % auf einem Gebiet von knapp 40 Hektar wird die Pflanzung von bis zu 500 neuen Bäumen möglich. Diese Erhöhung des Baumbestands um etwa 60 %, im Vergleich zum Status Quo, führt zu einer Reduktion des jährlichen Kühlenergiebedarfs um fast 140 MWh. Darüber hinaus tragen die zusätzlichen 500 Bäume zu einer Temperaturabsenkung von bis zu 2,2 Kelvin bei.

Abstract

The thermal stress in urban areas is continuously increasing. To adapt urban areas to the predicted climatic changes, it is crucial to strengthen the green infrastructure. When developing and implementing adaptation strategies, the diverse interactions between the various urban components must be considered in order to ensure long-term sustainable urban development.

In this thesis, the interactions between the reduction of motorized individual transport (MIT), the expansion of urban green spaces and the thermal energy demand of buildings are examined. These interactions were analysed using two case study areas in Southern Germany.

Ideally, changing mobility behaviour will lead to a reduction in motorized traffic, freeing up different amounts of space for new plantings. The results of the analyses show that increasing urban greenery has an impact on the thermal energy demand of buildings and the urban microclimate. The simulations of the changed thermal building energy demand and the effects on evapotranspiration were carried out using the SimStadt software tool. With a reduction of MIT in the modal split by 20% in an area of approximately 40 hectares, the planting of 500 new trees becomes feasible. This increase in urban greenery by about 60 % compared to the current state leads to a reduction in the annual cooling energy demand by almost 140 MWh. Additionally, the 500 new trees contribute to a temperature decrease of up to 2.2 Kelvin.

Inhaltsverzeichnis

Gender Disclaimer	I
Zusammenfassung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Theorieteil	3
2.1 Nachhaltige Stadtentwicklung	3
2.1.1 Nachhaltige Stadtentwicklung auf internationaler und nationaler Ebene ..	3
2.1.2 Mehrwert nachhaltiger Stadtentwicklung	5
2.2 Das Stadtklima	6
2.3 Grüne Infrastruktur	7
2.3.1 Kühlungseffekt durch Stadtbäume	8
2.3.2 Mehrwert Stadtgrün	10
2.3.3 Herausforderung grüner Infrastruktur im urbanen Raum	11
2.4 Mobilitätsveränderung	12
2.5 Aktueller Stand der Forschung	13
3 Methodik und Toolerläuterung	15
3.1 Methodik	15
3.2 Toolvorstellung	17
3.2.1 Funktionsweise Python-Skript	17
3.2.2 SimStadt	18
4 Modellhafte Analyse des Mobilitätsverhaltens	20
4.1 Quartiersarchetypen	20
4.2 Mobilitätsverhalten in den Quartiersarchetypen	21
4.3 Szenarien Mobilitätsveränderung	22
5 Fallstudien	24
5.1 Datengrundlage	24
5.2 Analyse der Quartiere	25
5.2.1 Analyse Grombühl	25
5.2.2 Analyse Grafenbühl	29
5.3 Aufstellung der Baumpflanzungsszenarien	32

5.3.1	Baumpflanzungsszenarien Grombühl	33
5.3.2	Baumpflanzungsszenarien Grafenbühl	35
6	Ergebnisse.....	38
6.1	Zunahme des Grünanteils.....	38
6.2	Auswirkungen auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf.....	39
6.3	Auswirkungen auf die Evapotranspiration	43
7	Interpretation der Simulationsergebnisse	50
8	Kritische Würdigung.....	52
9	Fazit.....	55
	Literaturverzeichnis.....	57
	Anhang	61
	Selbständigkeitserklärung.....	85
	Kognition: Erklärung zur Nutzung von generativen KI-Tools in Hochschulprüfungen ..	86

Abkürzungsverzeichnis

ALKIS *Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem*

CGSC *Circular Green Sim City*

CO₂ *Kohlenstoffdioxid*

CO₂e *Kohlenstoffdioxid Äquivalente*

COP *Coefficient of Performance*

DNS *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*

DWD *Deutscher Wetterdienst*

FLL *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*

Galk e.V. *Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz*

HfT *Hochschule für Technik*

IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LAI *Leaf Area Index*

MIT *Motorized individual transport*

MIV *Motorisierte Individualverkehr*

ÖPNV *Öffentlicher Personennahverkehr*

OSM *Open Street Map*

PKW *Personenkraftwagen*

RASt *Richtlinie für die Anordnung von Stadtstraßen*

RCP *Representative Concentration Pathways*

SDG *Sustainable Development Goal*

shp *Shapefile*

UHI *Urban Heat Island*

UV Strahlung *Ultraviolette Strahlung*

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 30-Jahresmitteltemperatur für den historischen Zeitraum (1970-2000), für die nahe Zukunft (2031-2060) und für die ferne Zukunft (2071-2100) nach dem RCP8.5-Szenario (vgl. Deutscher Wetterdienst).....	1
Abbildung 2: Dimensionen urbaner Nachhaltigkeit (eigene Darstellung nach Bott et al. 2018, S. 31).....	5
Abbildung 3: Auswirkungen ausgewählter urbaner Elemente auf die Temperatur in der Stadt (Doblas-Reyes et al., S. 1463).....	8
Abbildung 4: Schematische Darstellung Evapotranspiration (eigene Darstellung nach Zhang et al. 2020).....	10
Abbildung 5: Neupflanzungen im Fallstudiengebiet (Datengrundlage: CGSC und eigene Berechnung).....	18
Abbildung 6: 3D-Gebäudemodell mit Baumdaten Fallstudiengebiet Grombühl (Datengrundlage: CSGC).....	19
Abbildung 7: Die zehn Sinus Milieus in einer Gesellschaft (eigene Darstellung nach Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH 2024).....	21
Abbildung 8: Lage des Fallstudiengebiets Grombühl (eigene Darstellung).....	25
Abbildung 9: Quartiersarchetypen im Untersuchungsgebiet Grombühl (eigene Darstellung, Datengrundlage: Drees & Sommer).....	26
Abbildung 10: Überhitzungspotentiale in Grombühl (Burghardt und Partner Ingenieure 2018, S. 1).....	27
Abbildung 11: Monatlicher Heiz- und Kühlbedarf im Fallstudiengebiet Grombühl mit und ohne des Verschattungseffekts durch Bäume (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	27
Abbildung 12: Spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Fallstudiengebiet Grombühl mit und ohne Berücksichtigung des Verschattungseffekts durch Bäume (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	28
Abbildung 13: Lage des Fallstudiengebiets Grafenbühl (eigene Darstellung).....	29
Abbildung 14: Quartiersarchetypen im Untersuchungsgebiet Grafenbühl (eigene Darstellung, Datengrundlage Drees & Sommer).....	29
Abbildung 15: Thermische Belastung Grafenbühl (eigene Darstellung nach Hasel et al. 2022, S. 56).....	30
Abbildung 16: Monatlicher Heiz- und Kühlbedarf mit und ohne der Verschattungswirkung von Bäumen Status Quo Grafenbühl (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	31
Abbildung 17: Spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Fallstudiengebiet Grombühl mit und ohne dem Verschattungseffekt durch Bäume (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	31
Abbildung 18: Vergleichsbild Baumbepflanzung im Straßenraum (von links nach rechts: Seyfferstraße, Hasenbergstraße, Ludwigstraße, Hasenbergsteige) (eigene Fotos)	33
Abbildung 19: Gebietsausschnitte Grombühl für die Baumpflanzungsszenarien (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 20: Gebietsausschnitte Grafenbühl für die Baumpflanzungsszenarien (eigene Darstellung).....	37

Abbildung 21: Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt II (Datengrundlage CGSC und eigene Berechnungen).....	39
Abbildung 22: Monatlicher Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	40
Abbildung 23: Spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Status Quo, in Szenario A und in Szenario B des Gebietsausschnitts I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	41
Abbildung 24: Tägliche Evapotranspiration im Gebietsausschnitt I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)	44
Abbildung 25: Tägliche Evapotranspiration im Status Quo (oben), in Szenario A (mitte) und in Szenario B (unten) im Gebietsausschnitt I (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse).....	45
Abbildung 26: Globalstrahlung auf den Gebietsausschnitt I in Szenario B ohne (oben) und mit (unten) Berücksichtigung des Energieentzugs durch Evapotranspiration (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)	47
Abbildung 27: Tägliche Temperaturänderung im Gebietsausschnitt I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)	48
Abbildung 28: Stündliche Temperaturveränderung durch Evapotranspiration in einem Jahr für den Status Quo (oben), das Szenario A (mitte) und das Szenario B (unten) in Gebietsausschnitt I (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Baumpflanzungsszenarien in Grombühl (eigene Berechnungen)	34
Tabelle 2: Baumpflanzungsszenarien in Grafenbühl (eigene Berechnungen)	36
Tabelle 3: Übersicht aller Baumpflanzungsszenarien (eigene Berechnungen)	38
Tabelle 4: Zu- bzw. Abnahme der CO ₂ e-Emissionen in t nach Szenarien (gerundete Werte) (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)	43
Tabelle 5: Auflistung der über die Monate gemittelte prozentuale Verringerung der Globalstrahlung (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)...	46

1 Einleitung

Die Auswirkungen des Klimawandels werden zunehmend spürbar. In den kommenden Jahrzehnten ist eine Zunahme an Häufigkeit und Intensität von Extremwetterlagen zu erwarten. Hitzewellen treten immer häufiger auf, Starkregenereignisse verursachen wachsende Schäden, und erneut war das vergangene Jahr 2023 das wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2024a)

Aktuelle städtische Strukturen sind häufig nicht auf zukünftige klimatische Bedingungen ausgelegt. Ein hoher Versiegelungsgrad, dichte Bebauung, dunkle Oberflächenmaterialien, hohes Verkehrsaufkommen und verhältnismäßig kleine Grünflächen tragen zu einer hohen ökologischen Belastung und sinkender Lebensqualität in Städten bei. Urbane Gebiete sind für etwa 75 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich, 39 % der energiebezogenen Treibhausgasemissionen sind auf den Erhalt und die Instandsetzung von Gebäuden zurückzuführen. Städte nutzen 75 % der weltweit verfügbaren Ressourcen und dennoch spielen sie gleichzeitig eine zentrale Rolle in der nachhaltigen Entwicklung als Wirtschafts- und Lebensraum. (vgl. Die Bundesregierung 2020, S. 265)

Die Urbanisierung führt zu lokal veränderten und zum Umland unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im urbanen Raum. Die städtische Bebauungsstruktur fördert einen Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland, der besonders nachts ausgeprägt ist – ein Phänomen, das als Wärme- oder Hitzeinseleffekt (Urban Heat Island, UHI) bekannt ist. Mit einer zunehmenden Urbanisierung wird die Temperatur in städtischen Gebieten weiter ansteigen. (vgl. Revi et al. 2015, S. 551)

Es wird prognostiziert, dass ohne gezielte Maßnahmen zur Minderung der Klimafolgen die Jahresmitteltemperatur in Deutschland im Vergleich zu dem Zeitraum von 1970 – 2000 um 4,7 °C ansteigt. Abbildung 1 verdeutlicht die voraussichtlich zunehmende Jahresmitteltemperatur des Bundesgebiets.

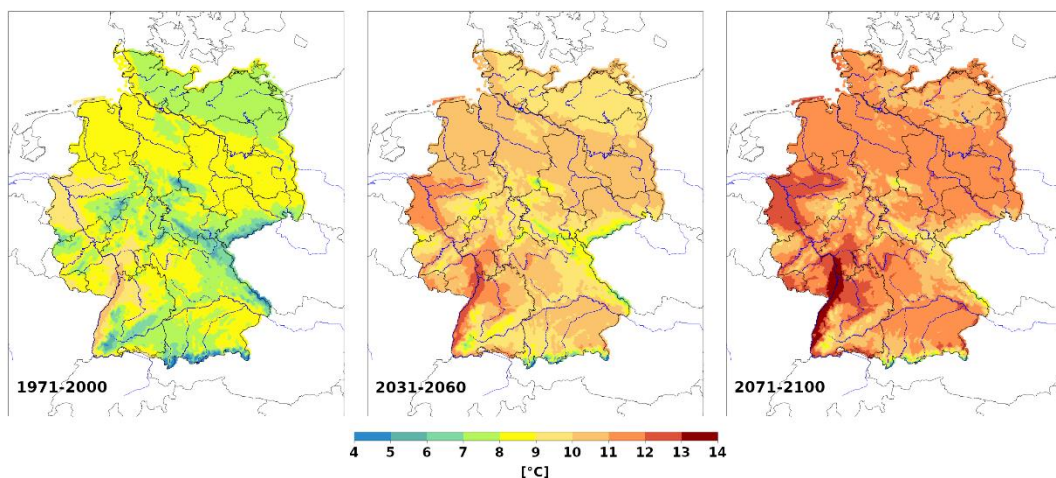


Abbildung 1: 30-Jahresmitteltemperatur für den historischen Zeitraum (1970-2000), für die nahe Zukunft (2031-2060) und für die ferne Zukunft (2071-2100) nach dem RCP8.5-Szenario (vgl. Deutscher Wetterdienst)

Der sechste Sachstandsbericht (Synthesis Report) des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) betont das Potential und den erheblichen Handlungsspielraum von Städten bei der Umsetzung von Klimaanpassungsstrategien. Neben einer emissionsarmen Bauweise, einer erneuerbaren Energieversorgung und der Reduktion verkehrsbedingter Emissionen stellen urbane Grün- und Wasserflächen eine entscheidende Stellschraube für die Anpassung städtischer Gebiete an den Klimawandel dar. (vgl. Lee et al. 2023, S. 105)

Angesichts des erheblichen Handlungsbedarfs, Städte an zukünftige klimatische Bedingungen anzupassen, ist es unerlässlich, eine ganzheitliche Betrachtungsweise zu verfolgen und die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Mobilität, Energie- und Wasserhaushalt, städtischem Grün und den Bedürfnissen der Bevölkerung zu berücksichtigen. Hier setzt das Forschungsprojekt CircularGreenSimCity (CGSC) an der Hochschule für Technik (HfT) Stuttgart an. Ziel des Projekts ist es, verschiedene Planungsdimensionen zu einem iterativen Planungsprozess zusammenzuführen, der zum einen eine Lebenszykluskostenbetrachtung und zum anderen die Wechselwirkungen der genannten städtischen Dimensionen berücksichtigt. Zur Definition von Leitlinien und zur Validierung des modellhaften Ansatzes werden mit der Software *SimStadt* Simulationen im Bereich des Energiebedarfs im aktuellen Zustand und für Zukunftsszenarien in Bestandsquartieren durchgeführt.

Ein mögliches Zukunftsszenario zur klimaresilienten Gestaltung von Städten ist die Erhöhung des Grünanteils innerhalb der Quartiere. Dies erfordert jedoch eine Reduktion des MIV, um Landnutzungskonflikte zu lösen. Die Schwerpunkte dieser Arbeit liegen auf der Analyse freierwerdender Potentialflächen in unterschiedlichen Mobilitätsszenarien und der Aufstellung daraus resultierender Baumpflanzungsszenarien, sowie der Simulation der Auswirkung dieser erhöhten Begrünung auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf und die Evapotranspiration der Bäume. Beispielhaft wird das Modell auf die Fallstudienggebiete Grombühl (Stadt Würzburg) und Grafenbühl (Stadt Asperg) angewandt. Beide Städte sind Praxispartner des Projekts CGSC.

Welche Auswirkungen die Erhöhung des städtischen Grüns auf den Energiebedarf der Gebäude hat, wie diese mit einer Änderung des Mobilitätsverhaltens zusammenhängt und inwieweit das Tool in der Praxis anwendbar ist, wird in der vorliegenden Arbeit in den zwei Fallstudienggebieten Grombühl und Grafenbühl simuliert und analysiert.

2 Theorieteil

Dieses Kapitel dient der Einordnung des Themas dieser Bachelorarbeit in die aktuelle Thematik der Stadtentwicklung und hebt die Bedeutung der Ausweitung städtischen Grüns hervor.

2.1 Nachhaltige Stadtentwicklung

Die Grundidee der *nachhaltigen Entwicklung* wurde erstmals in dem Brundtland-Bericht im Jahr 1987 definiert. Demnach stellt eine nachhaltige Entwicklung sicher, dass nach einer Befriedigung der gegenwärtigen Bedürfnisse die Möglichkeit auch für zukünftige Generationen gewahrt wird, ihre eigenen Bedürfnisse zu decken (vgl. World Commission on Environment and Development 1987). Bott et al. 2018 definieren den Begriff der Nachhaltigkeit als eine enge Verknüpfung der drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales. Als zentralen Gedanken formulieren Bott et al., dass „ohne den Schutz der Umwelt und die nachhaltige Nutzung der zu Verfügung stehenden Ressourcen [...] eine Gesellschaft nicht [langfristig] überlebensfähig [ist]“ (vgl. Bott et al. 2018, S. 13). Leistungen der Natur, die den Menschen direkt oder indirekt in wirtschaftlicher, materieller, gesundheitlicher und psychologischer Hinsicht beeinflussen, werden unter dem Begriff der Ökosystemdienstleistungen zusammengefasst und wirken in allen drei Bereichen der Nachhaltigkeit (vgl. Kampusch 2018, S. 18). Der Erhalt dieser Ökosystemdienstleistungen spielt für eine nachhaltige Stadtentwicklung eine zentrale Rolle. Um Städte an zukünftige Gegebenheiten anzupassen, ist es unabdingbar, alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in einem ganzheitlichen Rahmen zu betrachten und integriert zu denken. Zukünftige Stadtplanung muss das Ziel verfolgen die Lebensqualität gegenwärtiger sowie zukünftiger Generationen zu gewährleisten (vgl. Bott et al. 2018, S. 13).

2.1.1 Nachhaltige Stadtentwicklung auf internationaler und nationaler Ebene

Auf internationaler sowie nationaler Ebene gibt es verschiedene Strategiepapiere und Handlungsanweisungen zur Integration einer nachhaltigen Stadtentwicklung in den Planungsprozess. Im internationalen Kontext sind die Ziele der nachhaltigen Entwicklung (engl. Sustainable Development Goals, SDG) der Vereinten Nationen (United Nations, UN), die Neue Urbane Agenda und die Leipzig Charta 2020 zu nennen. Auf nationaler Ebene nehmen sich die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie und die Deutsche Stadtentwicklungspolitik dieses Themas an.

Die Vereinten Nationen definierten 2015 im Rahmen der Agenda 2030 siebzehn Ziele mit 169 Unterzielen einer nachhaltigen Entwicklung, die sogenannten Sustainable Development Goals (SDG). Die Weltgemeinschaft möchte mit der Umsetzung der SDG erreichen, dass auf der ganzen Welt menschenwürdiges Leben möglich ist und die natürliche Lebensgrundlage gewahrt wird. Durch die Sicherung von Frieden und Wohlstand für den Menschen und einen verantwortungsvollen Umgang mit den Ressourcen der Natur soll insgesamt global ein menschenwürdiger Lebensstandard erreicht werden. (vgl. United Nations 2024)

Die Agenda 2030 definiert unter anderem auch Ziele für die Entwicklung von urbanen Gebieten. Das SDG 11 *nachhaltige Städte und Gemeinden* bezieht sich auf die nachhaltige Stadtentwicklung. Es verfolgt eine inklusive, sichere, widerstandsfähige und nachhaltige Gestaltung von Städten und Siedlungen. („Make cities and humans settlements inclusive, safe, resilient and sustainable“ (United Nations 2024)). In den zehn Unterzielen des SDG 11 werden alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichermaßen berücksichtigt. Während sich das SDG 11 explizit auf die Entwicklung von Städten fokussiert, finden sich in anderen Nachhaltigkeitszielen Elemente, die durch die Begrünung urbaner Quartiere erreicht werden können. Grüne Städte tragen zu einer Verbesserung der Gesundheit und des Wohlergehens der Bevölkerung bei (SDG 3), sind eine Maßnahme, die zum Klimaschutz beiträgt (SDG 13) und fördern das Leben an Land (SDG 15) (vgl. United Nations 2024). Zum Erreichen der SDG ist es notwendig, diese in internationales, nationales Recht und lokales Handeln zu übertragen.

Mit dem Fokus auf der nachhaltigen Stadtentwicklung verabschiedeten die Vereinten Nationen auf der Konferenz Habitat III in Rio de Janeiro im Jahr 2016 die Neue Urbane Agenda mit der Vision „Städte für alle“ (vgl. United Nations 2016). Die Mitglieder der Vereinten Nationen definieren in dieser Agenda Grundsätze und Verpflichtungen im Hinblick auf eine klimaresiliente, zukunftsorientierte und nachhaltige Stadtentwicklung. Grundlage aller Grundsätze und Verpflichtungen bilden wiederum die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: Soziales, Ökonomie und Ökologie (vgl. United Nations 2016, S. 11).

Auf europäischer Ebene bildet die neue Leipzig Charta 2020, als Weiterentwicklung der Leipzig Charta 2007, ein strategisches Rahmenwerk zur nachhaltigen Stadtentwicklung (vgl. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2024b). Ausgehend von dem Spannungsfeld aus Ökonomie, Ökologie und Sozialem zeichnet die neue Leipzig Charta 2020 das Leitbild der produktiven (Ökonomie), der grünen (Ökologie) und der gerechten Stadt (Soziales). Nach diesem Leitbild schafft die produktive Stadt innerhalb eines innovativen, wettbewerbsfähigen, klima- und umweltfreundlichen Rahmens die Basis für das ökonomische Handeln in dem urbanen Raum. Die grüne Stadt stellt die ökologischen Merkmale des städtischen Raums in den Mittelpunkt. Dazu zählt beispielsweise ein verantwortungsbewusster Umgang mit der Ressource Boden, eine nachhaltige Energieversorgung und Mobilität, sowie die Schaffung von zugänglichen Grünflächen. Der soziale Aspekt des Nachhaltigkeitsdreiecks wird durch die gerechte Stadt verkörpert, indem durch Inklusion und Chancengleichheit die Teilhabe der Bevölkerung am sozialen Leben ermöglicht wird. (vgl. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2024b)

Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) verfolgt seit 2015 das Ziel, auf nationaler Ebene die 17 SDG der Agenda 2030 umzusetzen. Zur Zielerreichung definiert die Bundesregierung sechs Transformationsbereiche, welche die Forderungen der SDG berücksichtigen und die Wechselwirkungen betonen (vgl. Die Bundesregierung 2020, S. 16). Zu jedem SDG wurden Indikatoren, politische Prioritäten und Maßnahmen niedergeschrieben. Trotz der bereits erwähnten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zielen der Agenda 30, liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem SDG 11, welches die Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Stadtentwicklung vereint. Ziel der Bundesregierung ist es, „in unseren Städten und Gemeinden eine gemeinwohlorientierte, partnerschaftliche und resiliente Stadtentwicklung umzusetzen, die nachhaltige und leistungsfähige Strukturen schafft“ (Die Bundesregierung 2020, S. 265). Die DNS definiert bestimmte Handlungsschwerpunkte, wie beispielsweise die

sichere und hochwertige Gestaltung öffentlicher Räume, die Entwicklung einer ressourcenschonenden und inklusiven Infrastruktur, sowie die Forcierung der Wärme- und Verkehrswende. Bei der Umsetzung der Maßnahmen dürfen Städte nicht ausschließlich eigenständig betrachtet werden. Vielmehr darf die Verflechtung mit dem Umland und den ländlichen Regionen nicht außer Acht gelassen werden (vgl. Die Bundesregierung 2020, S. 266). Die Bedeutung des städtischen Grüns wird in den Schwerpunkten der Bundesregierung zur Umsetzung des SDG 11 nicht explizit benannt, obwohl es nach dem Unterziel SDG 11.7 Teil der Agenda 2030 ist.

2.1.2 Mehrwert nachhaltiger Stadtentwicklung

Der Mehrwert nachhaltiger Stadtentwicklung ist schwer messbar, da viele Faktoren subjektiv beeinflusst werden. Bott et al. unterscheiden zwischen dem ökonomischen, dem ökologischen Mehrwert und dem sozialen Mehrwert für Mensch und Gesellschaft. Außerdem zeigen sie die Komplexität einer nachhaltigen Stadtplanung auf: Zwischen den einzelnen Komponenten der Dimensionen gibt es unterschiedliche Wechselwirkungen, die in der Planung berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 2 sind mögliche Wechselwirkungen zwischen Stadtgrün, Energiebedarf und Mobilität dargestellt. Dies macht die Planung deutlich komplexer und zeitintensiver, wird aber im Ergebnis die Resilienz der Städte auf lange Sicht steigern. (Bott et al. 2018, 28 ff)

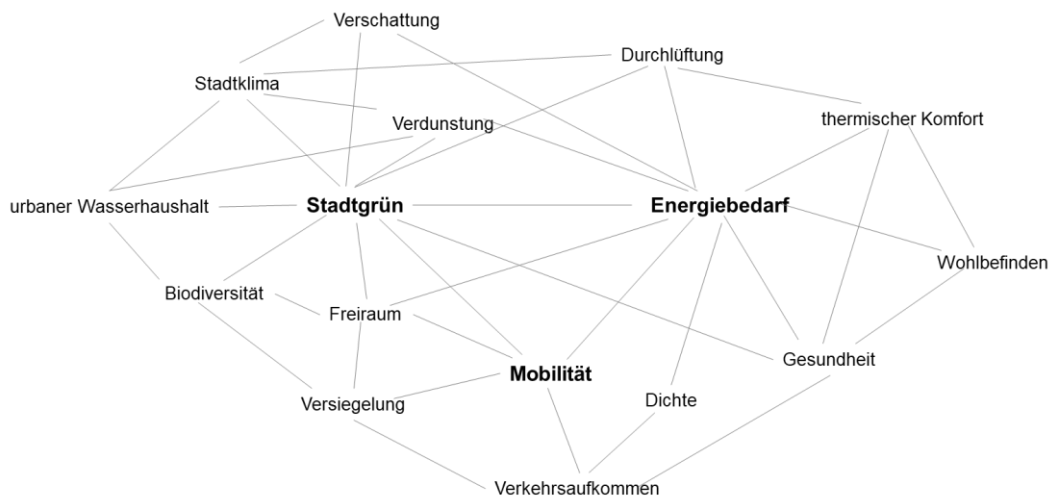


Abbildung 2: Dimensionen urbaner Nachhaltigkeit (eigene Darstellung nach Bott et al. 2018, S. 31)

Die Wechselwirkungen, aber auch resultierende Interessenskonflikte zwischen den einzelnen Dimensionen, zeigt das folgende Beispiel (angelehnt an Bott et al. 2018, S. 31). Das Platzangebot in dem urbanen Raum ist begrenzt. Bei der Umstrukturierung freiwerdender Flächen entsteht ein Interessenskonflikt zwischen Entsiegelung und Nachverdichtung. Nachverdichtung bedeutet die Schaffung neuen Wohnraums, der vor allem in Zeiten von Wohnungsmangel dringend benötigt wird (Mehrwert für Mensch und Gesellschaft). In der Folge entsteht ein erhöhter Mobilitätsbedarf in den nachverdichteten Gebieten, der zwar zu einer effizienteren Nutzung der bestehenden Verkehrssystemen führt, aber meist auch zu einer Erschließung neuer Verkehrswege zwingt und damit die Versiegelung erhöht. Dies steht häufig im Widerspruch zu der ökologischen Dimension der nachhaltigen Stadtentwicklung. Den Versiegelungsgrad zu

senken und das Grünangebot in der Stadt zu erhöhen, fördert den thermischen Komfort der Bevölkerung (Mehrwert für Mensch und Gesellschaft), ist für den Erhalt der Biodiversität im urbanen Raum essenziell (Mehrwert Ökologie) und senkt die Energiekosten (Mehrwert Ökonomie) (vgl. Bott et al. 2018, S. 31). Die Erhöhung des Grünvolumens stellt einen wichtigen Faktor in der klimaresilienten Anpassung von Städten dar und sollte deshalb verstärkt in die Planung integriert werden. In Kapitel 2.3 wird auf die Wirkungsweise und den Mehrwert von Stadtgrün näher eingegangen.

2.2 Das Stadtklima

Die klimatischen Bedingungen in einer Stadt unterscheiden sich stark von denen des Umlands. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert das Stadtklima als „ein gegenüber dem Umland durch die Bebauung und anthropogene Emissionen modifiziertes Mesoklima“ (Deutscher Wetterdienst 2024b). Die Eigenschaften verwendeter Baustoffe hinsichtlich Wärmespeicherungskapazität und Reflexion, der hohe Versiegelungsgrad, das Fehlen von städtischem Grün, die Oberflächenrauigkeit und damit verbundenen geringeren Windgeschwindigkeiten sowie anthropogene Emissionen aus Verkehr und Gebäudeenergiebedarf beeinflussen das Stadtklima (vgl. Deutscher Wetterdienst 2024b; vgl. Mehra 2021, S. 76). Infolgedessen sind die Temperaturen in der Stadt im Vergleich zum Umland deutlich höher. Die Temperaturdifferenz zwischen städtischen Raum und dem Umland kann 7-11 °C betragen (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 9).

Aufgrund unterschiedlicher Quartierstypologien weist das Klima einer Stadt eine große Varianz verschiedener Mikroklimata auf, die abhängig von der Bebauungsstruktur und dem Vorhandensein blauer und grüner Infrastruktur ist. Dadurch können beispielsweise lokal auftretende Hitzeinseln oder erhöhte Windgeschwindigkeiten in Straßenschluchten entstehen (vgl. Deutscher Wetterdienst 2024b). Ebenso bildet sich um die Vegetation ein eigenes Klima aus, das sogenannte Bioklima. Das Bioklima wird von jeder Pflanze individuell geprägt und ist sowohl von Höhe und Art der Vegetation als auch von der Interaktion der Pflanze mit der Umwelt abhängig (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 9).

Die heutige Bebauung in Städten erweist sich aus klimatologischer Sicht als ineffizient, denn die Gebäude sind an die mikroklimatischen Bedingungen in dem urbanen Raum nicht angepasst. Deshalb entstehen im Winter hohe Transmissionswärmeverluste, die die Lufttemperatur in der Stadt erhöhen. Im Sommer hingegen müssen die Gebäude mit hohem Energieaufwand gekühlt werden. (vgl. Mehra 2021, S. 76)

Diese spezifischen klimatischen Bedingungen im urbanen Raum haben weitreichende Folgen auf den thermischen und lufthygienischen Komfort der Bevölkerung. Der hohe Versiegelungsgrad und die Bebauung führen lokal zu steigenden Lufttemperaturen. Dieser Wärme- oder Hitzeinseleffekt führt vor allem im Sommer zu einer negativen Beeinflussung des thermischen Wohlbefindens der Menschen und steigert die Zahl der hitzebedingten Krankheits- und Todesfälle. (vgl. Mehra 2021, S. 77)

Doch nicht nur auf die Gesundheit der Bevölkerung hat der Wärmeinseleffekt eine Auswirkung. Eine zunehmende Erwärmung des urbanen Raums führt zu einem steigenden Energiebedarf für die Kühlung im Sommer, was wiederum die Energiekosten und die CO₂-Emissionen ansteigen lässt. Hitzeperioden führen zu einer Senkung des Grundwasserspiegels und gleichzeitig zu einem erhöhten Wasserbedarf, was vor allem in den Sommermonaten zu einem Problem für Mensch und Natur wird. Zunehmende

Hitze führt dazu, dass Frei- und Grünflächen künstlich bewässert werden müssen, was wiederum einen erhöhten Wasser- und Energiebedarf mit sich bringt. Freiraum und Grünflächen gewinnen aber immer mehr an Bedeutung, da ein steigender Bedarf an Kaltluftentstehungsgebieten und Erholungsflächen abzusehen ist. (vgl. Kampusch 2018, S. 10)

Eine durch Bebauung veränderte Oberflächenrauigkeit beeinflusst die Windzirkulation und damit den Luftaustausch. Dies führt entweder zu Windschneisen mit erhöhten Luftgeschwindigkeiten oder zu gänzlich fehlender Frischluftzufuhr. Bei unzureichender Windzirkulation wird schadstoffbelastete Luft nicht abtransportiert, die Luftqualität sinkt und die Niederschlagsbildung wird beeinträchtigt. Resultat können ausbleibende Niederschläge oder aber lokale Starkregenereignisse sein, die vor allem in Städten auf Grund des hohen Versiegelungsgrades schnell zu Überschwemmungen führen. Weitere Folgen sind im Vergleich zum Umland eine geringere Luftfeuchte, weniger Frosttage und eine verminderte Global- sowie Ultraviolette- (UV) Strahlung. (vgl. Mehra 2021, S. 77)

Im Hinblick auf den Klimawandel und einer zu erwartenden Steigerung der klimatischen Bedingungen hin zu Extremen besteht akuter Handlungsbedarf. Ein wichtiger Faktor zur Erreichung einer klimaresilienten Stadt ist, wie bereits erwähnt, die grüne Infrastruktur, welche in Kapitel 2.3 näher beleuchtet wird.

2.3 Grüne Infrastruktur

Das *Weißbuch Stadtgrün* der Bundesregierung und die *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel* unterstreichen die besondere Bedeutung von grüner Infrastruktur als effektive Klimaanpassungsstrategie (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 7). Die Ausweitung der grünen Infrastruktur ist nicht nur für die nachhaltige Stadtentwicklung entscheidend, sondern wirkt auch dem Wärmeinseleffekt entgegen (vgl. Kampusch 2018, S. 26). Unter grüner Infrastruktur, auch als Stadtgrün oder urbanes Grün bezeichnet, wird die Vernetzung natürlicher und naturnah gestalteter Flächen in Städten verstanden (vgl. Kampusch 2018, S. 18). Dies umfasst ein Netzwerk aus großflächig begrünten Freiräumen, begrünten Gebäuden und der Begrünung von Straßenräumen (vgl. Mehra 2021, S. 144). Zusätzlich zu begrünten Parkflächen oder zu Dach- und Fassadenbegrünung sind insbesondere Stadtbäume eine optimale Vegetationsform, um dem Wärmeinseleffekt entgegenzuwirken und einen Kühlungseffekt im städtischen Raum zu erzielen (vgl. Kampusch 2018, S. 20).

Die folgende Grafik des IPCC in Abbildung 3 veranschaulicht die Auswirkungen verschiedener städtischer Elemente auf die Temperatur im urbanen Raum. Die anthropogenen Einflüsse, wie die zunehmende Urbanisierung, dunkle Oberflächen und Transmissionswärmeverluste, führen zu einer Erhöhung der Temperatur um bis zu 2 °C gegenüber dem Umland. Im Gegensatz dazu steht die blaue und grüne Infrastruktur, welche zu einer Reduktion der Temperatur um bis zu 3 °C beiträgt.

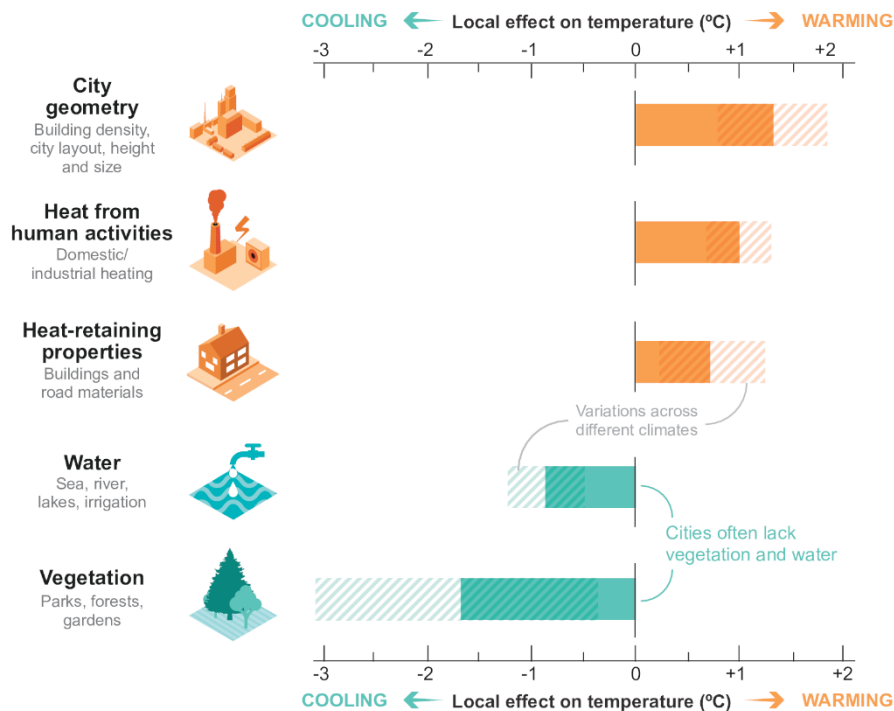


Abbildung 3: Auswirkungen ausgewählter urbaner Elemente auf die Temperatur in der Stadt (Doblas-Reyes et al., S. 1463)

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die grüne Infrastruktur, speziell auf Stadtbäume. In Kapitel 2.3.1 wird der Kühlungseffekt durch Stadtbäume, in Kapitel 2.3.2 der Mehrwert dieser für den urbanen Raum und in Kapitel 2.3.3 mögliche Herausforderungen des städtischen Grüns erläutert.

2.3.1 Kühlungseffekt durch Stadtbäume

Stadtbäume beeinflussen durch Verschattung und Verdunstung „die Lufttemperatur, die Strahlungsverhältnisse, die Wärmespeicherung der verschatteten Bereiche, die Windgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchtigkeit, die Oberflächenalbedo sowie die Oberflächenrauheit des Bodens“ (vgl. Mehra 2021, S. 121).

Winde in der Stadt sind essenziell, um Frischluft zuzuführen und kühlere Luft aus dem Umland in die erwärmten Städte zu transportieren. Die Verwirbelung bodennaher Winde fördert die Zufuhr von Kaltluft ins Stadttinnere, wobei eine möglichst heterogene Oberfläche in Bodennähe die Verwirbelung begünstigt. Neben der Bebauung beeinflusst auch die Vegetation maßgeblich die Oberflächenrauheit in der Stadt. Pflanzen tragen zur Verwirbelung der Luft bei und können gezielt als Steuerungselemente der

Windrichtung eingesetzt werden, dürfen jedoch nicht zu einer Windstille führen. (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 18)

Durch die Verschattung haben Stadtbäume einen direkten Einfluss auf die Temperaturen in der Stadt und den Energiebedarf der Gebäude. Der Schattenwurf der Bäume trägt maßgeblich zur Reduktion der thermischen Aufheizung des städtischen Raums bei. Er hängt von der Form, der Größe und der Belaubungsdichte der Baumkrone ab. Über den Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI), der das Verhältnis der Blattfläche pro Bodenfläche angibt und somit den Überdeckungsgrad der Baumkrone misst, kann der Verschattungseffekt bestimmt werden. Je höher der Überdeckungsgrad des Baums, desto stärker wird die eintreffende solare Strahlung abgeschwächt und desto spürbarer ist der Schatten. (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 20) Folglich ist der LAI bei einer Sonneneinstrahlung von 90° am geringsten. Eine Zunahme des LAI um eine Einheit kann an heißen Sommertagen eine Abnahme der Oberflächentemperatur von 1,2 Kelvin bewirken (vgl. Mehra 2021, S. 122).

Die Strahlungsintensität nimmt durch die Laubschichten exponentiell ab (Feldmann et al. 2023, S. 20). Bei vollbelaubter Baumkrone können Bäume bis zu 90 % der Strahlung absorbieren (vgl. Kampusch 2018, S. 27). Ein großer Teil dieser absorbierten Strahlung wird für die Photosynthese genutzt, während nur ein kleiner Teil wieder an die Umgebung abgegeben wird. Durch den Verschattungseffekt, abhängig von Baumart und Belaubungsdichte, kann die Lufttemperatur lokal unter Bäumen um bis zu 10–12 °C sinken (vgl. Kampusch 2018, S. 27; vgl. Feldmann et al. 2023, S. 21).

Es ist zu beachten, dass der tatsächliche Kühlungseffekt nicht nur durch den Baum selbst erzielt wird. Die tatsächliche Temperatur der Bodenfläche im Baumschatten wird zusätzlich von der Beschaffenheit und Färbung des Bodenmaterials und damit von seinem Reflexions- bzw. Absorptionsvermögen beeinflusst. Durch die Verwendung geeigneter Baumaterialien und die Gestaltung der Umgebung der Vegetation kann der Kühlungseffekt weiter gesteigert werden. (Feldmann et al. 2023, S. 21)

Ein weiterer Beitrag zur Kühlung des Stadtklimas ist die Verdunstung. Die Verdunstung beschreibt den physikalischen Prozess, bei welchem Wasser von dem flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht. Dieser Phasenübergang erfordert Energie, die der Umgebung entzogen wird. Diese Energieentnahme führt zu einer Temperaturabsenkung, die auch als "Verdunstungskälte" bezeichnet wird. (vgl. Deutscher Wetterdienst 2022)

Die Verdunstung kann in die Transpiration und die Evaporation unterteilt werden. *Transpiration* beschreibt den Vorgang, bei dem Pflanzen über ihre Wurzeln Wasser aus dem Boden aufnehmen und dieses hauptsächlich über ihre Blätter in Form von Wasserdampf an die Umgebung abgeben. Die für diesen Prozess benötigte Energie wird der eingestrahlten Globalstrahlung und somit der Umgebung entnommen. Über die Transpiration verlieren Bäume pro Tag bis zu 500 l Wasser, was einer Kühlleistung von bis zu 350 kWh entspricht. (vgl. Mehra 2021, S. 121).

Die *Evaporation* beschreibt die Verdunstung von Wasserflächen und von sowohl bewachsenen als auch von versiegelten Oberflächen, bevor das Oberflächenwasser abgeleitet wird. Bäume tragen durch ihr Blätterdach zu einer Erhöhung der Gesamtoberfläche für die Verdunstung, speziell nach Regenereignissen, bei. (vgl. Kampusch 2018, S. 18)

Eine genaue Aufteilung der Verdunstungsmengen nach Transpiration und Evaporation ist kaum möglich. Deshalb werden die beiden Verdunstungsprozesse unter dem Begriff *Evapotranspiration* zusammengefasst (vgl. Mehra 2021, S. 118). Die Teilprozesse sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

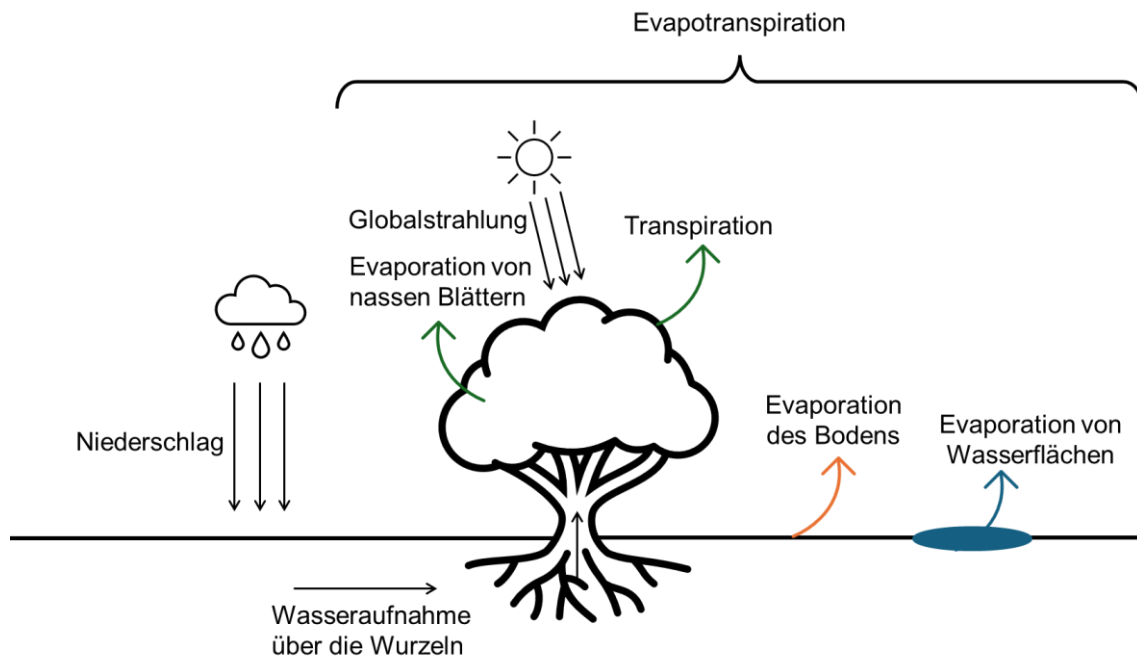


Abbildung 4: Schematische Darstellung Evapotranspiration (eigene Darstellung nach Zhang et al. 2020)

Wie der Verschattungseffekt ist auch der Kühlungseffekt von der Art und den Eigenschaften der Pflanzen, aber auch von dem Verhältnis von begrünten zu bebauten bzw. versiegelten Flächen, abhängig. Eine erhöhte Sonneneinstrahlung sowie hohe Lufttemperaturen in Verbindung mit niedriger relativer Luftfeuchtigkeit fördern die Verdunstung. Im Gegensatz dazu führt ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit zu einer Abnahme der Verdunstungsmenge. (vgl. Deutscher Wetterdienst 2022)

Die Verdunstung ist eng mit dem Vorhandensein unversiegelter Flächen verbunden. In Städten sind auf Grund des hohen Grads an Versiegelung kaum Verdunstungspotentiale vorhanden, da die versiegelte Oberfläche das Einsickern des Regenwassers in die oberen Bodenschichten und somit eine Zwischenspeicherung der Wassermengen verhindert. Ohne eine Erhöhung des Grünanteils kann dieses Kühlpotential nicht oder nur zu einem geringen Teil genutzt werden. Dabei stellen Bäume die wirksamste Vegetationsform zur Erzielung von Kühlungseffekten dar. Je mehr Bäume gepflanzt werden, desto spürbarer ist der Effekt. (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 24)

2.3.2 Mehrwert Stadtgrün

Bis zu welchem Grad die Elemente der grünen Infrastruktur Ökosystemdienstleistungen gewährleisten, ist abhängig von der Qualität und Quantität des städtischen Grüns. Die Ökosystemdienstleistungen können nach den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in soziale, ökonomische und ökologische Ökosystemdienstleistung unterteilt werden (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 13).

Die Bevölkerung in Städten leidet unter suboptimalen klimatischen Bedingungen, Lärm und verschmutzter Luft. Diese Lebensumstände können chronischen Stress als Folge haben, welcher durch eine Zunahme des Stadtgrüns verringert werden kann. Als soziale Ökosystemdienstleistung fördert urbanes Grün die psychische und physische Gesundheit der Menschen, stellt einen emotionalen Ausgleich her und fördert die Kreativität (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 13).

Der ökonomische Mehrwert von Stadtgrün kann nach Kampusch an verschiedenen Faktoren gemessen werden. Grüne Städte steigern die Lebensqualität und die Wettbewerbsfähigkeit, was sich positiv auf Wohnstandorts- und Investitionsentscheidungen auswirkt. Darüber hinaus führt eine geringe Hitzebelastung der Bevölkerung zu einer Entlastung des Gesundheitssystems und einer höheren Produktivität auch während Hitzeperioden. Dies hat aus volkswirtschaftlicher Sicht eine positive Wirkung (vgl. Kampusch 2018, S. 26). Durch den Verschattungseffekt der Bäume können insbesondere in den Sommermonaten Energiekosten zum Kühlen der Gebäude eingespart werden (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 14).

Auch in der ökologischen Dimension bietet Stadtgrün zahlreiche Vorteile. Die urbane Vegetation trägt zu einer Regulation des Stadtklimas bei, indem sie eine kühlere Lufttemperatur durch Verschattung und Verdunstung schafft. Dies trägt nicht nur zu einem erhöhten thermischen Komfort der Bevölkerung bei (soziale Ökosystemdienstleistung), sondern senkt zudem den Kühlbedarf der Gebäude (ökonomische Ökosystemdienstleistung) (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 14).

Pflanzen steigern durch ihre Filterwirkung die Luftqualität. Sie nehmen Luftschadstoffe auf, wandeln CO₂-Emissionen in Sauerstoff um und reduzieren die Ozonbildung (vgl. Kampusch 2018, S. 25). So konnte beispielsweise nachgewiesen werden, dass in Leipzig 11 t/ha und in Hamburg sogar 27,4 t/ha CO₂-Emissionen durch städtisches Grün gebunden wurden (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 27). Ein weiterer ökologischer Mehrwert städtischen Grüns ist die Dämpfung des Schallpegels (vgl. Mehra 2021, S. 115). Die beiden letztgenannten Punkte wirken zudem direkt gesundheitsfördernd.

Städtisches Grün stellt Lebensraum für verschiedene Lebewesen dar und leistet somit einen wichtigen Beitrag zum Erhalt der Biodiversität sowie zum Arten- und Naturschutz (vgl. Bott et al. 2018, S. 83). Des Weiteren wirkt sich Stadtgrün auf den Wasserhaushalt der Stadt aus. Grünflächen stellen eine unversiegelte Fläche dar und haben somit die Fähigkeit Regenwasser durch Versickerung aufzunehmen, dies führt zu einer Entlastung der Kanalisation, einer Reduktion des Überschwemmungsrisikos und einer erhöhten Grundwasseranreicherung. (vgl. Mehra 2021, S. 115; vgl. Kampusch 2018, S. 25)

2.3.3 Herausforderung grüner Infrastruktur im urbanen Raum

Urbane Vegetation steht vor Herausforderungen durch anthropogene Einflüsse wie beispielsweise Emissionen, versiegelte Oberflächen und verdichtete Böden. Diese von den natürlichen Gegebenheiten abweichenden Zustände stellen Stressfaktoren für die Pflanzen dar, auf welche diese mit Anpassungsstrategien reagieren. Zunächst reversible Anpassungsstrategien können schnell irreversible Folgen nach sich ziehen und die positiven Auswirkungen der Pflanzen auf ihre Umwelt reduzieren. (vgl. Feldmann et al. 2023, 30 f)

Resilienz und Resistenz gegenüber sich verändernden klimatischen Bedingungen spielen auch bei der Vegetation eine bedeutende Rolle, um die Widerstandsfähigkeit der Pflanze zu erhöhen. Unter Resilienz wird die zeitweise Anpassung der Pflanze an eine Extremsituation beschrieben. Ist die Extremsituation überstanden, weist diese keine bleibenden Schäden auf und kehrt zu einer vollen Leistungsfähigkeit zurück. So können Pflanzen beispielsweise bei extremer Trockenheit und Wassermangel ihre Blätter einrollen, um den Verlust von Wasser über die Verdunstung zu reduzieren (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 31). Resistente Veränderungen an den Eigenschaften der Pflanze verändern ihre Leistung dauerhaft. Zum Beispiel würde eine geringere Blattgröße oder eine breitere Wachsschicht auf der Blattoberfläche die Verdunstung reduzieren. Da diese Veränderung irreversibel ist, kann die Pflanze ihre ursprünglichen Leistungen nur noch in einem geringeren Maße ausführen (vgl. Feldmann et al. 2023, S. 33).

Bäume stellen eine essenzielle Komponente der nachhaltigen Stadtentwicklung dar, da sie Mehrwert in allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bieten. Deshalb dürfen die Bedürfnisse dieser nicht außer Acht gelassen werden, um auch in Zukunft von der grünen Infrastruktur profitieren zu können. Um Platz für einen steigenden Grünanteil im urbanen Raum zu schaffen, ist unter anderem eine Veränderung in dem Mobilitätsverhalten notwendig.

2.4 Mobilitätsveränderung

Mobilität kann als das „Bedürfnis nach Beweglichkeit und dem Potential zur Fortbewegung“ definiert werden (Bott et al. 2018, S. 114). Durch das Bedürfnis nach einer Ortsveränderung von Personen oder Gütern entsteht Verkehr. Je nach Art des eigenen Mobilitätsbedürfnisses und dem Zweck der Ortsveränderung unterscheidet sich die Wahl des Verkehrsmittels. Die prozentuale Verteilung des Verkehrsaufkommens auf unterschiedliche Verkehrsmittel wird als *Modal Split* bezeichnet (vgl. Bott et al. 2018, S. 117).

In den letzten Jahrzehnten stand der motorisierte Individualverkehr häufig im Vordergrund der Stadtplanung. Als Folge entstanden monofunktionale Straßenräume mit einer klaren Trennung der einzelnen Verkehrsteilnehmer (vgl. Kampusch 2018, S. 14). Straßenflächen verbrauchen eine große Menge der Ressource Boden, obwohl der angebotene Platz häufig nur in kurzen Zeitintervallen komplett ausgelastet ist (vgl. Bott et al. 2018, S. 115). Hier besteht Handlungsbedarf, um die Größe des Straßenraums gänzlich und effizient zu nutzen und nicht nur auf die Funktion der Ortsverbindung zu beschränken (vgl. Kampusch 2018, S. 14).

Der aktuelle Ergebnisbericht *Mobilität in Deutschland* zeigt auf, dass der PKW noch immer eine dominante Rolle bei der alltäglichen Verkehrsmittelwahl der Bevölkerung darstellt. Trotz einer Ausweitung des Alternativangebots ist kein Rückgang in der MIV-Nutzung zu verzeichnen (vgl. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH 2018, S. 45).

In dem ganzheitlichen Konzept einer nachhaltigen Stadtentwicklung spielt der Bereich Verkehr und Mobilität somit eine entscheidende Rolle. Diesen nachhaltig zu gestalten, eröffnet einige Handlungsfelder und Herausforderungen, wie beispielsweise die Vermeidung verkehrsbedingter Emissionen, die Reduktion des Flächenverbrauchs, die

Steigerung der Sicherheit im Straßenraum und die Befriedigung der individuellen Mobilitätsbedürfnisse (vgl. Bott et al. 2018, S. 114). Ziel muss es sein, den Anteil des MIV zu senken und ein hohes Maß an Integration und Vernetzung verschiedener alternativer Mobilitätsformen zu schaffen (vgl. Bott et al. 2018, S. 117). Nur durch eine Schaffung von Alternativen zum MIV kann die Bereitschaft der Bevölkerung, auf den eigenen PKW zu verzichten und auf nachhaltige Mobilitätsformen auszuweichen, weiter gesteigert und auf lange Sicht eine 80/20 Verteilung im Modal Split erreicht werden. Diese Verteilung bedeutet, dass 80 % der Verkehrsteilnehmer ein nicht motorisiertes Verkehrsmittel und 20 % ein motorisiertes Verkehrsmittel wählen (vgl. Bott et al. 2018, S. 231).

Neben der Ausweitung des Mobilitätsangebots kann auch die Stadtplanung den Trend einer autoarmen Stadt unterstützen. Die „Stadt der kurzen Wege“ oder die kompakte Stadt sind beispielweise Planungsansätze, die Wohnen und Arbeiten vereinen und so den Pendelverkehr reduzieren. Dies setzt aber wiederum ein flächendeckendes ÖPNV- und Sharingangebot, eine Nachverdichtung im urbanen Raum, die Möglichkeit zur Deckung des täglichen Grundbedarfs in einem kleinen Radius und eine funktionierende soziale Infrastruktur, in Form lokaler Bildungs- und Freizeitangebote, voraus. (vgl. Bott et al. 2018, S. 117)

Eine Senkung des MIV-Anteils im Modal Split bedeutet nicht nur, dass die Menge des fließenden Verkehrs abnimmt, sondern auch, dass der Bedarf nach Parkraum sinkt. Sinkt der Parkraumbedarf, werden Flächen frei, die anderweitig genutzt werden können. Dieses Flächenpotential wird im Rahmen dieser Arbeit modellhaft bestimmt und zur Pflanzung von Straßenbäumen genutzt (vgl. Kapitel 5.3).

2.5 Aktueller Stand der Forschung

Die Analyse und Simulation der Auswirkungen von Stadtgrün auf den urbanen Raum sind in der Forschung präsent. Verschiedene Studien befassen sich mit dieser Thematik.

Beispielsweise analysierten Donovan und Butry in ihrer Studie den Effekt von Bäumen auf Einfamilienhäuser in Sacramento, Kalifornien. Sie haben herausgefunden, dass Bäume auf der Nordseite eines Gebäudes den sommerliche Strombedarf leicht erhöhten, während Bäume auf der Ost- und Südseite zu einer Reduktion des Strombedarfs beitrugen. In Summe war über das Jahr mit einer Verringerung des Strombedarfs zu rechnen. (vgl. Donovan und Butry 2009)

Calcernao und Martinelli widmeten sich mit ihrer Analyse der Wechselwirkung zwischen dem städtischen Mikroklima und dem Gebäudeenergiebedarf. Sie untersuchten den Verschattungseffekt von Bäumen an zwei Gebäuden in den Sommermonaten. Das Ergebnis deckt sich mit der oben aufgeführten Studie: Die Anzahl an Bäumen verringert den Energiebedarf im Sommer proportional. (vgl. Calcerano und Martinelli 2016)

Mit Hilfe eines Mikroklimamodells haben Erell und Zhou nachgewiesen, dass der UHI in Städten zu einem Anstieg des erforderlichen Kühlbedarfs führt. Sie haben analysiert, dass mit einer Erhöhung des Baumbestands die Temperatur im Schnitt um 0,3°C pro Jahr gesenkt werden kann und sich eine Einsparung des Gebäudeenergiebedarfs gegenüber dem Status Quo um 2-3% ergibt. (vgl. Erell und Zhou 2022)

Weitere Betrachtungen des Einflusses von Stadtgrün auf die Lufttemperatur haben Schwab et al. durchgeführt. In über 290 europäischen Städten werteten sie mittels Satellitendaten die Oberflächentemperaturen aus. Sie zeigen auf, dass städtisches Grün zu einer Abkühlung des urbanen Raums beiträgt. Durch städtische Bäume stellt sich eine zwei- bis viermal stärkere Verringerung der Temperatur ein als bei baumlosen städtischen Grünflächen. (vgl. Schwaab et al. 2021)

Moss et al. benutzten zwei methodische Ansätze, um die Ökosystemdienstleistung der Evapotranspiration der Bäume in der Stadt London aufzuzeigen und monetär zu bewerten. Der Verschattungseffekt wird in die Betrachtung nicht miteinbezogen. Als ersten Ansatz bestimmten sie die Kühlleistung der Evapotranspiration über die Enthalpie, welche sie anschließend mit der Leistung eines maschinellen Verdunstungskühlsystems gleichsetzten, um potenzielle Einsparungseffekte aufzuzeigen. In einem zweiten Ansatz simulierten Moss et al. die Energieeinsparung von Gebäuden auf Grund der durch die Evapotranspiration abgekühlten Luft. Für diese Simulation wurde ein einzelstehendes Gebäude bzw. ein einziger Straßenzug betrachtet. In beiden Ansätzen konnten sie eine Reduktion des Energiebedarfs und somit eine Verringerung der Energiekosten feststellen. (vgl. Moss et al. 2019)

In verschiedenen Studien wird der Mehrwert eines erhöhten Grünanteils bestätigt, jedoch findet selten eine Verknüpfung zwischen mehreren Wechselwirkungen statt. So wird der Effekt auf den Gebäudeenergiebedarf nicht auf Quartiersebene bzw. dichten Bebauungsstrukturen betrachtet. Des Weiteren wird das Mobilitätsverhalten der Bewohner des untersuchten Quartiers nicht mit in die Betrachtung einbezogen.

Eine ganzheitliche Betrachtung einer Vielzahl, der für die Entwicklung einer nachhaltigen Quartiersstruktur relevanten Komponenten ist entscheidend, um sowohl den Status Quo bestmöglich abzubilden als auch mögliche Zukunftsszenarien zu simulieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Wechselwirkungen zwischen einer Veränderung des Mobilitätsverhaltens, dem Anteil an Stadtgrün in Form von Bäumen und dem thermischen Gebäudeenergiebedarf betrachtet.

3 Methodik und Toolerläuterung

Dieses Kapitel dient einer Übersicht über die angewandte Methodik. Zunächst wird auf die einzelnen Schritte und anschließend auf die benötigten Tools eingegangen.

3.1 Methodik

Für die Aufstellung möglicher Baumpflanzungsszenarien zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Geoinformationsdaten benötigt. Die Daten waren von den Gemeinden bereitgestellt worden oder wurden bei dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung erworben. Die Aufbereitung der Daten und die Vorbereitung dieser für die Simulation erfolgten mittels der Geoinformationssoftware ArcGIS Pro.

Der für die Simulation verfolgte Ansatz zur Identifikation der Potentialflächen zur Pflanzung neuer Bäume sah diese ausschließlich im Parkraum vor, da die Fahrbahnbreite als versiegelte Fläche auch bei einer veränderten Verkehrsmittelwahl bestehen bleibt. Als weitere Grundlage wurden die von der Firma Drees & Sommer, Praxispartner des Forschungsprojekts CGSC, definierten Quartiersarchetypen herangezogen. Jedem Quartiersarchetyp sind Straßenquerschnitte nach der Richtlinie für die Anordnung von Stadtstraßen 06 (RASt 06) zugeordnet. Über den Straßenquerschnitt wurde die Parkplatzfläche im Straßenraum bestimmt, welche die maximale Potentialfläche des Quartiers für Pflanzungen darstellt. Als letzter Input-Parameter für die Berechnung der Potentialfläche wurde eine Reduktion des MIV angenommen. Je nach definiertem Mobilitätsszenario reduziert sich der MIV-Anteil um einen bestimmten Prozentwert. Über diese Reduktion wurde die Potentialfläche je Szenario bestimmt und anschließend über den minimal benötigten Flächenbedarf eines Baumes die szenariospezifische Anzahl der neuen Bäume errechnet. Eine detailliertere Erläuterung der Annahmen und des Vorgehens zur Bestimmung der Potentialfläche erfolgt in Kapitel 4 und in Kapitel 5.3.

Mit Hilfe eines Python-Skripts werden die Bäume in einem vorher definierten Abstand in dem gewählten Gebietsausschnitt automatisch gepflanzt. Nach Durchlaufen des Skripts wird eine neue Datei generiert, welche zur weiteren Verwendung mit einer CityGML des gewählten Gebietsausschnitts verbunden wird.

Die Simulation der Gebäudeenergiebedarfe unter Berücksichtigung der Verschattung sowie der Evapotranspiration der Bäume erfolgt mit dem Tool SimStadt. Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden abschließend die verschiedenen Szenarien hinsichtlich einer Veränderung des Gebäudeenergiebedarfs und der Evapotranspiration verglichen. Für den Energiebedarf wurde festgelegt, dass die Heizperiode typischerweise von Oktober bis April andauert. Entsprechend geht die Kühlperiode von Mai bis September. Die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse basieren auf dieser Annahme.

Um den Heiz- und Kühlbedarf zu bewerten, werden die CO₂e-Emissionen für die einzelnen Szenarien ermittelt. Hierfür wurde angenommen, dass alle Wohngebäude mit Gas beheizt werden und ein Emissionsfaktor von 0,202 kg CO₂e/kWh (vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2021, S. 6) angesetzt.

$$\text{Heizbedarf [kWh]} * 0,202 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = [\text{kg}] \text{CO}_2\text{e}$$

Für den Kühlbedarf wurde über eine Leistungszahl (COP, Coefficient of Performance) von 4 die erforderliche Strommenge ermittelt (vgl. Wolf Kältetechnik GmbH 2024). Über den Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 0,442 kg CO₂e/kWh (vgl. Icha und Lauf 2023, S. 17), wurden die CO₂e-Emissionen des Kühlbedarfs bestimmt.

$$\text{Kühlbedarf [kWh]} * \frac{1}{4} * 0,442 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = [\text{kg}] \text{CO}_2\text{e}$$

Die Evapotranspiration ermittelt SimStadt in Litern. Mittels der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser von 2262 kJ/kg (vgl. Tipler und Mosca 2015, S. 571) und der Annahme, dass 1 l Wasser eine Masse von 1 kg hat, erfolgt die Berechnung der Energiemenge der Evapotranspiration in kWh.

$$Q_{ET} = m_{ET} * 2262 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \frac{1}{3600} \frac{\text{kWh}}{\text{kJ}} \quad \text{mit} \quad \text{Sum ETc} = m_{ET}$$

Sum ETc = Menge der Evapotranspiration [l]

m_{ET} = Masse der Evapotranspiration [kg]

Q_{ET} = Energiemenge der Evapotranspiration [kWh]

Durch die Globalstrahlung wird in das System Stadt Energie eingebracht. Über die Evapotranspiration entziehen die Pflanzen diesem System Energie. Dieser Energieentzug wird in das Verhältnis zu der Globalstrahlung im jeweiligen Gebietsausschnitt gesetzt. Eine reduzierte Globalstrahlung führt zu einer geringeren Erwärmung der Stadt.

Des Weiteren führt die Evapotranspiration zu einer Absenkung der umgebenden Lufttemperatur. Die Temperaturveränderung ΔT wird über die Energiemenge, welche durch die Evapotranspiration freigesetzt wird, bestimmt (vgl. Tipler und Mosca 2015, S. 568). Für die Berechnung wurde die Annahme getroffen, dass es sich bei dem Gebietsausschnitt um einen leeren mit Luft gefüllten Volumenkörper mit einer Höhe von 15,0 m handelt. Die Höhe wurde so gewählt, da die höchsten Bestandsbäume in Grombühl eine Höhe von 15,0 m aufweisen. Diese Annahme wurde für Grafenbühl übernommen, damit für alle Berechnungen die gleichen Ausgangsparameter gelten.

$$\Delta T = \frac{Q_{ET}}{m_L * c} \quad \text{mit} \quad m_L = V_{GA} * \rho \quad \text{und} \quad Q_{ET} = \text{Sum ETc} * 2262 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

c = spezifische Wärmekapazität Luft = 1,005 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$ (vgl. Paschotta 2023)

Q_{ET} = Energiemenge der Evapotranspiration [kJ]

ρ = Dichte der Luft = 1,225 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ (vgl. Deutscher Wetterdienst 2024a)

m_L = Masse der Luft [kg]

ΔT = Temperaturänderung [K]

V_{GA} = Volumen des Gebietsausschnitts [m³]

3.2 Toolvorstellung

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, ist das Python-Skript für die automatische Pflanzung der Bäume relevant und das Tool SimStadt wird für die Simulation und Analyse des Energiebedarfs sowie der Evapotranspiration verwendet.

3.2.1 Funktionsweise Python-Skript

Das Python-Skript ermöglicht es, automatisch Bäume zu OpenStreetMap (OSM) -Daten hinzuzufügen. Da es sich bei OSM-Daten um öffentlich verfügbare Daten handelt, ist auch nur der öffentliche Raum abgebildet, dementsprechend werden neue Bäume nur in diesem gepflanzt.

Für die Ausführung des Skripts sind die Koordinaten des gewünschten Gebietes erforderlich. Diese Koordinaten können mithilfe des Region-Choosers, einem Bestandteil des SimStadt-Installationspakets, ermittelt werden. Zusätzlich wird eine Shapefile (shp) -Datei benötigt, die die vorhandenen Bäume enthält, wie beispielsweise ein städtisches Baumkataster. Vor dem Start des Skripts müssen Parameter wie der Abstand zwischen den neuen Bäumen, der Mindestabstand zu bestehenden Bäumen sowie Baumart, Baumhöhe und Kronenbreite definiert werden.

Beim Starten des Skripts werden aus den OSM-Daten die in dem Gebietsausschnitt vorliegenden Straßentypen ausgelesen. Die Eignung zur Pflanzung zusätzlicher Bäume hängt vom jeweiligen Straßentyp ab. Ein geeigneter Straßentyp ist der Typ „residential“ (Wohn- und Siedlungsstraßen). Anhand des Straßentyps wird entschieden, ob sich die Straße zur Bepflanzung eignet und ob der Befehl zum Bäume pflanzen ausgeführt wird. Zudem ist die Klassifizierung der Straßen notwendig, da jedem Straßentyp eine Breite zugeordnet werden kann. Das Skript positioniert die neuen Bäume beidseitig versetzt entlang der Straße. Sollte es Straßen ohne Klassifikationsattribute geben, werden diese von vergleichbaren Straßen in der Umgebung übernommen. Beispielsweise wird einer Straße mit dem Attribut „residential“, aber ohne Information zur tatsächlichen Breite, eine Standardbreite von 6,5 Metern zugewiesen.

Als Output liefert das Skript verschiedene Dateiformate, unter anderem eine shp-Datei mit den neuen Bäumen, welche für die Simulation in SimStadt notwendig ist. Des Weiteren wird ein HTML-Link zu OSM generiert, welcher die neu gepflanzten Bäume, sowie die Bestandsbäume visualisiert. Diese Output-Datei ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Neupflanzungen im Fallstudiengebiet (Datengrundlage: CGSC und eigene Berechnung)

3.2.2 SimStadt

SimStadt ist eine Modellierungsplattform für urbane Energiesysteme, die an der HfT Stuttgart entwickelt und stetig weiterentwickelt wird. Die Verrechnung unterschiedlicher Daten erfolgt in sog. *Workflows*. Unterschiedliche Workflows ermöglichen es beispielsweise den Energiebedarf bestehender Stadtquartiere, ihr Potential zur Nutzung erneuerbarer Energien und den Wasserhaushalt zu berechnen.

Für die Durchführung der Simulationen müssen verschiedene Vorgaben, in Form von Inputdaten, in das Tool eingespeist werden. Wesentliche Komponente ist eine CityGML-Datei, welche Informationen zu der Gebäudegeometrie, dem Baujahr und der Gebäudenutzung enthält. Des Weiteren werden meteorologische Daten benötigt, die in stündlicher Auflösung unter anderem die solare Strahlung, die Niederschlagsmenge, die relative Feuchte und die Temperatur enthalten.

Speziell für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen muss die CityGML mit Baumdaten angereichert werden. Im Idealfall können diese aus dem städtischen Baum-/ Grünkataster, aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) oder aus OSM-Daten gewonnen werden. Ist dies nicht der Fall, müssen Luftbilder zur Identifikation des Baumbestands herangezogen werden und die Daten manuell in die Datei übertragen werden. Das 3D-Gebäudemodell, welches mit den Gründaten angereichert wurde, fließt nun in den SimStadt-Workflow ein.

Aus den in der CityGML hinterlegten Daten zur Baumhöhe und Kronenbreite, werden in dem Modell 3D-Bäume generiert. Beispielhaft ist Abbildung 6 das 3D-Gebäudemodell mit Grunddaten des Fallstudiengebiets Grombühl dargestellt.



Abbildung 6: 3D-Gebäudemodell mit Baumdaten Fallstudiengebiet Grombühl (Datengrundlage: CSGC)

Zwei spezifische Workflows sind für die anstehenden Simulationen von Bedeutung: *Heat Demand Calculation with Shadow Processing* und *Green Water Analysis*.

Der Workflow *Heat Demand Calculation with Shadow Processing* berechnet die Heiz- und Kühlbedarfe der Wohngebäude unter Berücksichtigung der Verschattung der Gebäude untereinander und der Verschattung der Gebäude durch Bäume. Da die Verschattungseffekte je nach Jahreszeit variieren, wird die Vegetationsperiode des Baums in der Simulation berücksichtigt. Das Ergebnis dieses Workflows umfasst die monatlichen Heiz- und Kühlbedarfe, sowie die spezifischen Heiz- und Kühlbedarfe je Quadratmeter Wohnfläche der Gebäude inklusive des Verschattungseffekts.

Der Workflow *Green Water Analysis* wird zur Berechnung des Wasserhaushalts eines Baums genutzt. Für die folgenden Szenarien dient er als Grundlage zur Bestimmung der Evapotranspiration. Die Evapotranspirationsrate kann durch eine Veränderung des Stressfaktors beeinflusst werden. Über den Stressfaktor wird festgelegt, ab welcher natürlich vorkommenden Wassermenge der Baum zusätzlich künstlich bewässert werden soll. Für die folgende Simulationen wurde der Stressfaktor auf 0,0 festgelegt. Folglich findet keine künstliche Bewässerung der Bäume statt.

Als Ergebnis des *Green Water Analysis* Workflows wird eine CSV-Datei generiert. Diese Datei enthält neben Daten zum stündlichen Abfluss und der stündlichen Regenmenge die Summe der stündlichen Evapotranspiration aller der im Quartier vorkommenden Bäume. Zudem wird für den größten Baum jeder Spezies die stündliche Evapotranspiration sowie die Menge an Wasser, die dem Baum fehlt, ausgewiesen.

4 Modellhafte Analyse des Mobilitätsverhaltens

Das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Ausgehend von der städtebaulichen Typologie ändert sich die Wahl des Verkehrsmittels mit der Sozialstruktur der Einwohner und der Lage des Quartiers im Stadtbezug. Die Wahl des Verkehrsmittels der Bevölkerung verändert den Modal Split innerhalb des Stadtquartiers und den daraus resultierenden Raumbedarf für Park- und Verkehrsflächen. Eine Verringerung des MIV zugunsten alternativer Mobilitätsformen schafft freie Flächen im Straßenraum. Für die folgenden Szenarien wird diese freiwerdende Fläche genutzt, um den Anteil des Stadtgrüns zu erhöhen. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen liegt der Fokus auf der Untersuchung, wie sich das Pflanzen von Stadtbäumen auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf und die Temperaturabsenkung durch Evapotranspiration auswirkt.

Dieses Kapitel baut auf den von Drees & Sommer ermittelten und im Rahmen des Forschungsprojekts CGSC zur Verfügung gestellten Daten auf.

4.1 Quartiersarchetypen

Die Besiedlungsformen von Städten lassen sich in verschiedene Quartiersarchetypen unterteilen. Die Zuordnung erfolgt auf Basis verallgemeinernder Charakteristika in Bezug auf geographische, städtebauliche, energetische, demographische sowie verkehrliche Besonderheiten. Auf Grundlage dieser Faktoren hat Drees & Sommer zehn Quartiersarchetypen definiert (vgl. Menges et al. 2024a). Die im Folgenden kursiv gedruckten Quartiersarchetypen sind für die vorliegende Arbeit von Bedeutung, da diese in den Fallstudiengebieten Grombühl und Grafenbühl vorzufinden sind.

Die zehn Quartiersarchetypen sind:

- *Ein- und Zweifamilienhausquartier,*
- *Blockrandbebauung,*
- Großwohnsiedlungen,
- Dörfliche und kleinteilige Struktur,
- *Zeilen- und Reihenbebauung,*
- Historische Altstadt,
- Innenstadt/ Citybebauung,
- Gewerbegebiet und Industrieparks,
- *Neue Innenstadtquartiere* und
- Campusstruktur/ Büro.

Die Größe der Straßenräume unterscheidet sich je nach Quartiersarchetyp, weshalb jedem Quartiersarchetyp ein am häufigsten vorkommender Straßenquerschnitt nach der RAST 06 zugeordnet werden kann (vgl. Anhang 4)

4.2 Mobilitätsverhalten in den Quartiersarchetypen

Die soziale Struktur variiert in den einzelnen Quartiersarchetypen und führt somit zu einem unterschiedlichen Modal Split. Nach der Werteorientierung und der sozialen Lage werden die Einwohner unterschiedlichen Gruppen, sogenannten Milieus, zugeordnet. Die im Folgenden berücksichtigte Gesellschafts- bzw. Zielgruppensegmentation wurde von dem Sinus Institut durchgeführt, weshalb die zehn identifizierten Gruppen als Sinus-Milieus bezeichnet werden. (vgl. Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH 2024)

Laut dem Sinus Institut können die in Abbildung 7 dargestellten Sinus-Milieus in einer Gesellschaft identifiziert werden. Auf der y-Achse ist die soziale Lage und auf der x-Achse die Werteorientierung und das sich daraus ableitende, wahrscheinliche Verhalten dargestellt. „Je höher ein Milieu in dieser Grafik angesiedelt ist, desto gehobener sind Bildung, Einkommen und Berufsgruppe; je weiter nach rechts es sich erstreckt, desto moderner im soziokulturellen Sinn ist die Grundorientierung des jeweiligen Milieus“ (Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH 2024).

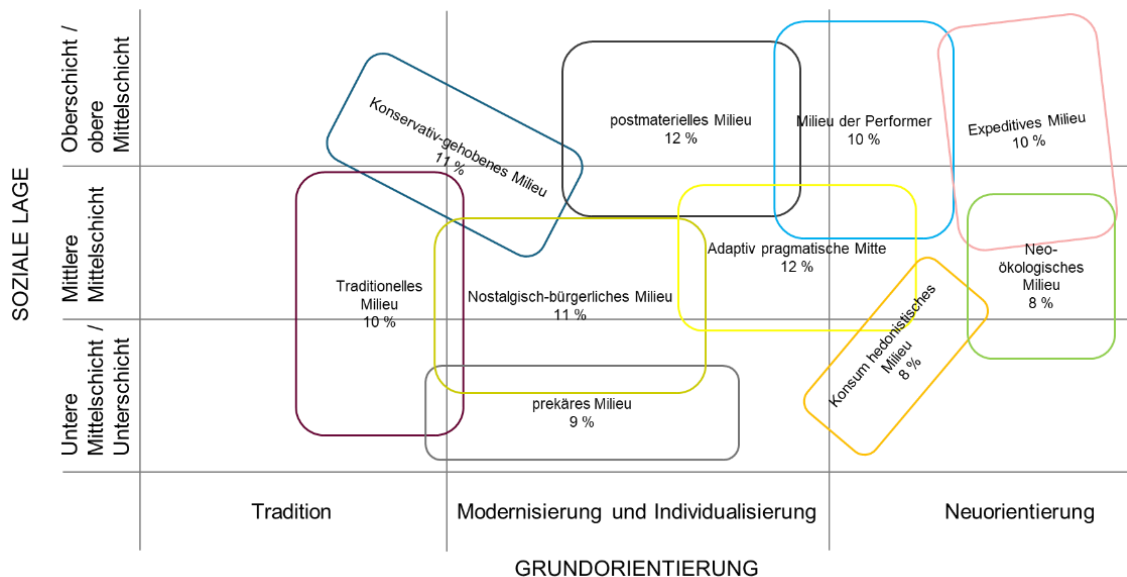


Abbildung 7: Die zehn Sinus Milieus in einer Gesellschaft (eigene Darstellung nach Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH 2024)

Jedes Sinus-Milieu wird charakterisiert durch

- einen typischen Lebensstil,
- die Altersstruktur,
- das typische Wohnumfeld,
- die Vorlieben für die Infrastruktur sowie
- das Freizeitverhalten.

Diese Charakteristika ermöglichen eine Identifizierung der drei am häufigsten, der zwei mittleren, der zwei geringsten sowie der drei nicht vorkommenden Sinus-Milieus je Quartiersarchetyp. In Anhang 1 ist die Verteilung der Sinus-Milieus in den Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier dargestellt.

Nach den Merkmalen und Verhaltensmustern der einzelnen Sinus-Milieus wurde eine Prognose zur Aufteilung des Modal Splits je Sinus-Milieu getroffen. Beispielsweise werden dem konservativ-gehobene Milieu, das Teil der Oberschicht ist, hohe Statusansprüche zugeordnet, die in dem Festhalten an ein eher traditionelles Gesellschaftsbild resultieren. Eine grundsätzlich hohe Bedeutung des MIV kann diesem Milieu unterstellt werden. Dem prekären Milieu, das der Unterschicht zugeordnet wird, wird der Kampf um gesellschaftliche Teilhabe und die mangelnde Ausstattung mit finanziellen Mitteln zugeschrieben. Der MIV-Anteil im Modal Split wird in Ermangelung entsprechender Mittel geringer ausfallen. Das neo-ökologische Milieu als Teil der mittleren bis unteren Mittelschicht, ist gekennzeichnet von einer hohen Akzeptanz für neue Formen eines ökologischen und solidarisch geprägten Lebensstils. Hier ist ein Bevorzugen alternativer und klimafreundlicherer Verkehrslösungen zu erwarten. (vgl. Menges et al. 2023)

Für die drei detaillierter beschriebenen Milieus ist der Modal Split in Anhang 2.1 dargestellt. Abhängig von der sozialen Struktur entsteht so je Quartiersarchetyp ein individueller Modal Split, welcher für die vier Quartiersarchetypen in Anhang 2.2 visualisiert ist.

Da aber nicht nur die soziale Struktur, sondern auch die geografische Lage eines Quartiers die Verkehrsmittelwahl beeinflusst, wurde der Modal Split mittels Lagefaktoren nachjustiert. Unterschieden wird in zentrale/ urbane Lage, periphere Lage und ländliche Lage. Je nach Lage sind bestimmte Quartiersarchetypen vorherrschend. Mit der Lage des Quartiers variiert das Verkehrsmittelangebot so wie zurückzulegende Strecken. Beispielsweise gilt für ein Ein- und Zweifamilienhausquartier, dass je ländlicher es liegt, desto wahrscheinlicher die Nutzung des eigenen PKW ist und desto geringer die Wahrscheinlichkeit ist, dass Wege zu Fuß zurückgelegt werden (vgl. Anhang 2.3).

4.3 Szenarien Mobilitätsveränderung

Für das Pflanzen von Stadtbäumen ist der freiwerdende Platz bedingt durch eine Mobilitätsverhaltensänderung von zentraler Bedeutung. Ziel einer nachhaltigen Stadtentwicklung ist es unter anderem den Anteil des MIV in dem Modal Split des Quartiers zu reduzieren. Die Bereitschaft das eigene Mobilitätsverhalten zu ändern, wird, wie in Kapitel 0 beschrieben, durch verschiedene Faktoren beeinflusst, darunter die geografische Lage des Quartiers, die soziale Struktur innerhalb des Quartiers sowie aktiv oder passiv umgesetzte Maßnahmen. Nach den Analysen von Drees & Sommer lassen sich drei mögliche Szenarien zur Reduktion des MIV in einem Quartier definieren, welche im Folgenden näher betrachtet werden. Die Art der ergriffenen Maßnahmen zur Erreichung der Reduktion variiert je nach Quartierstyp und dem tatsächlichen Modal Split, jedoch ist der Prozess der schrittweisen Reduktion des MIV für alle Quartierstypen gleich. Die nachstehenden Mobilitätsszenarien mit den jeweiligen Reduktionsmaßnahmen wurden von Drees & Sommer im Rahmen des Projekts CGSC aufgestellt und bilden die Grundlage für die Baumpflanzungsszenarien in Kapitel 5.3 (vgl. Menges et al. 2024b).

Mobilitätsszenario 1

In diesem Szenario werden keine Maßnahmen aktiv umgesetzt. Die Änderung des Mobilitätsverhaltens und dabei des Modal Splits ist ausschließlich durch eine Bewusstseinsänderung der Bewohner hervorzurufen, welche durch aktuelle Trends oder einen gesellschaftlichen Wandel bedingt wird. In diesem Szenario kann eine Reduktion des MIV-Anteils um bis zu 3 % erwartet werden.

Mobilitätsszenario 2

Das zweite Szenario sieht die aktive Umsetzung von Maßnahmen vor. Diese wirken dabei auf kurze Sicht und sind mit einem geringen Planungsaufwand verbunden, weshalb dieses Szenario auch als „Quick Win“ betitelt wird. Beispiele für solche Maßnahmen könnten die Bereitstellung von E-Scootern oder der Bau von Fahrradabstellanlagen an Haltestellen des ÖPNV sein. In diesem Szenario wird eine Verringerung des MIV-Anteils um 10 % angestrebt.

Mobilitätsszenario 3

Auch in diesem Szenario werden aktiv Maßnahmen ergriffen. Im Vergleich zu Szenario 2 handelt es sich in Szenario 3 um langfristige, umfassende Maßnahmen zur signifikanten Stärkung des öffentlichen Mobilitätsangebots. Dies erfordert einen längeren Planungshorizont und höhere Investitionskosten, bietet jedoch den größten Einfluss auf den Modal Split. Zu den potenziellen Maßnahmen in diesem Szenario gehören beispielsweise die engere Taktung des ÖPNV, ein quartiersübergreifendes Mobilitätsmanagement oder eine städtebauliche Neugestaltung des Verkehrsraums, die den ÖPNV, den Rad- und den Fußverkehr priorisiert. Mit Realisierung dieses Szenarios kann eine Reduktion des MIV-Anteils von bis zu 20 % erzielt werden.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, stellt insbesondere der Parkraum die Potentialfläche für zusätzliches Grün im urbanen Raum dar. Aus diesem Grund haben die Szenarien der MIV-Reduktion eine direkte Auswirkung auf die Größe der freiwerdenden Fläche und damit auf die Anzahl der neuen Bäume. Die Baumpflanzungsszenarien für die Fallstudiengebiete in Grombühl und Grafenbühl werden in Kapitel 5.3 detailliert vorgestellt.

5 Fallstudien

Die Stadt Würzburg und die Stadt Asperg sind Praxispartner des Projekts CGSC. In dem Stadtteil Grombühl (Stadt Würzburg) bzw. in dem Stadtteil Grafenbühl (Stadt Asperg) werden die Simulationen durchgeführt. Für die Simulation werden verschiedene Szenarien (vgl. Kapitel 5.3) aufgestellt, welche mit Hilfe von SimStadt modelliert und ausgewertet werden. Im Folgenden werden die Quartiere analysiert und die Wahl der Szenarien vorgestellt.

5.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage der Fallstudiengebiete weist erhebliche Unterschiede in der Qualität und der Verfügbarkeit der Daten auf:

Für den Stadtteil Grombühl wurden die Gebäude-, Flächen- und Gründaten von der Stadt Würzburg zur Verfügung gestellt. Diese umfassen bereits vorhandene Daten aus dem Baum-, Straßen- und Gebäudekataster der Stadt, sowie den ALKIS-Daten des Bundes. Ergänzend wurden bei einer stadtinternen Ortsbegehung die versiegelten, bebauten und grünen Flächen, sowie Baumstandorte im privaten und öffentlichen Bereich erfasst und anschließend visualisiert. Somit bauen die Simulationen auf einer umfassenden und detaillierten Datengrundlage auf.

Im Gegensatz dazu liegen für Grafenbühl weniger detaillierte Daten vor. Die wenigen zur Verfügung stehenden Daten, wurden durch die Auswertung von OSM-Daten (OSM) und Luftbildern eigenständig ergänzt. Zur Bestimmung der Straßenflächen wurden die Straßenlängen der Basis-DLM Daten genutzt und die Breiten mit GoogleEarth vermessen. Somit kann es bei dieser Fallstudie zu größeren Abweichungen kommen.

Für die Analyse des Status Quos und der darauf aufbauenden Szenariensimulation wurde ein Standardbaum festgelegt. Nach der Straßenbaumliste der *Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz* (GALK e.V.) wurde der *Acer Platanoides* (Spitzahorn) ausgewählt (vgl. GALK e.V.). Diese Baumart überzeugt durch seine Hitze- und Trockenverträglichkeit und die Eignung für auch enge Straßenräume. Für den Standardbaum wurde eine Baumhöhe von 12,0 m, eine Kronenbreite von 8,0 m und eine Stammdicke von 0,9 m angesetzt. Das Verhältnis von Baumhöhe zu Kronenbreite von 3:2 beruht auf den Durchschnittsdaten des *Acer Platanoides* gemäß der Straßenbaumliste (vgl. GALK e.V.).

Während in Grafenbühl nur wenige Bestandsbäume digital erfasst waren und somit auf die Merkmale des Standardbaums zurückgegriffen wurde, wurden für Grombühl relativ genaue Baumdaten über das Baumkataster bereitgestellt. Über die digital erfasste Verschattungsfläche des Baums bei 90 Grad Sonneneinstrahlung wurde der Durchmesser, also die Kronenbreite, bestimmt und in das Verhältnis zur Baumhöhe gesetzt. Über die Baumhöhe wurde im Verhältnis 1:0,075 die Stammdicke berechnet.

5.2 Analyse der Quartiere

Jeweils ein Stadtquartier der Stadt Würzburg und der Stadt Asperg dient als Fallstudienggebiet für das Projekt CGSC. In Würzburg handelt es sich dabei um den Stadtteil *Grombühl* und in Asperg um den Stadtteil *Grafenbühl*. In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse der Stadtquartiere mit Fokus auf den vorzufindenden Quartiersarchetypen mit den jeweiligen Straßenquerschnitten, den stadtklimatischen Bedingungen und des aktuellen Heiz- und Kühlbedarfs unter Berücksichtigung der im Status Quo vorhandenen Stadtbäume.

5.2.1 Analyse Grombühl

Der Stadtteil Grombühl liegt im Norden Würzburgs in urbaner Lage (vgl. Abbildung 8). Das Untersuchungsgebiet mit einer Fläche von etwa 40 Hektar liegt im Süden im stärker verdichteten Teils Grombühls, welcher als Altort bezeichnet wird. Dieser wird von der Lindleinstraße im Norden, der Rimpärer Straße im Westen, der Auvera- und Grombühlstraße im Westen und der Josef-Schneider-Straße im Osten begrenzt.

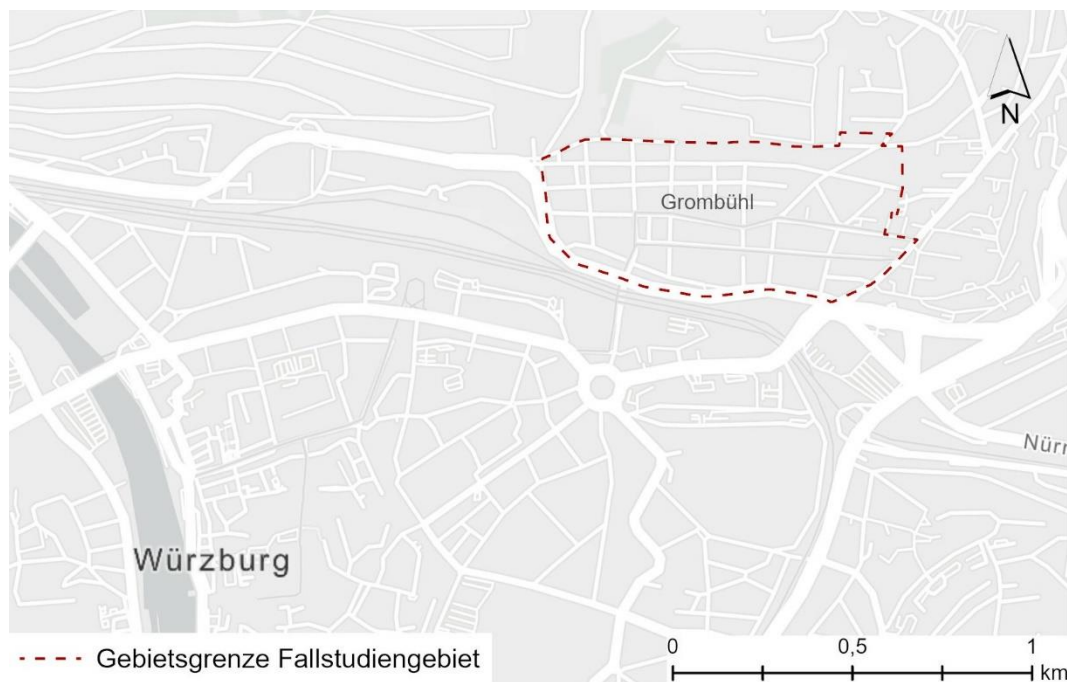


Abbildung 8: Lage des Fallstudienggebiets Grombühl (eigene Darstellung)

Das Baujahr der Gebäude im Altort des Stadtteils liegt zum Großteil zwischen 1930 und 1945 und die Gebäude dienen hauptsächlich dem Wohnen (vgl. Reicher Haase Assoziierte GmbH 2022, S. 23). Für die Analysen im Projekt CGSC sind 439 Gebäude in die Berechnung eingeflossen.

In Grombühl sind vier Quartiersarchetypen vorzufinden (vgl. Abbildung 9). Die Blockrandbebauung im Süden und Westen, das neue Innenstadtquartier in der Mitte, eine Zeilen- und Reihenbebauung im Osten und ein Ein- und Zweifamilienquartier im Norden, an welches sich östlich und westlich jeweils eine Kleingartenkolonie anschließt. Der Großteil des Ein- und Zweifamilienhausquartiers, sowie die Kleingartenkolonien werden in der folgenden Betrachtung nicht weiter berücksichtigt, da diese bereits einen hohen Grünanteil aufweisen und eine Erhöhung des Baumbestands zu keiner

signifikanten Änderung in der Heiz- und Kühllast führen würde. Im Osten des Stadtteils Grombühl befindet sich ein Teil des Uniklinikums. Dieses wurde aus der Betrachtung herausgenommen, da der Fokus der Simulation auf Wohngebäuden liegt. In folgender Karte in Abbildung 9 sind die im Fallstudiengebiet vorzufindenden Quartiersarchetypen visuell dargestellt.

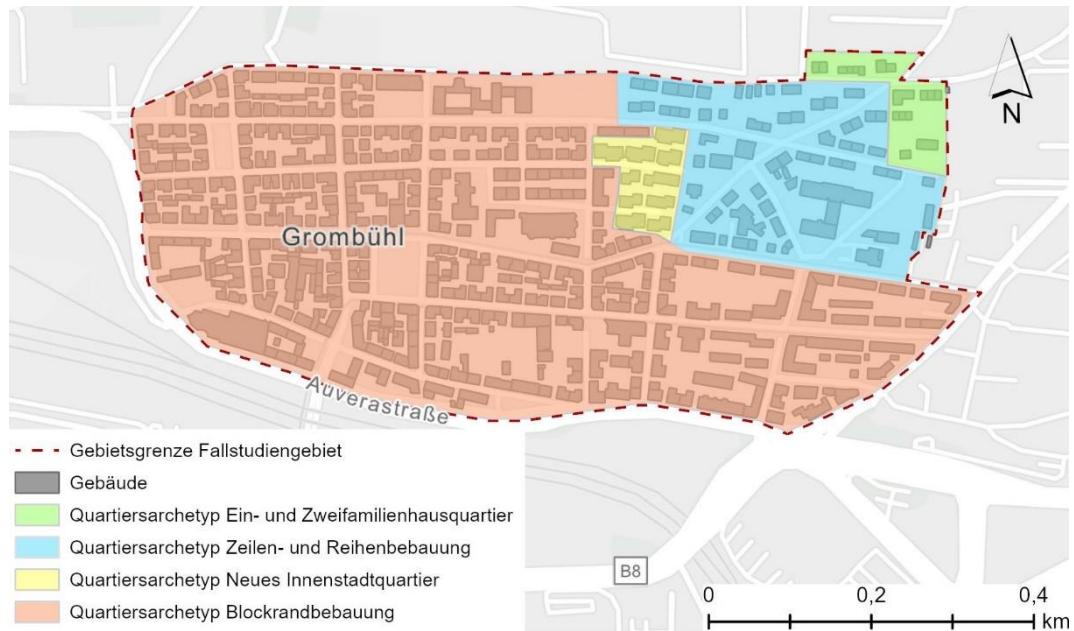


Abbildung 9: Quartiersarchetypen im Untersuchungsgebiet Grombühl (eigene Darstellung, Datengrundlage: Drees & Sommer)

Die Flächenbilanz Grombühls (vgl. Anhang 3) ist charakteristisch für ein stadtnahes Quartier: Fast die Hälfte des Quartiers ist versiegelt. Der Straßenraum macht mit etwa 9 Hektar knapp die Hälfte der versiegelten und fast ein Viertel der gesamten Fläche des Quartiers aus. Die bebaute Fläche entspricht mit 14 Hektar etwas mehr als einem Drittel der Gesamtfläche. Auf die Grün- und Freiflächen entfallen 16 %. Im Status Quo sind in Grombühl 788 Bäume mit unterschiedlicher Kronenbreite sowie Baumhöhe vorhanden. Durch die Evapotranspiration entziehen die Bäume der Umgebung im Jahresmittel pro Monat eine Energiemenge von 905 MWh. Die Globalstrahlung auf das Fallstudiengebiet beträgt im Jahr etwa 1.200 kWh/m².

Wie viele Städte, weist auch der Stadtteil Grombühl ein Risiko zur Überhitzung auf. In dem folgenden Kartenausschnitt in Abbildung 10 sind die Flächen mit zu erwartender moderater und starker Überwärmung bzw. erhöhtem und hohem Überwärmungsrisiko dargestellt.

In verdichteten Gebieten, deren Freiräume größtenteils vegetationsfrei sind und die Frischluftzufuhr reduziert ist, wird eine moderate Überwärmung erwartet (gelbe Färbung). Eine starke Überwärmung entsteht in Gebieten mit höherer Bebauungsdichte, gänzlich fehlender Vegetation und stark eingeschränkter Frischluftzufuhr. Besonders betroffen sind die Blöcke in der Mitte des Quartiers, in der in vgl. Abbildung 10 dargestellten Karte durch eine rote Einfärbung verdeutlicht. In den Randbereichen ist ein Überwärmungspotential gegeben, da es sich zwar immer noch um dicht bebautes Gebiet handelt, aber die Kaltluftzufuhr aus den umliegenden Freiflächen höher ist (beige Färbung).



Abbildung 10: Überhitzungspotentiale in Grombühl (Burghardt und Partner Ingenieure 2018, S. 1)

In Abbildung 11 ist die Summe des monatlichen Kühl- und Heizbedarfs der 439 Wohngebäude in Grombühl dargestellt. Die Säulen für den Energiebedarf ohne Bäume bedeutet, dass in dieser Simulation nur die Verschattung der Gebäude untereinander berücksichtigt wurde. Der Energiebedarf des Status Quo bilden den aktuellen Ist-Zustand ab. Es wird sowohl die Verschattung der Gebäude untereinander als auch die Auswirkung der Baumschatten der 788 Bestandsbäume auf den Heiz- und Kühlbedarf berücksichtigt. Über das ganze Jahr gesehen, steigt der Heizbedarf bei der Berücksichtigung der Bäume um etwa 960 MWh an. Der Kühlbedarf reduziert sich um 10 % auf etwa 800 MWh, wenn in der Simulation die Wirkung der Bestandsbäume berücksichtigt wird.

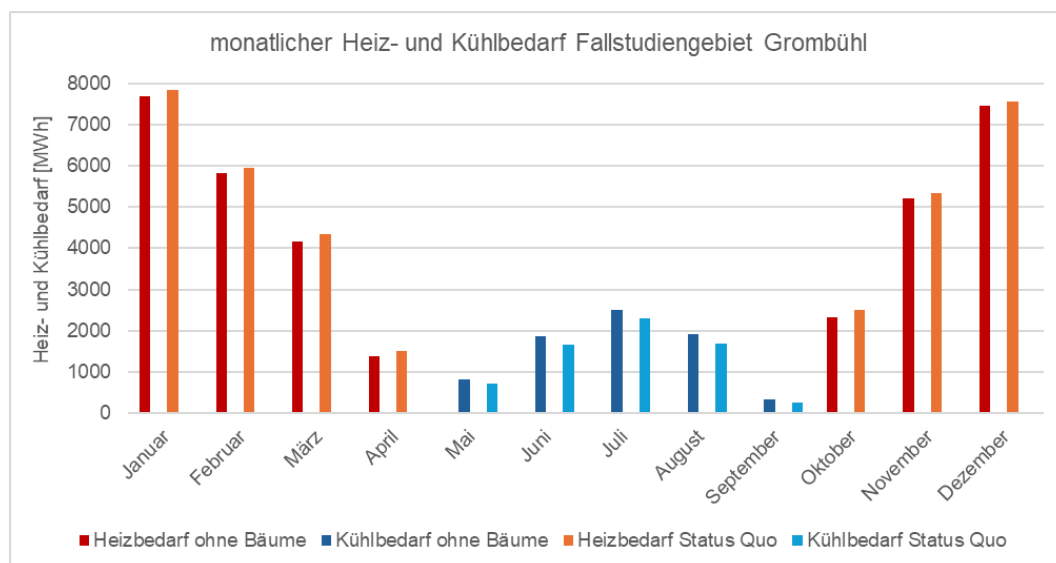


Abbildung 11: Monatlicher Heiz- und Kühlbedarf im Fallstudiengebiet Grombühl mit und ohne des Verschattungseffekts durch Bäume (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Die Zunahme im Heizbedarf bzw. die Abnahme im Kühlbedarf wird durch die Diagramme in Abbildung 12 nochmals verdeutlicht. Unter Berücksichtigung des Baumbestands weisen 25 Gebäude mehr im Vergleich zu der Simulation ohne Bäume einen spezifischen Heizbedarf zwischen 100 und 200 kWh/(m²*a) auf. Der positive Effekt der Bäume auf den Kühlbedarf zeigt sich in der Verringerung des spezifischen Kühlbedarfs. Während in der Simulation ohne Bäume etwa 180 Gebäude einen spezifischen Kühlbedarf von 20 bis 30 kWh/(m²*a) aufweisen, reduziert sich die Anzahl um 50 Häuser, wenn die Bäume in der Simulation berücksichtigt werden.

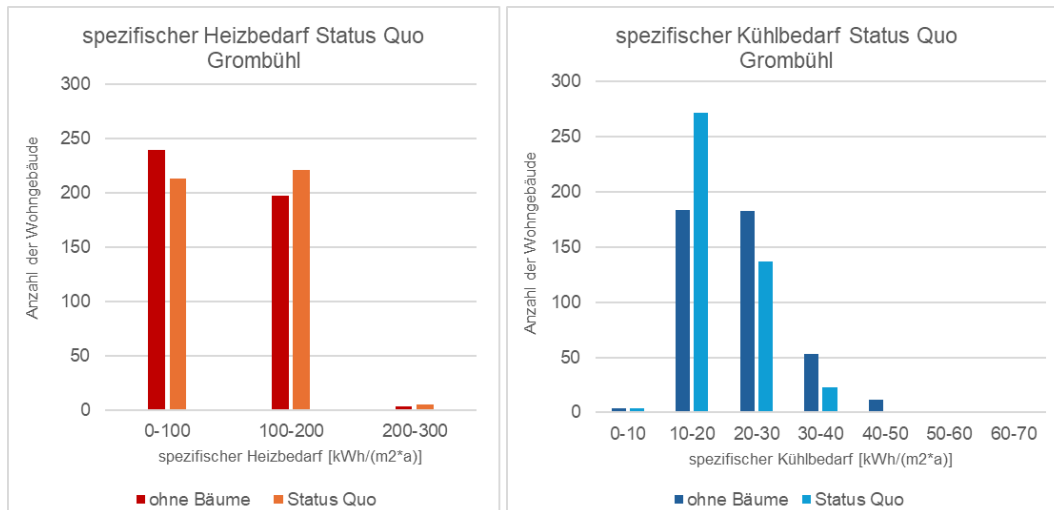


Abbildung 12: Spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Fallstudiengebiet Grombühl mit und ohne Berücksichtigung des Verschattungseffekts durch Bäume (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Die Simulation zeigt, dass sich durch den existierenden Baumbestand der Anteil an Gebäuden mit niedrigeren Kühlbedarfen gegenüber einem Zustand ohne Baumbestand erhöht. Allerdings führt das Fehlen des Baumbestandes zu einem höheren Anteil an Gebäuden mit niedrigerem spezifischem Heizbedarf. Diese Veränderung wirkt sich auf die CO₂e-Emissionen des Heiz- und Kühlbedarfs aus. Im Status Quo erhöhen sich die Emissionen des Heizbedarfs um 3 % auf knapp 7.000 t CO₂e, die des Kühlbedarfs sinken hingegen um 10,7 % auf 736 t CO₂e.

5.2.2 Analyse Grafenbühl

Grafenbühl ist ein Stadtteil im Osten der Stadt Asperg. Er wird begrenzt durch die S-Bahn-Gleise im Westen, der Autobahn A 81 im Osten, landwirtschaftliche Felder im Norden und der Eglosheimer Straße im Süden. Das Fallstudiengebiet befindet sich in peripherer Lage und weist eine Größe von 23 Hektar auf.



Abbildung 13: Lage des Fallstudiengebiets Grafenbühl (eigene Darstellung)

In Grafenbühl sind zwei Quartiersarchetypen vertreten: Im Norden und Süden des Fallstudiengebiets befinden sich je ein Ein- und Zweifamilienhausquartier, während im Osten und Westen jeweils ein kleines Gebiet an Zeilen- und Reihenbebauung vorzufinden ist.



Abbildung 14: Quartiersarchetypen im Untersuchungsgebiet Grafenbühl (eigene Darstellung, Datengrundlage Drees & Sommer)

Im Vergleich zu Grombühl ist das Quartier weniger dicht bebaut. Auf einer Fläche von 23 Hektar befinden sich 376 Wohngebäude. Zudem weist Grafenbühl im Status Quo ein größeres Grünvolumen an Straßenbäumen und grünen Freiflächen auf, bei welchen es sich vor allem um private Gärten handelt. Im Bestand weist das Fallstudiengebiet 404 Bäume im privaten und öffentlichen Raum auf. Die Evapotranspiration der Bestandsbäume beträgt im Jahresmittel 560 MWh pro Monat.

Die Straßen machen mit einer Gesamtfläche von 2,8 Hektar etwa 12 % der Quartiersfläche aus. Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, lagen wenige genaue Daten für das Fallstudiengebiet vor, weshalb eine Aufstellung einer genauen Flächenbilanz auf Grund von Datenlücken nicht möglich ist.

Die Globalstrahlung auf Grafenbühl beträgt, wie in Grombühl, 1.200 kWh/m² pro Jahr. Aus der im Jahr 2022 durchgeführten Analyse des städtischen Klimas in Asperg geht hervor, dass trotz einer geringen Bebauungsdichte Grafenbühl eine hohe thermische Belastung aufweist. Die in Abbildung 15 dargestellte Karte zeigt auf, dass nur in Teilen der Eisenbahnstraße mit einer sehr hohen thermischen Belastung zu rechnen ist. Im Norden des Gebiets ist die thermische Belastung mittel bis gering, da diese Grundstücke an Wiesenflächen anschließen. In den Grad der thermischen Belastung fließen die nächtlichen urbanen Hitzeinseln und die Vielfalt der Vegetation ein (vgl. Hasel et al. 2022, S. 56).

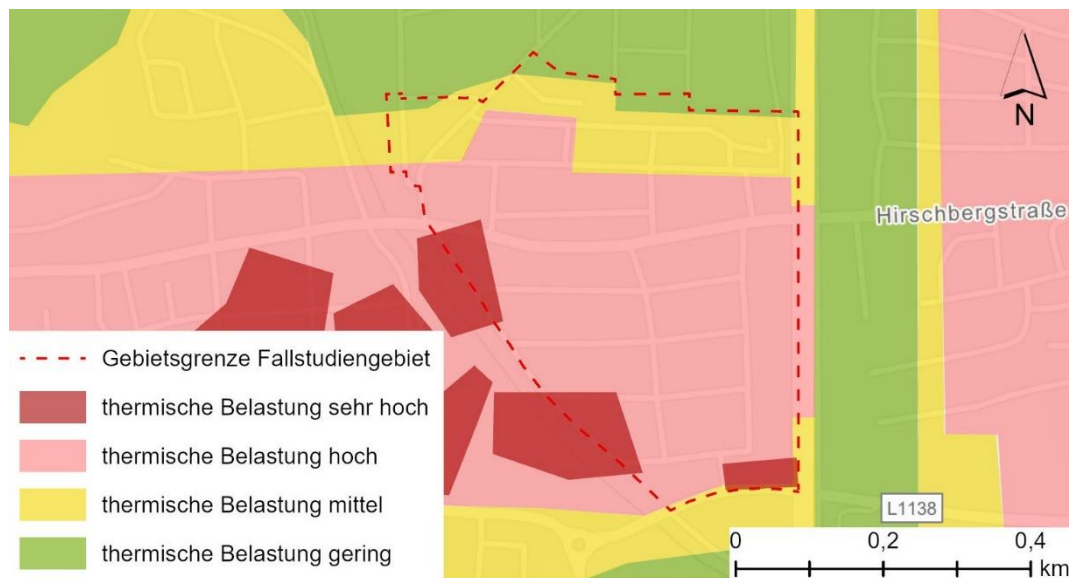


Abbildung 15: Thermische Belastung Grafenbühl (eigene Darstellung nach Hasel et al. 2022, S. 56)

In dem nachfolgenden Diagramm (vgl. Abbildung 16) ist der monatliche Heiz- und Kühlbedarf der Wohngebäude des Fallstudiengebiets dargestellt. Zum einen wurde nur der Effekt der Gebäudeverschattung auf den Gebäudeenergiebedarf betrachtet (ohne Baum) und zum anderen wurde zusätzlich der Verschattungseffekt der Bestandsbäume in der Simulation berücksichtigt (Status Quo). Pro Jahr führt die zunehmende Verschattung zu einer Erhöhung des Heizbedarfs um ca. 140 MWh und zu einer Reduktion des jährlichen Kühlbedarfs um 205 MWh.

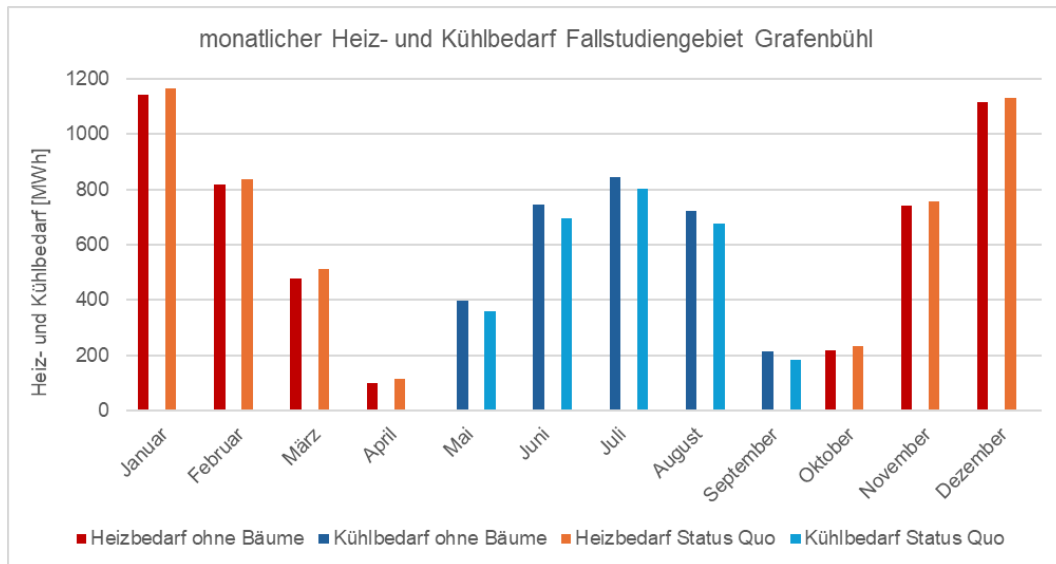


Abbildung 16: Monatlicher Heiz- und Kühlbedarf mit und ohne der Verschattungswirkung von Bäumen Status Quo Grafenbühl (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Die leichte Erhöhung des Heizbedarfs und die Reduktion des Kühlbedarfs wird in Abbildung 17 nochmals verdeutlicht. Mit einer Zunahme des Baumbestands nimmt die Anzahl der Häuser mit einem spezifischen Heizbedarf von 50-60 kWh/(m²*a) um 25 Gebäude zu. Für den Kühlbedarf nimmt die Anzahl der Gebäude mit einem spezifischen Kühlbedarf zwischen 20 und 30 kWh/(m²*a) um 155 Häuser zu.

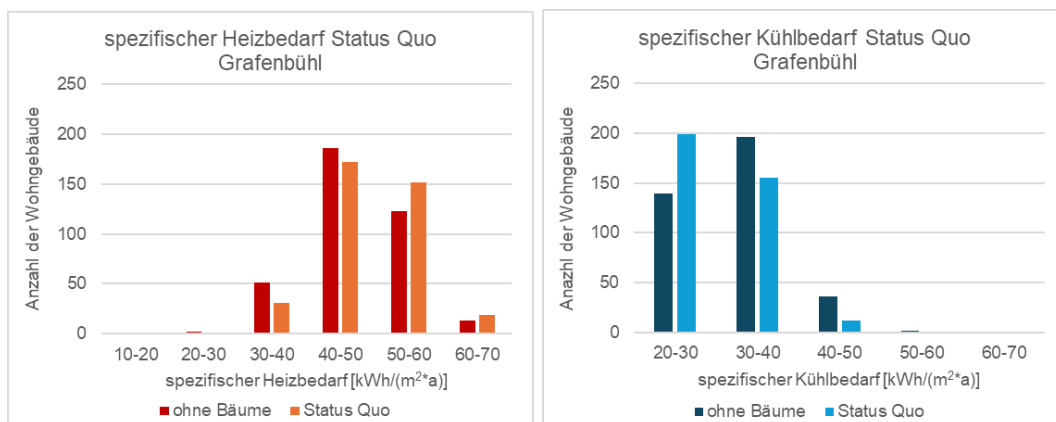


Abbildung 17: Spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Fallstudiengebiet Grombühl mit und ohne dem Verschattungseffekt durch Bäume (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Der Verschattungseffekt der Bäume hat somit auch einen Einfluss auf die wärmebedingten CO₂e-Emissionen. Ein erhöhter Heizbedarf führt zu einem Anstieg um 3,0 % auf 959 t CO₂e. Der reduzierte Kühlbedarf bedingt eine Reduktion der kühlseitigen Emissionen um 7,0 % auf 301 t CO₂e.

Die Fallstudiengebiete unterschieden sich stark. Während Grombühl eine typische gründerzeitliche, enge Bebauungsstruktur aufweist, ist Grafenbühl durch eine lockere Bebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern charakterisiert. Aus den städtebaulichen Unterschieden resultiert die stärkere thermische Belastung in Grombühl. Hinsichtlich des energetischen Zustands weisen die Gebäude in Grafenbühl im Durchschnitt einen deutlich geringeren spezifischen Heizbedarf auf. Der spezifische Kühlbedarf ist in Grombühl etwas geringer. Das Potential, welches der Verschattungseffekt auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf hat, wird in beiden Fallstudien ersichtlich.

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt die Erläuterung der Baumpflanzungsszenarien.

5.3 Aufstellung der Baumpflanzungsszenarien

Die Baumpflanzungsszenarien werden für den öffentlichen Raum aufgestellt. Eine Berücksichtigung von Potentialflächen in Innenhöfen findet im Rahmen dieser Arbeit nicht statt. Zum einen liegen hierfür keine genauen Daten vor, zum anderen können Gemeinden nicht ohne die Zustimmung und/ oder Entschädigung der Eigentümer im privaten Raum Bäume anpflanzen. Des Weiteren werden Stellplätze in den Innenhöfen auch für alternative Mobilitätsformen weiterhin benötigt oder werden nach Wunsch des Grundstücksbesitzers umgestaltet oder umgenutzt.

Als Potentialfläche für Baumpflanzungen wurde ausschließlich der Parkraum des öffentlichen Straßenraums betrachtet. Diese Flächen sind abhängig von der Mobilitätsveränderung verfügbar. Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, kann diese Potentialfläche über den Straßenquerschnitt je Quartiersarchetyp und dem ergriffenen Mobilitätsszenario errechnet werden. Eine Zuordnung der Straßenquerschnitte und der prozentuale Anteil der Potentialfläche an der Straßenbreite ist in Anhang 4 dargestellt.

Die *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V (FLL)* definiert ergänzend zu DIN 18916 Pflanzempfehlungen für Stadtbäume. In der *Empfehlung zur Baumpflanzung Teil 2* wird eine unversiegelte Fläche von mindestens 6 m² für Bäume im Straßenraum vorgesehen (vgl. Lösken et al. 2010, S. 16). Die Berechnungen der maximal möglichen Neupflanzungen von Bäumen auf der zuvor bestimmten Potentialfläche im Straßenraum baut auf dieser Richtlinie der FLL von 6 m² unversiegelte Fläche pro Baum auf. Über diese Flächenvorgabe wird die Anzahl der möglichen Neupflanzungen im gesamten Quartier je Mobilitätsszenario bestimmt.

$$\frac{\text{Potentialfläche je Mobilitätsszenario [m}^2\text{]}}{6 \text{ m}^2} = \text{Anzahl neuer Bäume}$$

Für die möglichen Pflanzabstände wurden im Stuttgarter Westen vergleichbare Straßen mit den in den Fallstudiengebieten untersucht (vgl. Abbildung 18). Bei der Ortsbegehung wurde deutlich, dass in Straßenzügen mit Altbestand die Pflanzabstände häufig deutlich geringer sind als in Straßenzügen mit Neupflanzungen. Während in der Ludwigstraße

(Quartiersarchetyp Blockrandbebauung) und der Hasenbergsteige (Quartiersarchetyp Ein- und Zweifamilienhausquartier) Pflanzabstände von etwa 5,0 m vorzufinden sind, lagen die Abstände in der Seyfferstraße (Quartiersarchetyp Blockrandbebauung) und im Olga-Areal (Quartiersarchetyp neues Innenstadtquartier) zwischen 10,0 m und 20,0 m. Nach Rücksprache mit den beteiligten Gemeinden wurden drei mögliche Pflanzabstände von 5,0 m, 10,0 m und 15,0 m festgelegt. Die unterschiedlichen Pflanzabstände ermöglichen die durch die Potentialfläche und das gewählte Mobilitätsszenario vorgegebene Anzahl an neuen Bäumen auf unterschiedliche Weise in dem Quartier zu verteilen und gegebenenfalls auf spezifische Anforderungen oder Ziele zu reagieren.



Abbildung 18: Vergleichsbild Baumbepflanzung im Straßenraum (von links nach rechts: Seyfferstraße, Hasenbergstraße, Ludwigstraße, Hasenbergsteige) (eigene Fotos)

Die Neupflanzung der Bäume wird sich vorzugsweise auf thermisch belastete Gebiete konzentrieren. Je geringer die Anzahl der Bäume und der Pflanzabstand, desto kleiner ist der gewählte Gebietsausschnitt. Mit einer Zunahme der Anzahl neu gepflanzter Bäume nimmt auch der Platzbedarf zu. Somit werden die Straßenzüge für die Neupflanzung mit jedem Mobilitätsszenario sukzessive erweitert, da mit einer zunehmenden Verringerung des MIV eine größere Potentialfläche zur Bepflanzung zur Verfügung steht. Wie bereits erwähnt erfolgt das Pflanzen automatisch mittels eines Python-Skripts (vgl. Kapitel 3.2.1).

Die Simulation des thermischen Energiebedarfs und der Evapotranspiration erfolgt auf den für die Baumpflanzungsszenarien gewählten Gebietsausschnitten und werden mit SimStadt (vgl. Kapitel 3.2.2) durchgeführt. Die Erläuterung der Baumpflanzungsszenarien in den Fallstudiengebieten Grombühl und Grafenbühl folgt in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2.

5.3.1 Baumpflanzungsszenarien Grombühl

Die Baumpflanzungsszenarien für das Fallstudiengebiet Grombühl beruhen auf den in den vorangegangenen Kapiteln definierten Annahmen und Ansätzen, da die in den Quartiersarchetypen hinterlegten Straßenquerschnitte mit einer tolerierbaren Abweichung auf das Gebiet angewendet werden können.

Bei der Berechnung der gesamten Straßenfläche je Quartiersarchetyp wurden die Straßen mit Straßenbahnverkehr ausgenommen, da hier die Pflanzung neuer Bäume auf Grund der Oberleitung schwieriger umzusetzen ist als in Straßenzügen ohne Straßenbahnverkehr. Nach dem in den Kapiteln 3.1 und 5.3 erläuterten Vorgehen,

können in Grombühl je nach Mobilitätsszenario 75 (3 % MIV-Reduktion), 250 (10 % MIV-Reduktion) bzw. 500 (20 % MIV-Reduktion) neue Bäume gepflanzt werden.

Wie aus der Analyse des Fallstudiengebiets in Kapitel 5.2.1 bereits hervorgeht, sind einige Blöcke von einem erhöhten Überhitzungsrisiko betroffen. Deshalb wird bei der Aufstellung der Pflanzszenarien in diesen Gebieten begonnen und mit zunehmender Anzahl an zusätzlichen Bäumen die Anzahl der Straßenzüge erweitert.

Je nach angewandtem Mobilitätsszenario, welches die Anzahl der zusätzlichen Bäume definiert, und dem Pflanzabstand der Bäume (5,0 m, 10,0 m bzw. 15,0 m Pflanzabstand) würden sich neun mögliche Baumpflanzungsszenarien ergeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf fünf Szenarien, aufgeteilt auf drei Gebietsausschnitte, gelegt. Durch diese Fokussierung lassen sich die Szenarien je Gebietsausschnitt optimal untereinander vergleichen. Zudem würden sich 75 Bäume bei einem geringeren Pflanzabstand auf eine zu geringe Fläche konzentrieren. In nachfolgender Tabelle sind die Anzahl und der Abstand der Bäume je Baumpflanzungsszenarien A bis E dargestellt:

Tabelle 1: Baumpflanzungsszenarien in Grombühl (eigene Berechnungen)

Gebiets-ausschnitt	Fläche des Gebiets-ausschnitts	Baum-pflanzungs-szenario	Anzahl Bestands-bäume	Anzahl der neuen Bäume	Pflanz-abstand
I	2,3 ha	Szenario A	7	75	15 m
		Szenario B		250	5 m
II	8,5 ha	Szenario C	88	250	15 m
		Szenario D		500	10 m
III	39,8 ha	Szenario E	788	500	15 m

Der Gebietsausschnitt I für Szenario A und B wird durch die Ernst-Reuter-Straße, Steinheilstraße, Matterstockstraße und den Josefplatz begrenzt. Dabei wird der östliche Teil der Matterstockstraße, in welchem die Straßenbahn verkehrt, ausgenommen. Für die Szenarien C und D wird der Gebietsausschnitt bis an die Rimpärer Straße, Schiestelstraße und Gabelsbergstraße ausgedehnt. Zudem wird der Block nordöstlich des Gebietsausschnitts I mit betrachtet, da dieser auch ein hohes Überwärmungspotential aufweist. Szenario E erstreckt sich über das gesamte Fallstudiengebiet. In Abbildung 19 sind die Gebietsausschnitte der Baumpflanzungsszenarien dargestellt.

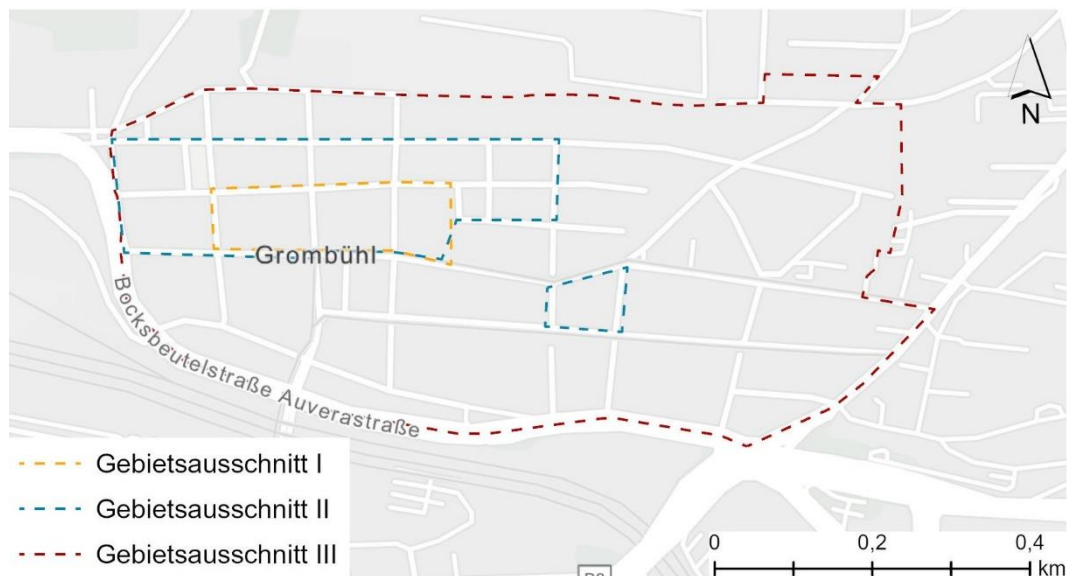


Abbildung 19: Gebietsausschnitte Grombühl für die Baumpflanzungsszenarien (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Kapitel 6 zusammengefasst. Anschließend erfolgt die Interpretation in Kapitel 7.

5.3.2 Baumpflanzungsszenarien Grafenbühl

Das definierte modellhafte Vorgehen lässt sich auf das Fallstudiengebiet in Grafenbühl nicht anwenden. Zum einen führt eine geringe Datenverfügbarkeit zu einer geringen Datenqualität, zum anderen lassen sich die in den Quartiersarchetypen hinterlegten Straßenquerschnitte nicht auf die bestehende Situation übertragen. Der Straßenquerschnitt *Wohnstraße*, welcher dem Quartiersarchetyp Ein- und Zweifamilienhausquartier zugeordnet ist, sieht eine Straßenbreite von 12,25 m, sowie einen beidseitigen Gehweg vor. Die Mehrheit der Straßen in Grafenbühl ist deutlich schmaler als die vorgegebene Breite und in den Straßen, in welchen ein Gehweg vorhanden ist, ist dieser meist nur einseitig. Deshalb wurde für die Aufstellung der Baumpflanzungsszenarien in Grafenbühl verschiedene Annahmen getroffen und die Datenerhebung erfolgte größtenteils manuell. Die Straßenlängen sind in den Basis-DLM Daten enthalten und beruhen somit auf exakten Werten. Die Breite der Straßen wurde händisch über GoogleEarth bestimmt. Abgesehen von der Eisenbahnstraße verfügt das Quartier über keine gekennzeichneten Parkflächen, weshalb der Straßenrand zum Parken innerhalb des Quartiers genutzt wird. Zur Bestimmung der Potentialfläche zur Pflanzung neuer Bäume wird aber die Parkfläche benötigt. Infolgedessen wurde angenommen, dass an den Straßenseiten in der Gesamtlänge der Straße die

Möglichkeit zum Parken besteht. Da das Python-Skript Bäume automatisch an beide Straßenseiten pflanzt, wurde angenommen das in Grafenbühl an beiden Straßenseiten geparkt werden kann. Um Einfahrten auf die Grundstücke freizuhalten, wurde für jedes Gebäude eine Einfahrtsbreite von 4,0 m, welcher von der Gesamtlänge der Straße abgezogen wurde, festgelegt. Parken in einem Abstand von unter 5,0 m zu Kreuzungen ist nicht erlaubt, weshalb auch dieser Abstand von der Gesamtlänge abgezogen wurde. Sehr enge Straßen, wie beispielsweise die Lichtenbergstraße in Nord-Süd-Ausrichtung, werden bei der Bepflanzung ausgenommen, da zusätzliche Bäume die Straße für den alltäglichen Verkehr zu stark verschmälern würde. Soll in engen Straßen dennoch eine Bepflanzung stattfinden, muss über eine Ausweisung zur Fahrradstraße oder Fußgängerzone nachgedacht werden. Unter Berücksichtigung dieser Annahmen ist es möglich nach den drei Mobilitätsszenarien 20 neue Bäume bei einer MIV-Reduktion von 3 %, 67 neue Bäume bei einer MIV-Reduktion um 10 % bzw. 135 neue Bäume bei einer MIV-Reduktion um 20 % in dem Gebiet zu pflanzen.

Für die Pflanzung der neuen Bäume wurde die Hirschbergstraße ausgenommen, da es sich bei dieser Straße um die Hauptverkehrsstraße durch das Quartier handelt und in dieser der Linienbus verkehrt. Somit besteht in dieser Straße auch weiterhin ein großer Platzbedarf. Des Weiteren wurde festgelegt, dass nur Straßenzüge, welche in ihrem Straßenquerschnitt einen Gehweg oder ausgewiesene Parkflächen aufweisen, sich für die Baumpflanzungsszenarien eignen.

Das Fallstudiengebiet weist bereits eine große Anzahl an Bäumen auf. Zudem sind die Innenhöfe zum größten Teil Grünflächen meist mit Baumbepflanzung. Da der Effekt von 20 neuen Bäumen auf den Energiebedarf der Gebäude und der Energiebilanz des städtischen Raums gering ausfallen würde, wurde für das Mobilitätsszenario 1 kein Baumpflanzungsszenario aufgestellt. Für Grafenbühl werden die in Tabelle 2 aufgelisteten Baumpflanzungsszenarien im Folgenden weiter untersucht:

Tabelle 2: Baumpflanzungsszenarien in Grafenbühl (eigene Berechnungen)

Gebiets-ausschnitt	Fläche des Gebiets-ausschnitts	Baum-pflanzungs-szenario	Anzahl Bestands-bäume	Anzahl der neuen Bäume	Pflanz-abstand
IV	3,0 ha	Szenario F	40	67	10 m
		Szenario G		135	5 m
V	20,7 ha	Szenario H	404	135	15 m

Der Gebietsausschnitt IV für die Szenarien F und G befindet sich im Norden des Fallstudiengebiets. Das Pflanzen findet in der Lichtenbergstraße und der Wunnensteinstraße statt. Diese Straßenzüge wurden ausgewählt, da auch in diesem Fallstudiengebiet ein kleinerer Ausschnitt untersucht werden sollte. Die Breite des Straßenquerschnitts der beiden Straßenzüge von etwa 8,0 m und das Vorhandensein von einem einseitigen Gehweg eignet sich zur Durchführung der Simulation. Szenario H erstreckt sich auf das gesamte Fallstudiengebiet. Die Karte in Abbildung 20 verortet die beschriebenen Gebietsausschnitte in Grafenbühl.



Abbildung 20: Gebietsausschnitte Grafenbühl für die Baumpflanzungsszenarien (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Kapitel 6 vorgestellt. Anschließend erfolgt die Interpretation in Kapitel 7.

6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation, untergliedert in drei Themenbereiche, detailliert beschrieben. Zunächst wird die Zunahme des Grünanteils je Gebietsausschnitt vorgestellt (vgl. Kapitel 6.1). Im nächsten Schritt werden die Auswirkungen dieses erhöhten Grünanteils auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf sowie die damit verbundenen CO₂e-Emissionen dargestellt (vgl. Kapitel 6.2). Das letzte Kapitel widmet sich der Evapotranspiration (vgl. Kapitel 6.3). In diesem Kapitel wird zudem der durch die Evapotranspiration bedingte Energieentzug sowie die zu erwartende Temperaturänderung berücksichtigt.

Grundlage für die, in dem Ergebnisteil vorgestellten, Diagramme sind die Output-Daten aus dem Tool SimStadt für die verschiedenen durchgeführten Simulationen. Es wurde davon abgesehen für jedes Szenario alle Ergebnisse visuell in diesem Kapitel darzustellen, da sich der Verlauf der Diagramme zwischen den verschiedenen Gebietsausschnitten und Szenarien abgesehen von unterschiedlichen Zahlenwerten kaum unterscheidet. Die Diagramme der übrigen Gebietsausschnitte sind in Anhang 5 bis 8 abgebildet.

6.1 Zunahme des Grünanteils

Auf Basis der in Kapitel 5.3 erläuterten Baumpflanzungsszenarien hat sich in jedem Gebietsausschnitt der Grünanteil mit jedem Szenario erhöht. Eine zusammenfassende Übersicht der Anzahl neuer Bäume je Gebietsausschnitt und Szenario ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht aller Baumpflanzungsszenarien (eigene Berechnungen)

	Gebiets-ausschnitt	Baumpflanzungs-szenario	Anzahl Bestands-bäume	Anzahl der neuen Bäume
Grombühl	I	Szenario A	7	75
		Szenario B		250
	II	Szenario C	88	250
		Szenario D		500
	III	Szenario E	788	500
Grafen-bühl	IV	Szenario F	40	67
		Szenario G		135
	V	Szenario H	404	135

Bei der Betrachtung des gesamten Fallstudiengebiets Grombühl (Gebietsausschnitt III) und Grafenbühl (Gebietsausschnitt V) können in Grombühl 12 neue Bäume pro Hektar Gebietsfläche gepflanzt werden. In Grafenbühl liegt die Anzahl neuer Bäume pro Hektar Gebietsfläche bei 6 Bäumen.

Zur visuellen Verdeutlichung ist in Abbildung 21 die Zunahme des Baumbestands im 3D-Modell für den Gebietsausschnitt II dargestellt. Die visuelle Darstellung des steigenden Grünanteils in den übrigen Gebietsausschnitten befindet sich in Anhang 5.

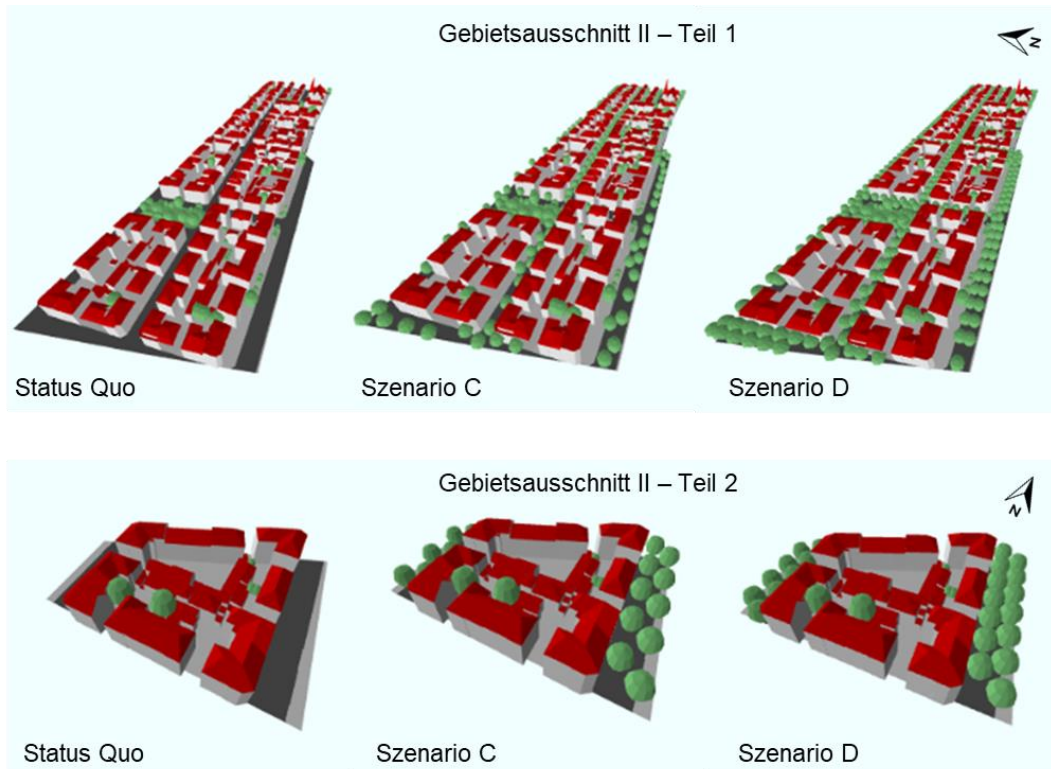


Abbildung 21: Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt II (Datengrundlage CGSC und eigene Berechnungen)

6.2 Auswirkungen auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf

Die Kurven des Heiz- und Kühlbedarfs verlaufen in jedem Szenario ähnlich. Der Höchstwert des Heizbedarfs ist im Januar zu beobachten, während der Höchstwert des Kühlbedarfs im Juli liegt. Ein Unterschied zwischen dem monatlichen thermischen Gebäudeenergiebedarf des Status Quos des Gebietsausschnittes und dem in diesen simulierten Szenarien ist gering. Dennoch ist jährlich betrachtet stets mit einer kleinen Erhöhung des Heizbedarfs und einer Reduktion des Kühlbedarfs zu rechnen. Die Betrachtung des Energiebedarfs je Quadratmeter Nutzfläche verdeutlicht diese Auswirkungen. Mit einem zunehmenden Grünanteil nimmt die Anzahl der Gebäude mit einem höheren spezifischen Heizbedarf zu, während sich der spezifische Kühlbedarf reduziert. Dieser Effekt spiegelt sich auch in den CO₂e-Emissionen des Heiz- und Kühlbedarfs wider.

Der Heiz- und Kühlbedarf eines Jahres der 37 Wohngebäude in Gebietsausschnitt I weist trotz einer Erhöhung des Baumbestands eine sehr geringe Veränderung auf. In dem in Abbildung 22 dargestellten Diagramm ist der Heiz- und Kühlbedarf in MWh je

Monat für den Status Quo, sowohl mit als auch ohne der Verschattungswirkung der Bäume, sowie die Gebäudeenergiebedarfe der Szenarien A und B visualisiert.

Der Höchstwert des Heizbedarfs liegt für beide Szenarien im Januar bei knapp unter 600 MWh. Der höchste Kühlbedarf wird im Juli erreicht. Dieser liegt bei Szenario A bei 170 MWh und bei Szenario B bei 165 MWh. Auf ein Jahr gesehen nimmt mit einer Erhöhung des Baumbestands in diesem Gebietsausschnitt der Heizbedarf in Szenario B im Vergleich zum Status Quo um 5,6 MWh zu und der Kühlbedarf um 18 MWh ab.

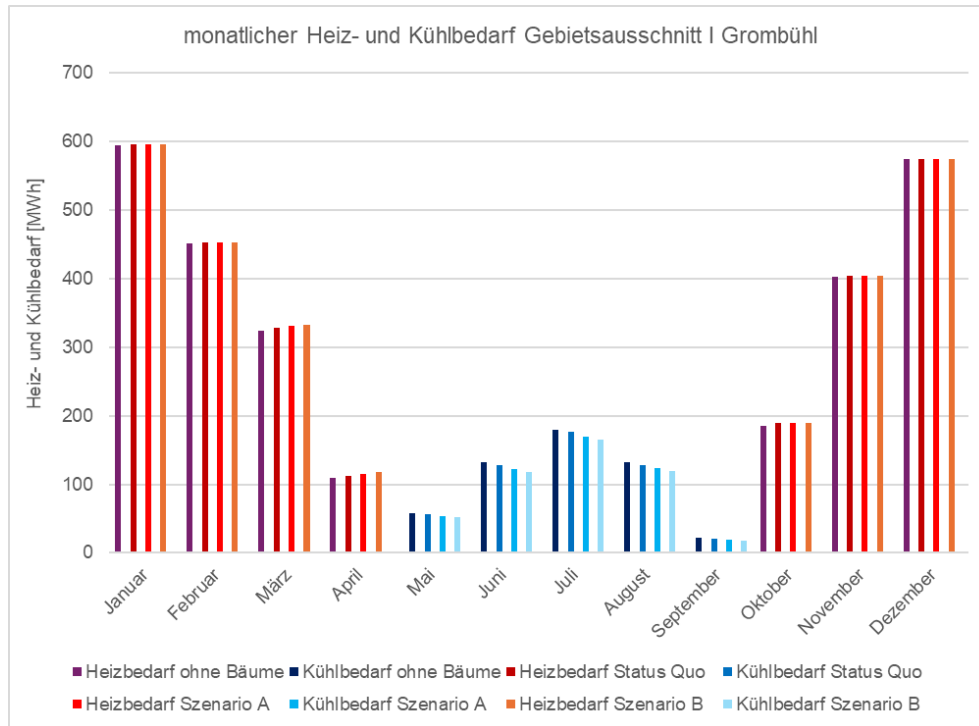


Abbildung 22: Monatlicher Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Eine Erhöhung des Heizbedarfs und eine Reduktion des Kühlbedarfs wird auch aus den untenstehenden Diagrammen in Abbildung 23 ersichtlich. Die Anzahl der Häuser auf der y-Achse ist gegen den spezifischen Energiebedarf auf der x-Achse in kWh/(m²*a) aufgetragen.

In Abbildung 23 ist der spezifische Energiebedarf der 37 Wohngebäude des Gebietsausschnitts I für den Fall, dass keine Baumverschattung berücksichtigt wird, sowie für den Status Quo und die Szenario A und B, in welchen der Verschattungseffekt mit in die Simulation eingeflossen ist, dargestellt. Im Vergleich zum Status Quo weisen mehr Gebäude einen spezifischen Heizbedarf in dem Intervall von 90-120 kWh/(m²*a) bzw. 120-150 kWh/(m²*a) auf und die Anzahl der Gebäude mit einem geringen spezifischen Heizbedarf (60-90 kWh/(m²*a)) hat sich leicht reduziert. Mit einer Zunahme der Bäume steigt die Anzahl der Gebäude mit einem spezifischen Kühlbedarf von 10-20 kWh/(m²*a).

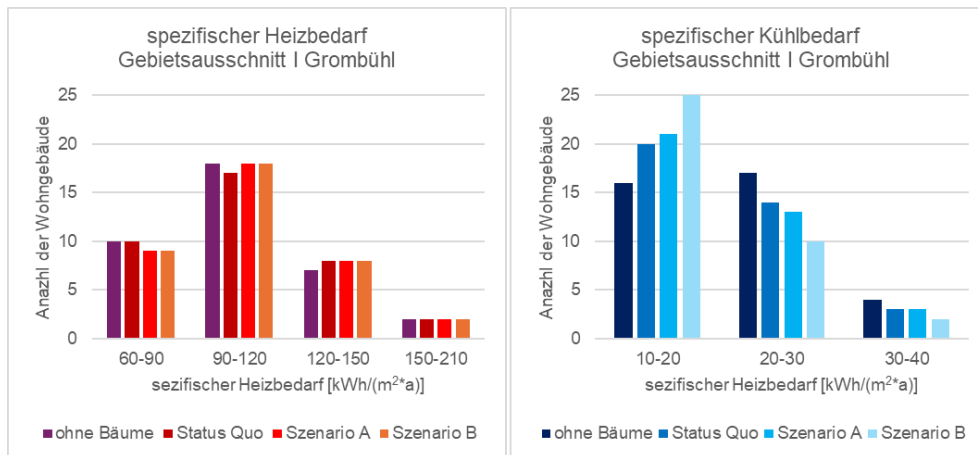


Abbildung 23: Spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Status Quo, in Szenario A und in Szenario B des Gebietsausschnitts I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Der höchste Heizbedarf liegt für beide Szenarien des Gebietsausschnitts II im Januar mit etwa 2.600 MWh. Der Höchstwert des Kühlbedarfs liegt im Juli mit 726 MWh (Szenario C) bzw. 714 MWh (Szenario D). Auf das Jahr gesehen nimmt der Heizbedarf in Szenario D, verglichen mit dem Status Quo um 260 MWh zu, während der Kühlbedarf um 300 MWh abnimmt. Die Betrachtung des Energiebedarfs je Quadratmeter Nutzfläche zeigt in Gebietsausschnitt II ein ähnliches Bild wie in Gebietsausschnitt I, jedoch ist die Veränderung etwas weniger deutlich zu erkennen. Der spezifische Heizbedarf verschiebt sich um bis zu drei Gebäude hin zu einem höheren Bedarf. In Szenario D nimmt die Anzahl der Gebäude in dem kleinsten Intervall des spezifischen Kühlbedarfs von 10-20 kWh/(m²*a) um acht Gebäude zu. In dem einzelstehenden Block im Nordosten ist keine Änderung des Gebäudeenergiebedarfs mit einer Erhöhung der Baumanzahl zu erkennen. (vgl. Anhang 6.1)

Wie bereits in den anderen Baumpflanzungsszenarien in dem Fallstudiengebiet Grombühl liegt auch im Gebietsausschnitt III der höchste Heizbedarf mit 7.800 MWh im Januar und der höchste Kühlbedarf im Juli mit etwa 2.300 MWh. Pro Jahr nimmt der Heizbedarf in Szenario E um 48,5 MWh zu, während sich der Kühlbedarf um 137 MWh reduziert. Auf den spezifischen Energiebedarf haben die zusätzlichen Bäume eine geringe Auswirkung. Es ist eine Umverteilung von maximal zehn Gebäuden zu geringeren bzw. niedrigeren Intervallen beobachten. (vgl. Anhang 6.2)

Der Effekt der Verschattung auf die 37 Wohngebäude zeigt auch in dem Gebietsausschnitt IV eine geringe Auswirkung auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf. Der Höchstwert des Heizbedarfs liegt mit etwa 121 MWh pro Monat sowohl für den Status Quo als auch für die beiden Szenarien im Januar. Der

Kühlbedarf erreicht im Juli mit knapp über 80 MWh pro Monat den Höhepunkt. Im Vergleich zum Status Quo steigt der jährliche Heizbedarf in Szenario G um 5 MWh an, während der Kühlbedarf um 6 MWh sinkt. Der jährliche Gebäudeenergiebedarf pro Quadratmeter Nutzfläche im Gebietsausschnitt IV weist ebenso eine Verschiebung hinzu einem geringeren spezifischen Kühlbedarf auf. Im Vergleich zum Status Quo erhöht sich in Szenario G die Anzahl der Gebäude in dem Intervall von 20-30 kWh/(m²*a) um zwei Gebäude. Für den spezifischen Heizbedarf ist keine Veränderung zu erkennen. (vgl. Anhang 6.3)

Die Auswirkung der Verschattung auf den monatlichen thermischen Gebäudeenergiebedarf der 376 Wohngebäude in dem Gebietsausschnitt V ist gering. Der Verlauf des Grafens ist vergleichbar mit dem der übrigen Gebietsausschnitte. Der Höchstwert des Heizbedarfs wird im Januar mit 1.160 MWh erreicht. Im Juli erreicht der Kühlbedarf seinen Höhepunkt mit knapp 800 MWh. Summiert über das Jahr ist eine Zunahme des Heizbedarfs von 10 MWh in Szenario H im Vergleich zum Status Quo zu verzeichnen. Der Kühlbedarf reduziert sich mit einer Zunahme von 135 Bäumen um 26,6 MWh pro Jahr im Vergleich zum Status Quo. In Gebietsausschnitt V reduziert sich die Anzahl der Wohngebäude mit einem spezifischen Kühlbedarf von 30-40 kWh/(m²*a) auf knapp 200 Wohngebäude im Szenario ohne Bäume auf etwa 150 Häuser in Szenario H. Für den spezifischen Heizbedarf ist eine Verschiebung des Energiebedarfs zu den höheren Intervallen zu erkennen. (vgl. Anhang 6.4)

Zwischen dem Fallstudiengebiet Grombühl und dem Fallstudiengebiet Grafenbühl sind große Unterschiede im spezifischen Gebäudeenergiebedarf zu erkennen. Während im Status Quo des gesamten Quartiers Grafenbühl die Mehrheit der Gebäude einen spezifischen Heizbedarf von 20-40 kWh/(m²*a) aufweisen, liegt dieser in Grombühl zwischen 100 und 200 kWh/(m²*a). Die Veränderung des spezifischen Kühlbedarfs mit einer Zunahme der Anzahl der Bäume folgt in den beiden Quartieren einem ähnlichen Verlauf.

Die Veränderung des thermischen Gebäudeenergiebedarfs spiegelt sich in den CO₂e-Emissionen der einzelnen Gebietsausschnitte wider. In Tabelle 4 ist zusammenfassend dargestellt, welche Zu- bzw. Abnahme der Emissionen im Vergleich zum Status Quo mit einer Zunahme des Grünanteils zu erwarten sind. Angesetzt wurde, wie in Kapitel 3.1 bereits erläutert, für den Heizbedarf der Emissionsfaktor für Gas und für den Kühlbedarf der Emissionsfaktor des deutschen Strommixes.

Tabelle 4: Zu- bzw. Abnahme der CO₂e-Emissionen in t nach Szenarien (gerundete Werte) (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Gebietsaus- schnitt	Baumpflanzungs- szenario	CO ₂ e-Emissionen Heizbedarf [t]		CO ₂ e-Emissionen Kühlbedarf [t]	
		Zunahme im Vergleich zum Status Quo	CO ₂ e Emissionen des Szenarios	Abnahme im Vergleich zum Status Quo	CO ₂ e Emissionen des Szenarios
I	A	+1	537	- 2	54
	B	+ 2	538	- 4	52
II	C	+ 5	2.314	- 8	229
	D	+ 9	2.318	- 13	224
III	E	+ 10	7.080	- 15	721
IV	F	+ 1	101	- 1	30
	G	+ 1	101	- 1	30
V	H	+ 1	961	- 3	298

Aus Tabelle 4 wird ersichtlich, dass mit einer Erhöhung des Baumbestands sich die Gesamtemissionen des Energiebedarfs reduzieren. Wird in Grombühl das gesamte Fallstudiengebiet betrachtet (Szenario E) können bei einer Erhöhung des Baumbestands um den Faktor 1,6 die Gesamtemissionen um 0,07 % reduziert werden. Für Grafenbühl liegt die Reduktion im gesamten Fallstudiengebiet bei einer Zunahme des Grünanteils um 1,3 bei knapp 0,06 %.

6.3 Auswirkungen auf die Evapotranspiration

Die Daten der täglichen Evapotranspiration weisen sowohl im Status Quo der einzelnen Gebietsausschnitte als auch für die einzelnen Szenarien große Ähnlichkeiten auf. Über das Jahr ist die Evapotranspiration durch viele Spitzen gekennzeichnet, aber im Schnitt steigt die Evapotranspirationsrate bis April an und sinkt ab Anfang Juni in Grombühl und ab Anfang Juli in Grafenbühl wieder ab.

Die Evapotranspiration für den Gebietsausschnitt I ist in Abbildung 24 dargestellt. Für die anderen Gebietsausschnitte ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Graphen, aber in diesem Gebietsausschnitt ist die Auswirkung zusätzlichen Grüns zwischen Status Quo und den beiden Szenarien am deutlichsten zu beobachten. Während die Evapotranspiration im Status Quo annähernd gleichbleibend ist, erhöht sich diese im

Jahresdurchschnitt in Szenario A um den Faktor 9,4 und in Szenario B um den Faktor 28,6.

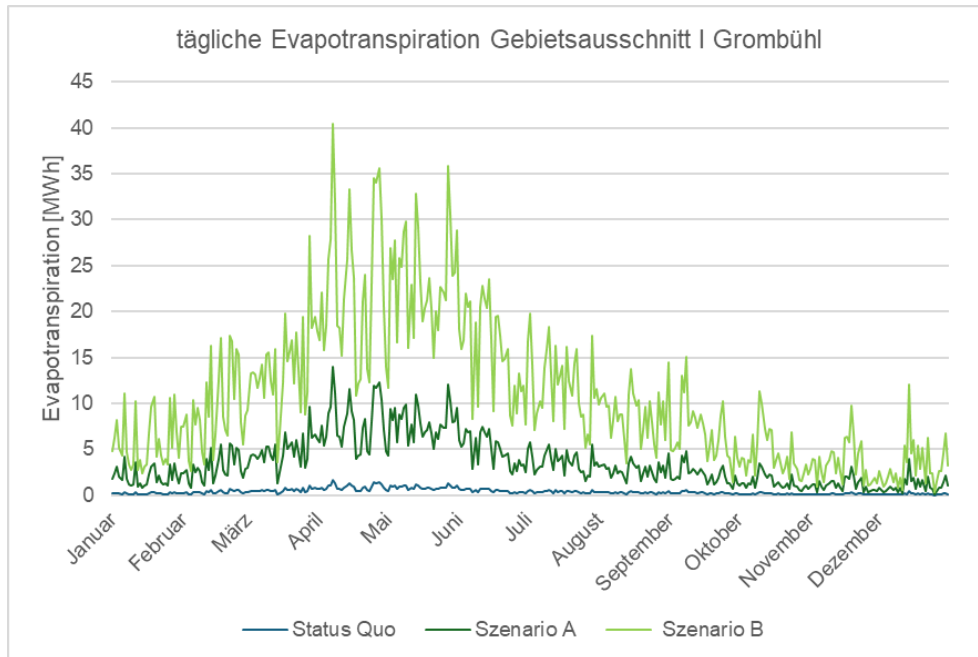


Abbildung 24: Tägliche Evapotranspiration im Gebietsausschnitt I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

In dem Gebietsausschnitt II liegt die tägliche Evapotranspiration im Durchschnitt bei 8,4 MWh (Status Quo), 31,6 MWh (Szenario C) bzw. 53,8 MWh (Szenario D). Im Vergleich zum Status Quo steigt die Summe der Evapotranspiration pro Jahr in Szenario C um den Faktor 3,7 und in Szenario D um den Faktor 6,3 (vgl. Anhang 7.1). Der Unterschied der täglichen Evapotranspiration ist zwischen Status Quo und Szenario E in dem Gebietsausschnitt III geringer als bei den vorherigen Szenarien. Der Mai, der Monat mit der höchsten Evapotranspirationsmenge, verzeichnet im gesamten Fallstudiengebiet im Schnitt eine tägliche Evapotranspiration von 62 MWh (Status Quo) und 108 MWh (Szenario E). Die Summe der jährlichen Evapotranspiration nimmt ausgehend vom Status Quo mit einer Zunahme von 500 Bäumen in dem Quartier um den Faktor 1,7 zu (vgl. Anhang 7.2).

In dem Gebietsausschnitt IV steigt die tägliche Evapotranspiration bei einer Verdopplung der Bäume erkennbar an. Summiert auf das Jahr kann ein Anstieg der Evapotranspiration von Szenario F auf Szenario G um den Faktor 1,7 beobachtet werden (vgl. Anhang 7.5). In dem gesamten Fallstudiengebiet (Gebietsausschnitt V) ist der Unterschied zwischen der täglichen Evapotranspiration im Status Quo und der in Szenario H eher gering. Der Höchstwert liegt, wie bei allen anderen Szenarien im Mai bei 1.120 MWh. Im Jahresdurchschnitt erhöht sich die Evapotranspiration um den Faktor 1,3 im Vergleich zum Status Quo (vgl. Anhang 7.6).

In der in Abbildung 25 dargestellten Diagramme ist die Zunahme der Evapotranspiration in Gebietsausschnitt I ersichtlich. Für jede Stunde eines Jahres ist die Summe der Evapotranspiration der 7 Bäume im Status Quo, der 82 Bäume in Szenario A an und der 257 Bäume in Szenario B dargestellt. Für die anderen vier Gebietsausschnitte ergibt sich ein ähnlicher Verlauf (vgl. Anhang 7.3, 7.4, 7.7 und 7.8).

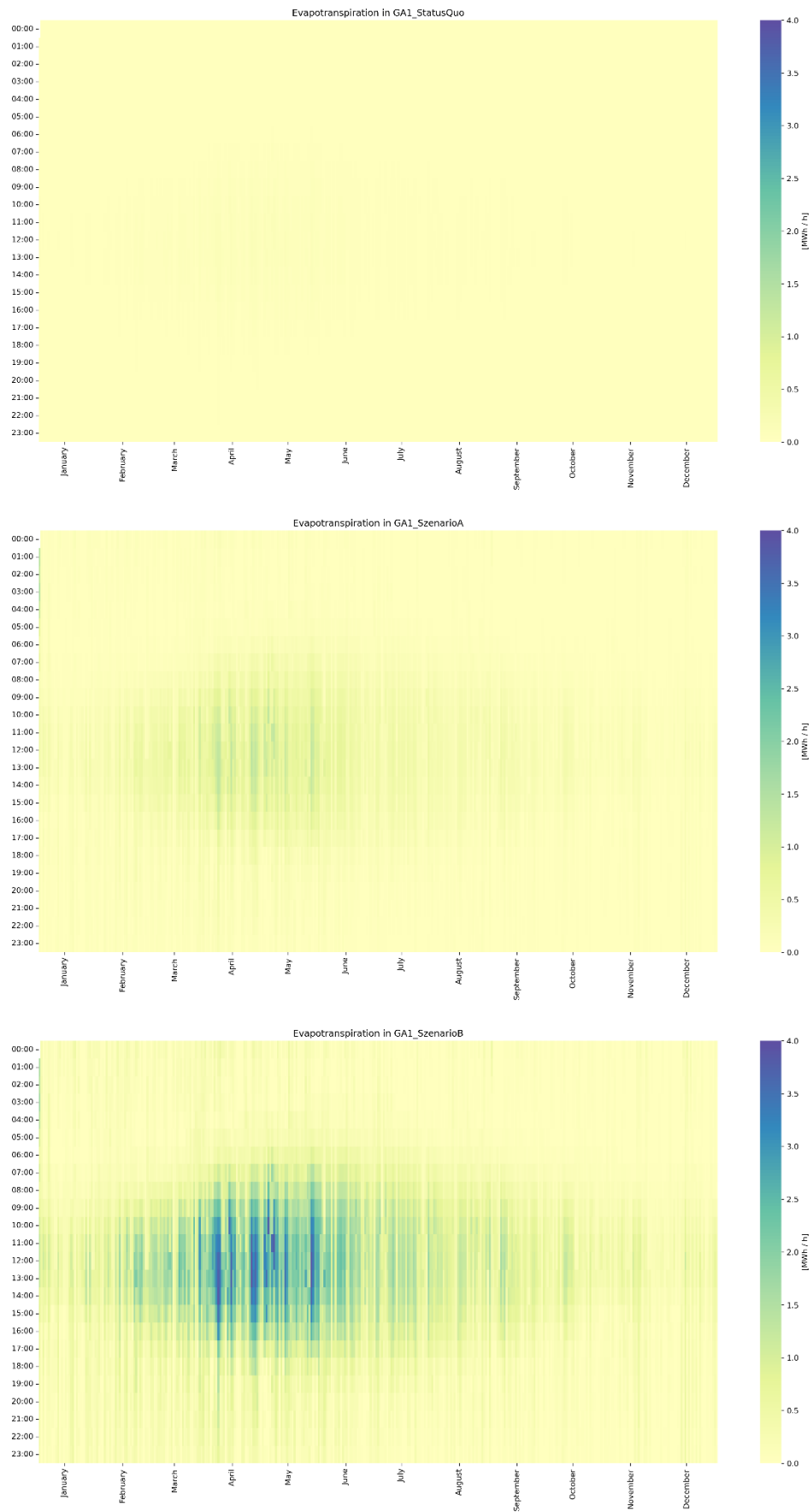


Abbildung 25: Tägliche Evapotranspiration im Status Quo (oben), in Szenario A (mitte) und in Szenario B (unten) im Gebietsausschnitt I (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Mit der Anzahl der Bäume steigt durch die Evapotranspiration der Energieentzug aus dem Gebiet an. Die Differenz zwischen solarer Strahlung und Evapotranspiration ist am Jahresende und am Jahresanfang für alle Gebietsausschnitte am höchsten. Der geringste Energieentzug ist in den Sommermonaten zu verzeichnen. In Tabelle 5 ist der Energieentzug durch Evapotranspiration im Jahresmittel dargestellt:

Tabelle 5: Auflistung der über die Monate gemittelte prozentuale Verringerung der Globalstrahlung (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

	Gebiets-ausschnitt	Baumpflanzungs-szenario	Prozentuale Verringerung der Globalstrahlung gemittelt über die Monate
Grombühl	I	Status Quo	0,6 %
		Szenario A	5,9 %
		Szenario B	17,5 %
	II	Status Quo	1,7 %
		Szenario C	6,5 %
		Szenario D	11,1 %
	III	Status Quo	2,8 %
		Szenario E	4,8 %
Grafenbühl	IV	Status Quo	1,6 %
		Szenario F	4,9 %
		Szenario G	8,4 %
	V	Status Quo	2,9 %
		Szenario H	3,9 %

Die Diagramme in Abbildung 26 verdeutlichen, dass der Energieentzug eher gering ist. Für jede Stunde eines Jahres ist die Globalstrahlung in MWh/h dargestellt. Das obere Diagramm zeigt die Globalstrahlung für Szenario B im Gebietsausschnitt I ohne Berücksichtigung der Bäume und damit ohne Energieentzug durch die Evapotranspiration. In dem unteren Diagramm ist die Globalstrahlung abzüglich der Evapotranspiration für das Baumpflanzungsszenario B dargestellt. Obwohl in Szenario B die prozentuale Verringerung der Globalstrahlung durch die Evapotranspiration im Vergleich zu den übrigen Szenarien am größten ist, ist kaum ein Unterschied in den untenstehenden Diagrammen erkennbar, weshalb die Diagramme der übrigen sieben Szenarien im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht abgebildet werden.

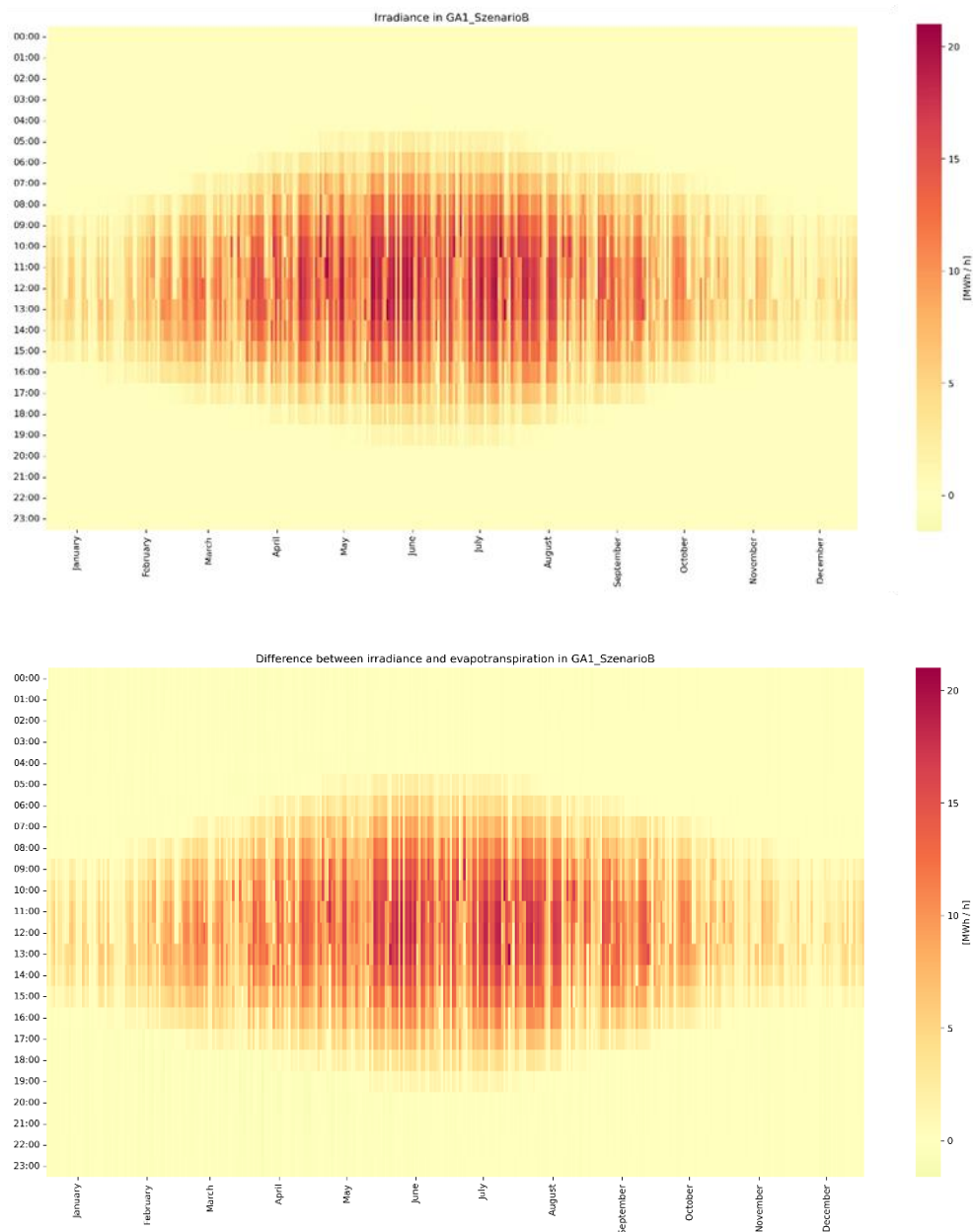


Abbildung 26: Globalstrahlung auf den Gebietsausschnitt I in Szenario B ohne (oben) und mit (unten) Berücksichtigung des Energieentzugs durch Evapotranspiration (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Die durch die Evapotranspiration entzogene Energie aus der Umwelt wird als „Verdunstungskälte“ spürbar. Die Auswirkung dieses Effekts wurde über die Temperaturänderung durch die Energiemenge der Evapotranspiration bestimmt. In allen Gebietsausschnitten ist mit einer Erhöhung der Anzahl der zusätzlichen Bäume eine Zunahme der möglichen Temperaturabsenkung zu verzeichnen. Dabei ist das Delta in den Wintermonaten am geringsten und weist im Mai den höchsten Wert auf.

In Gebietsausschnitt I weist der Status Quo im Jahresmittel eine Temperaturänderung von 0,1 K auf. Diese erhöht sich im Szenario A auf 1,3 K und in Szenario B auf 3,8 K. Wird nur der Monat Mai mit der höchsten mittleren Temperaturänderung betrachtet, kann eine Temperaturverringerung bis 0,3 K im Status Quo, bis 2,8 K im Szenario A und in bis 8,2 K Szenario B erreicht werden. In Abbildung 27 ist die über den Tag gemittelte

Temperaturänderung für den Gebietsausschnitt I in Grombühl dargestellt. Der Verlauf der möglichen Temperaturänderung der Gebietsausschnitte II-V ist in Anhang 8 zu finden.

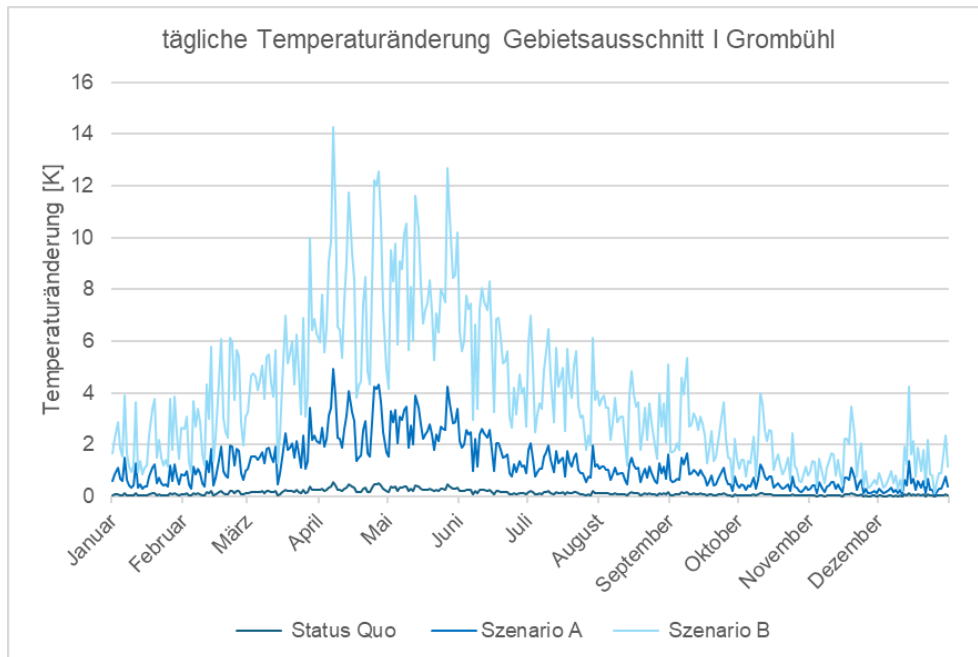


Abbildung 27: Tägliche Temperaturänderung im Gebietsausschnitt I (eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

Auch für den Gebietsausschnitt II ist, wie bereits erwähnt, im Mai ist das Delta der Temperatur am größten: 0,6 K (Status Quo), 2,8 K (Szenario C) bzw. 4,8 K (Szenario D). Während im Status Quo im Jahresmittel eine Temperaturabsenkung von 0,4 K pro Jahr zu erkennen ist, zeigt sich in Szenario C eine Temperaturabsenkung von 1,3 K und in Szenario D von 2,3 K pro Jahr. (vgl. Anhang 8.1)

Im Baumpflanzungsszenario in Gebietsausschnitt III ist im Status Quo eine mittlere Temperaturabsenkung um 0,3 K und in Szenario E um 0,5 K pro Jahr zu erwarten. Der Höchstwert der Temperaturänderung des Szenarios E liegt mit 1,1 K im Mai. (vgl. Anhang 8.2)

Die Temperaturänderung in dem Gebietsausschnitt IV nimmt bis zur Mitte des Jahres bis zu einem Höchstwert von 2,3 K (Szenario F, Mai) bzw. 3,8 K (Szenario G, Mai) zu. Im Jahresmittel beträgt die Temperaturverringerung im Status Quo 0,4 K, im Szenario F 1,2 K und im Szenario G 2 K. (vgl. Anhang 8.5)

Die Temperaturänderung durch Evapotranspiration steigt bei der Betrachtung des gesamten Fallstudiengebiets in Gebietsausschnitt V und einer Zunahme von 135 Bäumen im Jahresmittel um ca. 25 %. Im Jahresmittel beträgt die Temperaturabsenkung im Status Quo 0,7 K und in Szenario G 1 K. Der Höchstwert der Temperaturänderung wird im Mai mit 1,4 K (Status Quo) bzw. 1,9 K (Szenario H) erreicht. (vgl. Anhang 8.6)

Die nachfolgenden Diagramme verdeutlichen für den Gebietsausschnitt I für jede Stunde eines Jahres welche Temperaturabsenkungen möglich sind. Der Verlauf der Diagramme sieht für die vier anderen Gebietsausschnitte ähnlich aus (vgl. Anhang 8.3, 8.4, 8.7 und 8.8).

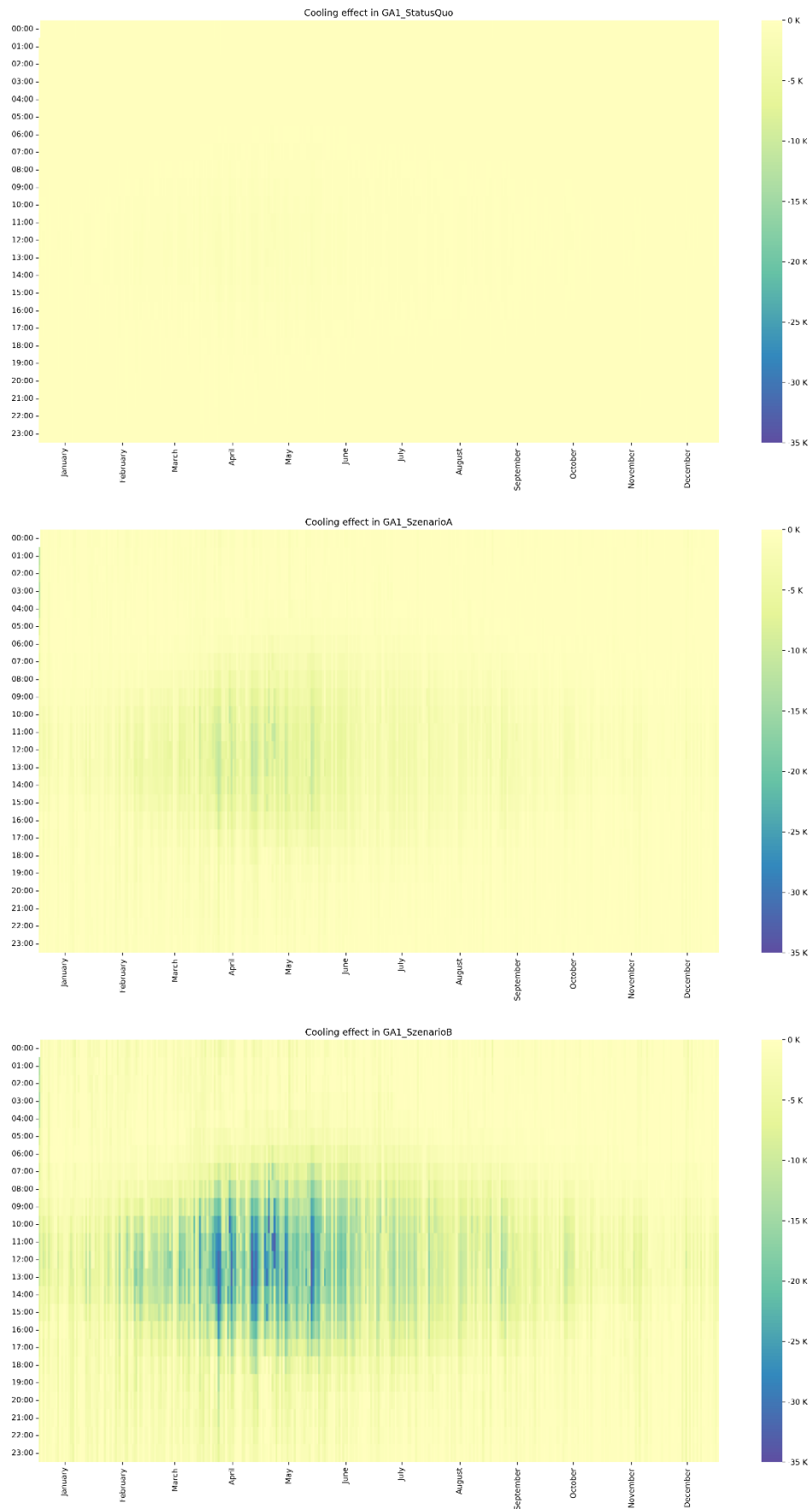


Abbildung 28: Stündliche Temperaturveränderung durch Evapotranspiration in einem Jahr für den Status Quo (oben), das Szenario A (mitte) und das Szenario B (unten) in Gebietsausschnitt I (eigene Berechnungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse)

7 Interpretation der Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen interpretiert.

Die Ergebnisse der Simulationen verdeutlichen, dass die Anzahl neuer Bäume von dem vorherrschenden Quartiersarchetypen als auch der gewählten Gebietsgröße abhängt. Durch zu Beginn festgelegte Mobilitätsszenarien, die auf definierte Straßenquerschnitte angewandt werden, variiert die Potentialfläche für Stadtgrün. Dies zeigt der Vergleich der Fallstudiengebiete: Im Stadtteil Grombühl können pro Hektar doppelt so viele Bäume gepflanzt werden wie im Stadtteil Grafenbühl. Diese Diskrepanz ist damit zu erklären, dass ein größeres, dicht bebautes Gebiet mit breiteren Straßen eine größere Potentialfläche für die Neupflanzung von Bäumen bietet.

Die in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Zunahme von Stadtgrün einen geringen Einfluss auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf hat. Grund hierfür ist, dass eine Zunahme der Bäume zu gegenseitiger Verschattung führt, wodurch der Verschattungseffekt jedes einzelnen Baums auf das Gebäude gemindert wird. Außerdem wird in dem angewandten Workflow die Temperaturabsenkung durch Evapotranspiration, welche ebenso auf den Energiebedarf wirkt, nicht berücksichtigt. Die unterschiedliche prozentuale Veränderung des thermischen Gebäudeenergiebedarfs innerhalb der jeweiligen Gebietsausschnitte ist zum einen auf die gewählte Gebietsgröße als auch auf die Anzahl der neuen Bäume und deren Pflanzabstand zurückzuführen.

Dennoch ist ein leichter Anstieg des Heizbedarfs zu erkennen, welcher auf eine zusätzliche Verschattung der Häuserfassade in den Herbst- und Wintermonaten zurückzuführen ist, da auch die kahlen Baumgerippe einen minimalen Verschattungseffekt aufweisen. Der Verschattungseffekt voll belaubter Bäume hat im Vergleich einen deutlich größeren Effekt auf den Kühlbedarf. Die Unterschiede im spezifischen Energiebedarf in den beiden Fallstudiengebieten lassen sich durch die Gebäudetypologie erklären. In Grombühl dominieren Altbauten aus der Gründerzeit, während Grafenbühl hauptsächlich aus später errichteten Ein- und Zweifamilienhaussiedlungen besteht. Der generell schlechtere energetische Zustand der Altbauten führt zu einem erhöhten Heiz- bzw. Kühlbedarf.

Die Veränderung im Heiz- und Kühlbedarf spiegeln sich auch in den wärmebedingten CO₂e-Emissionen wider. Folglich führt ein höherer Heizbedarf zu gestiegenen CO₂e-Emissionen, während der verringerte Kühlbedarf zu einer Reduktion der CO₂e-Emissionen beiträgt. Dadurch, dass der Effekt der Verschattung auf den Kühlbedarf größer als auf den Heizbedarf ist, ist für die Summe der CO₂e-Emissionen des thermischen Gebäudeenergiebedarfs eine Reduktion festzustellen.

Neben der Verschattung des Straßenraums hat die Zunahme der Evapotranspiration, die mit einer steigenden Anzahl von Bäumen einhergeht, einen großen Einfluss auf den thermischen Komfort im Freien. Pflanzen nutzen die einfallende Globalstrahlung für die Photosynthese, wodurch die einfallende Strahlung im städtischen Raum reduziert wird. Diese Reduktion der solaren Strahlung führt zu einer gefühlten Temperaturabsenkung, da weniger Strahlung auf versiegelte Flächen und auf den Menschen einwirkt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Erhöhung der Baumanzahl in den untersuchten Gebietsausschnitten nur einen geringen Energieentzug, insbesondere in den

Sommermonaten, zur Folge hat. Dies ist auf die höhere Strahlungsintensität im Sommer und die abnehmende Evapotranspirationsrate der Bäume ab der zweiten Jahreshälfte zurückzuführen.

Die Kurven der Evapotranspiration weisen viele Spitzen auf, was darauf zurückzuführen ist, dass die Wetterdaten für die Simulationen auf einem Vergleichsjahr basieren und nicht auf einer Mittelung der Daten über einen längeren Zeitraum. Die stündliche Auflösung der Daten des betrachteten Jahres bildet die spezifischen Wetterbedingungen dieses Jahres ab. Die Evapotranspiration variiert stündlich, da sie von verschiedenen Faktoren wie der Temperatur, der Niederschlagsmenge, der Wasserverfügbarkeit im Boden und der einfallenden solaren Strahlung, beeinflusst wird. Aus den Simulationen geht hervor, dass die Maxima der Evapotranspiration zeitlich versetzt zu den Maxima der Lufttemperatur und der Niederschlagsmenge auftreten. Höhere Lufttemperaturen erhöhen zunächst die Evapotranspiration, da warme Luft mehr Wasser aufnehmen kann. Erreichen jedoch hochsommerliche Temperaturen in Kombination mit ausbleibenden Niederschlägen ihren Höhepunkt, nimmt die Evapotranspiration ab, da den Pflanzen nicht genügend Wasser im Wurzelraum zur Verfügung steht. Je mehr Globalstrahlung auf die Pflanzen trifft, desto höher ist die zu erwartende Evapotranspiration, da mehr Energie für den Verdunstungsprozess zur Verfügung steht. Dieser Zusammenhang ist für Grombühl von Januar bis Anfang Juni zutreffend. In den Hochsommermonaten ist ein Rückgang der Evapotranspiration trotz hoher Temperaturen, steigender Globalstrahlung und hohen Niederschlagsmengen zu verzeichnen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass auf Grund der hohen Temperaturen die Niederschlagsmengen schnell verdunsten und nicht bis in die Bodenschichten der Wurzeln eindringen. So leiden die Pflanzen unter einem Wassermangel und folglich nimmt die Evapotranspirationsrate ab. Im Herbst geht der Baum in die Ruhephase über und beginnt seine Blätter abzuwerfen, was zu einer verringerten Belaubungsdichte und damit auch zu einer geringeren Evapotranspiration führt, da die Hauptmenge der Evapotranspiration über die Blattoberfläche erfolgt. Zum Jahresende korreliert der Rückgang der Evapotranspiration wieder mit den sinkenden Temperaturen und der abnehmenden solaren Einstrahlung. Die Einflüsse der Wetterdaten auf die Evapotranspiration sind in Anhang 9 dargestellt und verdeutlichen die vorangegangene Erklärung der Ergebnisse. Mit einer künstlichen Bewässerung der Bäume könnte ein größerer Teil der Globalstrahlung genutzt werden und die Menge der Evapotranspiration auch in der zweiten Jahreshälfte erhöht werden.

Eine Erhöhung des Baumbestands führt über das Jahr zu einer steigenden Temperaturabsenkung, was mit der proportional zunehmenden Evapotranspirationsrate erklärt werden kann. Wird dem System eine größere Energiemenge entzogen, resultiert dies in einem größeren Delta T, das als „Verdunstungskälte“ wahrnehmbar wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Simulation auf Basis der Mobilitätsszenarien und darüber bestimmten Potentialfläche einen positiven Effekt von zusätzlichem Stadtgrün, unabhängig vom betrachteten Quartiersarchetyp und der Gebietsgröße, aufweist.

8 Kritische Würdigung

Im Laufe der Anwendung des Tools auf reale Fallstudiengebiete, konnten Grenzen des Modells aufgezeigt und Herausforderungen identifiziert werden. Diese Herausforderungen werden im Folgenden beleuchtet.

Für die Durchführung der Simulation sind Geoinformationsdaten notwendig, die nicht in jeder Gemeinde in gleicher Detailtiefe zur Verfügung stehen, frei zugänglich sind oder kostenpflichtig bei den zuständigen Behörden bestellt werden müssen. Ohne eine ausreichende Datenverfügbarkeit müssen Daten händisch erfasst, Annahmen getroffen oder auf Standardwerte zurückgegriffen werden. Die manuelle Erfassung ist zeitintensiver und führt zu einem Verlust der Genauigkeit. Zudem erfordert eine manuelle Erfassung die Nutzung einer Software, die Geoinformationen verarbeiten kann.

Das Tool hat gewollt einen vereinfachten modellhaften Charakter. In der Vorbereitung der Baumpflanzungsszenarien konnten jedoch Grenzen des Tools identifiziert werden. Während die typischen baulichen Charakteristika der standardisierten Quartiersarchetypen gut auf die reale Situation der Fallstudiengebiete anwendbar sind, sind die Straßenquerschnitte deutlich diverser als in dem Modell angenommen. Dies führte dazu, dass für Grombühl die definierten Straßenquerschnitte je Quartiersarchetyp angewendet werden konnten, hingegen für Grafenbühl eine manuelle Messung der Straßenbreite und Berechnung der Potentialflächen durchgeführt werden musste. Dieses Nachjustieren stellt einen zusätzlichen Zeitbedarf dar. Um jedoch eine qualitative Aussage zu treffen, inwiefern die zugeordneten Straßenquerschnitte in der Masse die Gegebenheiten der Quartiersarchetypen darstellen, ist das Durchführen von zusätzlichen Simulationen in weiteren Quartieren nötig.

Die Gebietsausschnitte auf Grund der Höhe der thermischen Belastung auszuwählen, ist eine gute Möglichkeit, um bei einer geringen Reduktion des MIV-Anteils das Pflanzen auf wenige und die am stärksten durch Überhitzung gefährdeten Straßenzüge zu konzentrieren. Dennoch sind in der Praxis mehr Faktoren für die Gebietsauswahl zu berücksichtigen als ausschließlich klimatologische Bedingungen. Das Erscheinungsbild im Stadtzusammenhang, sowie die Straßenhierarchie spielen eine genauso entscheidende Rolle wie die unterirdischen Nutzungskonflikte zwischen zusätzlich benötigtem Wurzelraum und vorhandener Infrastruktur. Außerdem müssen in der Umsetzung der Baumszenarien verschiedene Interessenskonflikte gelöst bzw. die unterschiedlichen Interessen verschiedener Stakeholder berücksichtigt werden. Die voll umfassende Berücksichtigung der aufgelisteten Aspekte, war im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, weshalb vereinfachende Annahmen getroffen werden mussten.

Weiteres Verbesserungspotential des Tools besteht bei dem Python-Skript, welches zum automatischen Pflanzen der Bäume verwendet wird. Da das Skript ausschließlich auf öffentlich zugängliche Daten zurückgreift, werden in den Innenhöfen keine weiteren Bäume gepflanzt. Stellt sich aber eine Reduktion des MIV ein, besteht die Möglichkeit, dass auch Parkraum oder Garagen im Innenhof von Blockbebauungen oder auf privaten Grundstücken wegfallen. Eine Pflanzung im privaten Raum müsste zum jetzigen Zeitpunkt händisch erfolgen. Zwar ist die Flächenumnutzung im privaten Raum rechtlich komplizierter als im öffentlichen Raum, dennoch sollte in einer Potentialanalyse der private Raum nicht außenvorgelassen werden. Auch die Pflanzen im privaten Raum

verschatten die Gebäudefassaden und erhöhen die Evapotranspiration und haben somit eine Auswirkung auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf und das urbane Mikroklima.

Eine weitere Ungenauigkeit bzw. realitätsferne Abbildung zeigt sich beim Pflanzen der Bäume über das Python-Skript. Das automatische Pflanzen der Bäume erfolgt in der Straßenmitte und auch über Kreuzungen hinweg ohne Berücksichtigung von Einfahrten und Rettungsgassen. Dies führt zu einem größeren Abstand zu den Häusern, weshalb die Auswirkungen des Verschattungseffekts womöglich geringer ausfallen als bei einer Platzierung am Straßenrand. Hier wäre also für eine genauere Simulation eine manuelle Anpassung der Output-Dateien notwendig. Zudem erfolgt bei einer ausreichenden Straßenbreite das Pflanzen an beiden Straßenrändern. Hier wäre es sinnvoll, wenn je nach Quartiersarchetyp bestimmte Parameter angepasst werden könnten, um eine möglichst realitätsnahe Planung zu erzielen.

Als Inputparameter wird neben den Koordinaten des Gebietsausschnitts der Pflanzabstand für die neuen Bäume festgelegt. Dies führt dazu, dass bei einer Vorgabe von möglichen zusätzlichen Pflanzungen, so wie es im Rahmen dieser Arbeit der Fall war, durch Probieren ein geeigneter Gebietsausschnitt festgelegt werden musste, in welchem die errechnete Anzahl neuer Bäume in dem vorher definierten Pflanzabstand Platz finden. Um diesen zeitaufwändigen Prozess zu optimieren, wäre es hilfreich, wenn neben dem Pflanzabstand zusätzlich die maximale Anzahl der neuen Bäume festgelegt werden könnte.

Das Simualtionstool SimStadt ist nach einer kurzen Einführung und dem Vorhandensein aller relevanter Input-Daten intuitiv anwendbar und erfordert keine speziellen Vorkenntnisse. Mit den Output-Daten können die Simulationen direkt ausgewertet werden.

Für die Ermittlung des Heiz- und Kühlbedarfs der Gebäude wird in dem Workflow nur die Verschattung berücksichtigt. Die Evapotranspiration der Bäume wirkt aber auch auf den Energiebedarf. Eine verringerte Außentemperatur kann, je nach energetischem Zustand des Gebäudes, zu einer deutlichen Erhöhung des Heizbedarfs in den Wintermonaten bzw. einer weiteren Reduktion des Kühlbedarfs im Sommer führen.

Bei der Bewertung der CO₂e-Emissionen ist zu beachten, dass die Werte nicht auf den tatsächlich vorkommenden Heizmitteln des Quartiers beruhen. Eine genaue Bilanzierung der CO₂e-Emissionen auf Haushaltsebene wäre zwar deutlich exaktere Ergebnisse liefern, ist aber auf Grund des erforderlichen Zeitaufwands nicht praktikabel. Dennoch können die berechneten Werte für eine erste Näherung genutzt werden. Würde für den Kühlbedarf der Emissionsfaktor von Ökostrom mit 0 g CO₂e/kWh angesetzt werden, würden sich folglich die Gesamtemissionen mit einer Erhöhung des Grünanteils nicht reduzieren, sondern bedingt durch den steigenden Heizbedarf erhöhen. Ein weiterer Aspekt in der Betrachtung der CO₂e-Emissionen ist, dass Pflanzen CO₂ für den Prozess der Photosynthese nutzen und somit auch einen Beitrag zu der Reduktion der Emissionen innerhalb des Quartiers leisten.

Die Werte der Temperaturabsenkung beruhen auf einer sehr vereinfachten Annahme. So werden außer der Evapotranspiration jegliche Einwirkungen auf die Temperatur, wie Winde oder die solare Strahlung bei den Berechnungen außenvorgelassen. Zudem variiert die Temperaturabsenkung mit der Definition der Höhe des Volumenkörpers. Auf Grundlage der für diese Berechnung geltenden Annahmen ergeben sich teilweise sehr

hohe Temperaturabsenkungen bis zu 35 Kelvin. Diese hohe Reduktion ist sehr realitätsfern und beruht auf der starken Vereinfachung. Die Werte im Jahresdurchschnitt liefern aber dennoch ein sinnvolles Ergebnis, welches mit Werten in der Literatur übereinstimmt (vgl. Errell und Zhou 2022; vgl. Feldmann et al. 2023, S. 21; vgl. Kampusch 2018, S. 27).

Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen basieren je Fallstudiengebiet auf den gleichen Wetterdaten. Gerade bei der Simulation von Zukunftsszenarien kann dies zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Urbane Räume sind zunehmend den Einflüssen steigender Temperaturen, längerer Trockenperioden und häufigerer Starkregenereignisse ausgesetzt. Diese sich wandelnden klimatischen Bedingungen sollten daher in den Simulationen berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit hierfür bieten die Klimaszenarien des IPCC. Die Szenarien berücksichtigen unter anderem als maßgebliche Einflussgröße die Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre beschrieben durch die *Representative Concentration Pathways* (RCP). Für jedes RCP-Szenario wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bedingt durch die ergriffenen Klimaschutzmaßnahmen prognostiziert. Dabei gilt je höher der Index des Szenarios ist (z.B. RCP8.5), desto niedriger ist die zu erwartende Reduktion und desto größer und schwerwiegender sind die Auswirkungen auf das Klima. Ein sich verändertes Klima wirkt auch auf die urbanen Räume und damit auf das städtische Grün. (vgl. Kreienkamp et al. 2022, S. 3)

Trotz einiger Optimierungspotentiale eignet sich das Tool, um komplexe Sachverhalte auf eine simple Verständnisebene herunterzubrechen. Hierbei ist zu beachten, dass die getroffenen Annahmen projektspezifisch geprüft und gegebenenfalls nachjustiert werden müssen. Trotz des modellhaften Charakters ermöglicht das Tool die Zusammenhänge im urbanen Raum und die Auswirkungen einer Erhöhung der Baumanzahl auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf und das urbane Mikroklima zu verstehen und zu bewerten. Es eignet sich nach einigen weiteren internen Validierungen optimal für Städte und Gemeinden, um die Auswirkungen ihrer angestrebten Maßnahmen zu simulieren und zu beurteilen.

9 Fazit

Eine Veränderung im Mobilitätsverhalten schafft Freiflächen für urbanes Grün. Eine Erhöhung des Grünanteils in Städten wirkt positiv auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf der Wohngebäude und das städtische Mikroklima.

Ausgehend von einer MIV-Reduktion um 3%, 10% bzw. 20% wurden die für die Baumpflanzungsszenarien essenziellen Potentialflächen bestimmt. Auf diesen Mobilitätsszenarien basierten die durchgeführten Simulationen.

Die Ergebnisse der Simulationen der Verschattung zeigen einen eher geringen oder sogar ungünstigen Effekt auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf. Auf den Heizbedarf wirkt sich eine zunehmende Verschattung durch mehr Bäume negativ aus, denn dieser verzeichnet eine Zunahme mit steigender Anzahl an Bäumen. Somit ist bei einer reinen Betrachtung des Heizbedarfs aus energetischer Sicht eine Erhöhung des Grünanteils nicht sinnvoll. Hingegen wirkt sich eine zunehmende Verschattung positiv auf den Kühlbedarf der Gebäude aus, da dieser mit Erhöhung des Grünanteils sinkt. So kann bei einem etwa 40 ha großen Untersuchungsgebiet mit einer Zunahme des Heizbedarfs von 50 MWh hingegen mit einer Reduktion des Kühlbedarfs von 140 MWh bei einer Erhöhung des Baumbestands um 500 Bäumen gerechnet werden. In Summe verringert sich der thermische Gebäudeenergiebedarf, da sich der Kühlbedarf über das Jahr stärker reduziert als sich der Heizbedarf erhöht. Dies führt in diesem Gebiet zu einer Reduktion der jährlichen gesamten CO₂e-Emissionen um 5 t. Trotz der geringen Auswirkungen auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf ist der Mehrwert für den Straßenraum nicht außer Acht zu lassen. Ein größeres Blätterdach reduziert die eintreffende solare Strahlung. Die verminderte Absorption der einfallenden Strahlung durch dunkle Straßenoberflächen und Gebäudefassaden reduziert die Temperatur in der Stadt und wirkt dem Wärmeinseleffekt entgegen.

Ein deutlich größerer Effekt eines steigenden Grünanteils ist bei der Evapotranspiration zu verzeichnen. Je mehr neue Bäume gepflanzt werden, desto größer ist die Energiemenge, die durch Evapotranspiration dem urbanen Raum entzogen wird. Dieser Entzug ist durch „Verdunstungskälte“ spürbar. Je nach gewähltem Gebietsausschnitt und der Anzahl der neu gepflanzten Bäume kann im Jahresmittel mit einer Temperaturabsenkung von bis zu 8 Kelvin gerechnet werden.

Der Prozess der Simulationsdurchführungen hat gezeigt, dass der modellhafte Ansatz einem logischen Aufbau folgt. Dennoch wurde deutlich, dass die Praktikabilität stark von der Datenverfügbarkeit und -qualität abhängt. Es ist anzumerken, dass im jetzigen Zustand noch zu große Abweichungen zwischen Modell und Realität auftreten, um den Planungsprozess optimal und ohne große Datenbereinigung unterstützen zu können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ohne eine Verhaltensänderung der Bevölkerung und einem Wandel in dem Mobilitätsverhalten in städtischen Bereichen kaum Potentiale für das Pflanzen neuer Bäume bestehen. Die positiven Auswirkungen und der vielseitige Mehrwert von Stadtgrün wurden durch die Simulationen verdeutlicht. Aus den Ergebnissen der Simulationen kann festgehalten werden, dass sich ein steigender Grünanteil zwar nur geringfügig, aber in der Gesamtbetrachtung positiv auf den Gebäudeenergiebedarf auswirkt. Dies führt zu verminderten CO₂e-Emissionen und sinkenden Energiekosten. Die Erhöhung des Grünanteils hat auf das Mikroklima des

urbanen Raums eine deutlich größere Auswirkung als auf den thermischen Gebäudeenergiebedarf. Durch eine zunehmende Temperaturabsenkung durch Verschattung und Evapotranspiration wird der thermische Komfort der Bevölkerung, vor allem in den Sommermonaten, sichergestellt. Dies steigert die Aufenthaltsqualität im Freien und die Lebensqualität in der Stadt.

Es wird deutlich, dass schon bei geringsten Mobilitätsveränderungen Auswirkungen von Stadtgrün auf die bebaute Umgebung und die klimatischen Bedingungen in der Stadt zu verzeichnen sind. Somit stellt eine Erhöhung des urbanen Grüns durch das Pflanzen von neuen Stadtbäumen einen essenziellen Schlüssel für eine nachhaltige Stadtentwicklung dar. Außerdem hat diese Arbeit verdeutlicht, dass verschiedene Wechselwirkungen im System Stadt existieren. Es ist also unabdingbar in zukünftigen Planungsprozessen eine ganzheitliche Planung zu verfolgen und verstärkt die Komponente der Ökologie mit in die Stadtentwicklung zu integrieren. So ist es möglich Städte nach den geltenden Leitbildern der gegenwärtigen Stadtentwicklung an die prognostizierten klimatischen Bedingungen anzupassen und klimaresilient zu gestalten.

Literaturverzeichnis

Bott, Helmut; Grassl, Gregor; Anders, Stephan (2018): Nachhaltige Stadtplanung. Lebendige Quartiere, Smart Cities, Resilienz. 2. Auflage. München: Detail Business Information GmbH.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Hg.) (2021): Informationsblatt CO₂-Faktoren. Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft - Zuschuss. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2024.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 07.06.2024.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hg.) (2024a): Im Fokus: Hitze in der Stadt. Online verfügbar unter https://www.nationale-stadtentwicklungspolitik.de/NSPWeb/SharedDocs/Blogeintraege/DE/Fokusthema/Hitze/editorial_hitze-in-der-stadt.html;jsessionid=2B5E905F1DC2FFE9720E896E1F81A13A.live11291, zuletzt aktualisiert am 01.03.2024, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hg.) (2024b): Die neue Leipzig-Charta. Online verfügbar unter <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/stadt-wohnen/stadtentwicklung/neue-leipzig-charta/neue-leipzig-charta-node.html>, zuletzt aktualisiert am 24.03.2024, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Burghardt und Partner Ingenieure (2018): Klimaanalyse für die Stadt Würzburg. Online verfügbar unter <https://www.wuerzburg.de/themen/umwelt-klima/klimaundenergie/klimaanpassung-und-wetterextreme/stadtentwicklung-bauleitplanung/412831.Klimaanalysen-fuer-die-Stadt-Wuerzburg.html>, zuletzt aktualisiert am 07.06.2024, zuletzt geprüft am 07.06.2024.

Calcerano, Filippo; Martinelli, Letizia (2016): Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. In: *Energy and Buildings* 112, S. 234–243. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.12.023.

Deutscher Wetterdienst: Basisfakten zum Klimawandel. Klimawandel - ein Überblick. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Deutscher Wetterdienst (2022): Erläuterungen zur Verdunstung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/basis_verdunstung_doku.html?nn=782168&lsbld=510228, zuletzt aktualisiert am 05.06.2024, zuletzt geprüft am 05.06.2024.

Deutscher Wetterdienst (2024a): Wetter- und Klimalexikon. Luftdichte. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=607748&lv2=101518>, zuletzt aktualisiert am 07.06.2024, zuletzt geprüft am 07.06.2024.

Deutscher Wetterdienst (2024b): Wetter- und Klimalexikon. Stadtklima. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102558&lv2=102248>, zuletzt aktualisiert am 23.03.2024, zuletzt geprüft am 23.03.2024.

Die Bundesregierung (Hg.) (2020): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1873516/9d73d857a3f7f0f8df5ac1b4c349fa07/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-barrierefrei-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 11.04.2024.

Doblas-Reyes, Francisco J.; Sörensson, Anna A.; Almazroui, Mansour; Dosio, Alessandro; Gutowski, William J.; Haarsma, Rein et al.: Linking Global to Regional Climate Change. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou. In: *Climate Change 2021*, S. 1363–1512. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-10/faq-10-2-figure-1>, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Donovan, Geoffrey H.; Butry, David T. (2009): The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use. In: *Energy and Buildings* 41 (6), S. 662–668. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.01.002.

Erell, Evyatar; Zhou, Bin (2022): The effect of increasing surface cover vegetation on urban microclimate and energy demand for building heating and cooling. In: *Building and Environment*. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.108867.

Feldmann, Falko; Quambusch, Mona; Langenbrinck, Gregor; Ammon, Inken (2023): Stadtgrün wirkt! Aspekte der Pflanzenauswahl für eine leistungsfähige Vegetation für Klimaanpassung und Klimaschutz in der Stadt. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2023/stadtgruen-wirkt-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 12.04.2024.

GALK e.V. (Hg.): Straßenbaumliste. Online verfügbar unter <https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>, zuletzt geprüft am 26.04.2024.

Hasel, Markus; Gronemeier, Tobias; Ketterer, Christine; Röckle, Rainer (2022): Stadtklimaanalyse für die Stadt Asperg. Online verfügbar unter <https://www.asperg.de/fileadmin/Dateien/Dateien/Stadtklimaanalyse.pdf>, zuletzt geprüft am 18.04.2024.

Icha, Petra; Lauf, Thomas (2023): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommixes in den Jahren 1990 - 2022. Unter Mitarbeit von Gunther Kuhs. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2024.

infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2018): Mobilität in Deutschland 2017 - Ergebnisbericht. Online verfügbar unter

<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid->

[ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 28.04.2024.

Kampusch, Verena (2018): Grün findet Stadt. Potentiale und Barrieren für grüne Infrastruktur in urbanen Gebieten am Beispiel von Wien. Masterarbeit. Technische Universität Wien, Wien. Online verfügbar unter <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/7343/2/Kampusch%20Verena%20-%202018%20-%20Gruen%20findet%20Stadt%20-%20Potentiale%20und%20Barrieren%20fuer...pdf>, zuletzt geprüft am 10.04.2024.

Kreienkamp, Frank; Frph, Barbara; Kotlarski, Sven; Linke, Carsten; Olefs, Marc; Schauser, Inke et al. (2022): Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter Klimaszenarien. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/szenariennamen-stand_20220315.pdf, zuletzt geprüft am 15.06.2024.

Lee, Hoesung; Calvin, Katherine; Dasgupta, Dipak; Krinner, Gerhard; Mukherji, Aditi; Thorne, Peter W. et al. (2023): Climate Change 2023. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 6. Aufl. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Lösken, Gilbert; Bauer, Joachim; Bott, Peter; Braam, Tom; Dolze, Falk; König, Peter et al. (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2. Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. 2. Aufl. Hg. v. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. – FLL.

Mehra, Schew-Ram (2021): Städtische Atmosphäre und Stadtklima. In: Schew-Ram Mehra (Hg.): Stadtbauphysik. Grundlagen klima- und umweltgerechter Städte. 1st ed. 2021. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, S. 71–149. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-30449-2_5.

Menges, Karin; Heitzmann, Julien; Gierl, Fabian (2023): CGSC Mobilität Vorstellung D&S, 07.03.2023.

Menges, Karin; Heitzmann, Julien; Gierl, Fabian (2024a): Verkehrsmittelwahl, Modal Split, 08.01.2024.

Menges, Karin; Heitzmann, Julien; Gierl, Fabian (2024b): Einteilung Querschnitte je Quartiersarchetyp, 28.04.2024.

Moss, Joseph L.; Doick, Kieron J.; Smith, Stefan; Shahrestani, Mehdi (2019): Influence of evaporative cooling by urban forests on cooling demand in cities. In: *Urban Forestry & Urban Greening*, S. 65–73. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.07.023.

Paschotta, Rüdiger (2023): Wärmekapazität. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/waermekapazitaet.html>, zuletzt aktualisiert am 07.06.2024, zuletzt geprüft am 07.06.2024.

Reicher Haase Assoziierte GmbH (2022): ISEK Grombühl. Endbericht. integriertes städtebauliches Entwicklungskonzept. Hg. v. Stadt Würzburg. Online verfügbar unter <https://www.wuerzburg.de/themen/bauen->

planen/stadtplanung/stadtentwicklung/stadtteilkonzepte/m_577927, zuletzt geprüft am 10.04.2024.

Revi, Aromar; Satterthwaite, David E.; Aragón-Durand, Fernando; Corfee-Morlot, Jan; Kiunsi, Robert B.R.; Pelling, Mark et al. (2015): Urban Areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter https://ar5-syr.ipcc.ch/resources/htmlpdf/WGIIAR5-Chap8_FINAL/#pf10, zuletzt geprüft am 21.05.2024.

Schwaab, Jonas; Meier, Ronny; Mussetti, Gianluca; Seneviratne, Sonia; Bürgi, Christine; Davin, Edouard L. (2021): The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. In: *Nat Commun* 12 (1), S. 6763. DOI: 10.1038/s41467-021-26768-w.

Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH (Hg.) (2024): Was sind die Sinus-Milieus? Online verfügbar unter <https://www.sinus-institut.de/sinus-milieus>, zuletzt geprüft am 14.04.2024.

Tipler, Paul A.; Mosca, Gene (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Unter Mitarbeit von Christoph Kommer. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

United Nations (Hg.) (2016): Neue Urbane Agenda. Online verfügbar unter <https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-German.pdf>, zuletzt geprüft am 11.04.2024.

United Nations (Hg.) (2024): The 17 Goals. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/goals>, zuletzt aktualisiert am 24.03.2024.

Wolf Kältetechnik GmbH (Hg.) (2024): Was sagt der COP Wert bei einer Klimaanlage aus? Online verfügbar unter <https://www.kaeltewolf.de/was-sagt-der-cop-wert-bei-einer-klimaanlage-aus.html>, zuletzt aktualisiert am 22.05.2024, zuletzt geprüft am 15.06.2024.

World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, zuletzt geprüft am 03.04.2024.

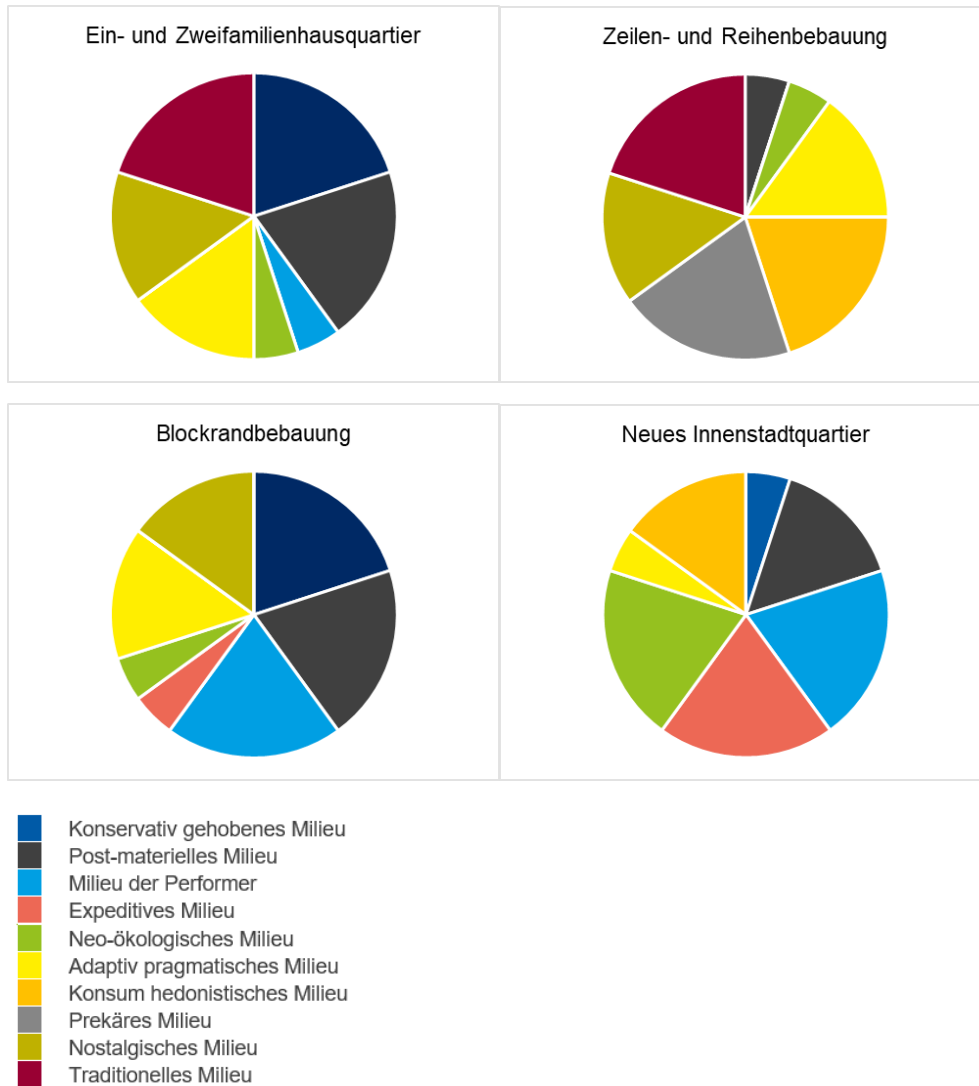
Zhang, Jiahua; Bai, Yun; Yan, Hao; Guo, Huadong; Yang, Shanshan; Wang, Jinwen (2020): Linking observation, modelling and satellite-based estimation of global land evapotranspiration. In: *Big Earth Data* 4 (2), S. 94–127. DOI: 10.1080/20964471.2020.1743612.

Anhang

1	Prozentuale Verteilung der Sinus-Milieus in den vier Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier (Datengrundlage Drees & Sommer)	63
2	Darstellung des Modalsplits nach verschiedenen Kriterien	64
2.1	Modal Split des konservativ-gehobenen (oben links), des prekären (unten links) und des neo-ökologischen (oben rechts) Milieus	64
2.2	Darstellung des Modal Splits in den vier Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier (Legende siehe oben)	64
2.3	Lagespezifischer Modal Split in den Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier.....	65
3	Flächenbilanz Grombühl (eigene Darstellung, Datengrundlage Stadt Würzburg). 65	
4	Zuordnung der Straßenquerschnitte zu den Quartiersarchetypen in den Fallstudiengengebieten (Datengrundlage: RAS 06 und Drees & Sommer)	66
5	Zunahme des Grünanteils.....	67
5.1	Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt I (Datengrundlage: eigene Berechnungen).....	67
5.2	Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt III (Datengrundlage: eigene Berechnungen).....	67
5.3	Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt IV (Datengrundlage: eigene Berechnungen).....	67
5.4	Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt V (Datengrundlage: eigene Berechnungen).....	67
6	Heiz- und Kühlbedarfe	68
6.1	Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt II..	68
6.2	Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt III.	68
6.3	Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt IV	69
6.4	Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt V .	70
7	Zunahme der Evapotranspiration.....	71
7.1	Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt II.....	71
7.2	Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt III.....	71
7.3	Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben), Szenario C (mitte) und Szenario D (unten) in Gebietsausschnitt II	72
7.4	Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben) und Szenario E (unten) in Gebietsausschnitt III.....	73

7.5	Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt IV	74
7.6	Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt V	74
7.7	Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben), Szenario F (mitte) und Szenario G (unten) in Gebietsausschnitt IV	75
7.8	Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben) und das Szenario H (unten) in Gebietsausschnitt V	76
8	Temperaturänderung durch Evapotranspiration	77
8.1	Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt II	77
8.2	Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt III	77
8.3	Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben), das Szenario C (mitte) und das Szenario D (unten) in Gebietsausschnitt II	78
8.4	Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben) und das Szenario E (unten) in Gebietsausschnitt III	79
8.5	Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt IV	80
8.6	Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt V	80
8.7	Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben), das Szenario F (mitte) und das Szenario G (unten) in Gebietsausschnitt IV	81
8.8	Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben) das Szenario H (unten) in Gebietsausschnitt V	82
9	Zusammenhänge meteorologische Daten und Evapotranspiration	83
9.1	Stündliche Evapotranspirationsrate des Acer Platanoides und die stündliche Lufttemperatur	83
9.2	Stündliche Evapotranspirationsrate des Acer Platanoides und die stündliche Niederschlagsmenge	83
9.3	Summe der täglichen Evapotranspiration des Acer Platanoides und die tägliche Globalstrahlung	84
8.3	Stündliche Evapotranspirationsrate des Acer Platanoides und die stündlich fehlende Wassermenge	84

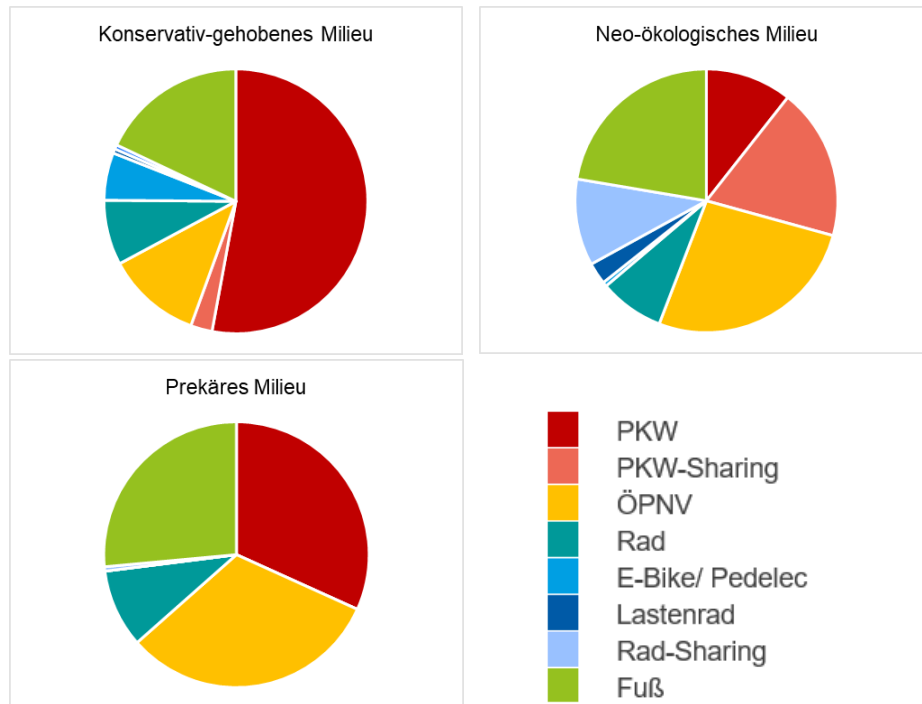
- 1 Prozentuale Verteilung der Sinus-Milieus in den vier Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier (Datengrundlage Drees & Sommer)



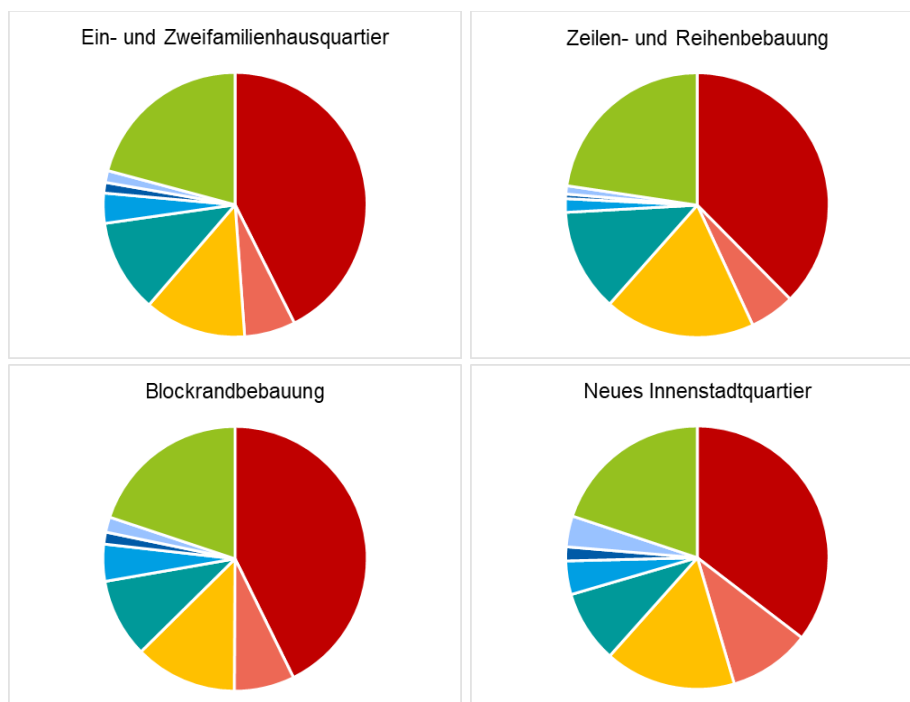
2 Darstellung des Modalsplits nach verschiedenen Kriterien

Die Datengrundlage für die Darstellungen des Modal Splits nach Sinus Milieu (Anhang 2.1), Quartiersarchetyp (Anhang 2.2) und Lage (Anhang 2.3) sind die Analysen von Drees & Sommer (vgl. Menges et al. 2024a).

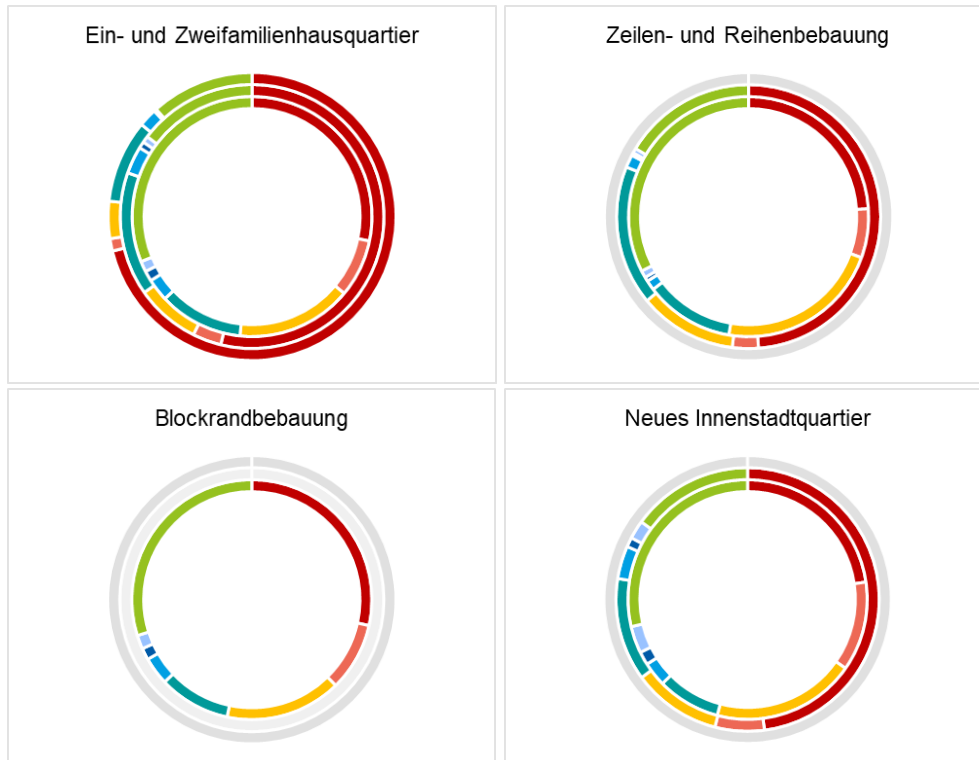
2.1 Modal Split des konservativ-gehobenen (oben links), des prekären (unten links) und des neo-ökologischen (oben rechts) Milieus



2.2 Darstellung des Modal Splits in den vier Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier (Legende siehe oben)

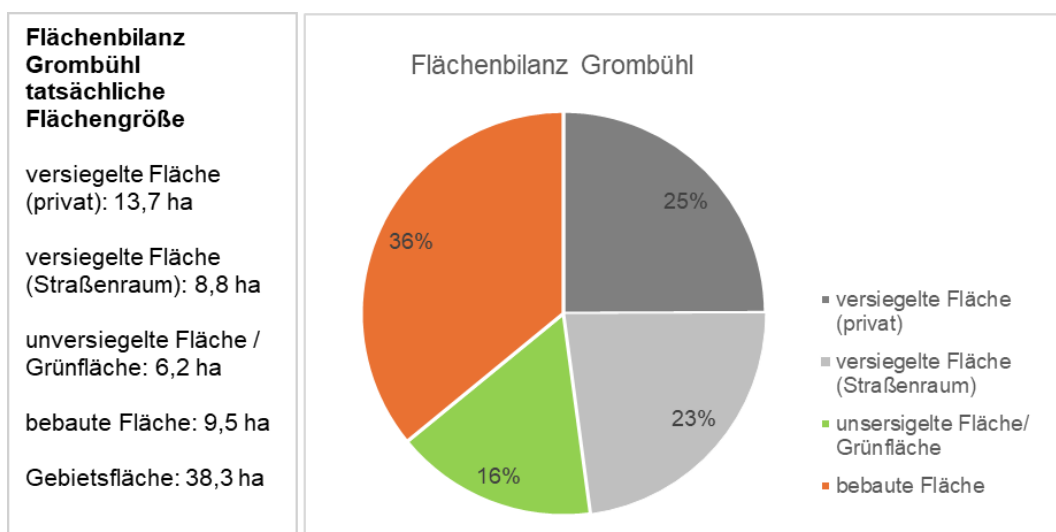


2.3 Lagespezifischer Modal Split in den Quartiersarchetypen Ein- und Zweifamilienhausquartier, Zeilen- und Reihenbebauung, Blockrandbebauung und neues Innenstadtquartier

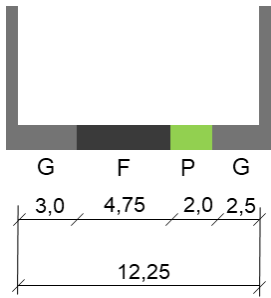
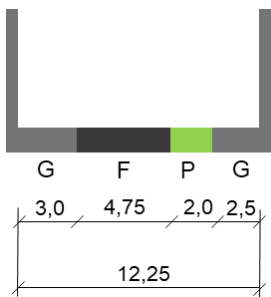
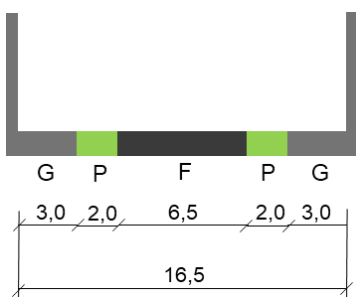
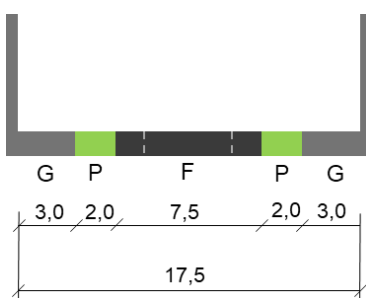


innerer Kreis = zentrale Lage, mittlerer Kreis = periphere Lage, äußerer Kreis = ländliche Lage
(Legende siehe oben)

3 Flächenbilanz Grombühl (eigene Darstellung, Datengrundlage Stadt Würzburg)



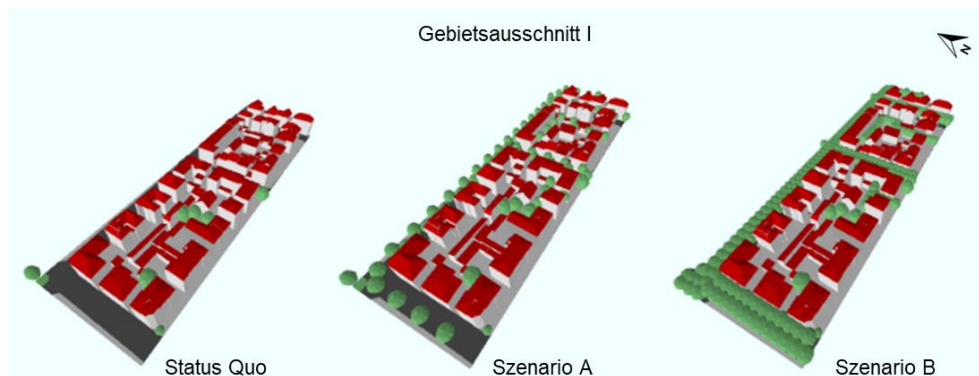
4 Zuordnung der Straßenquerschnitte zu den Quartiersarchetypen in den Fallstudiengebieten (Datengrundlage: RASSt 06 und Drees & Sommer)

Quartiers-archetyp	Straßenquerschnitt nach RASSt 06 (Angaben in m)	Potentialfläche je Mobilitätszenario
Ein- und Zweifamilien- hausquartier	2.5 Wohnstraße 	Szenario 1: 0,5 % Szenario 2: 1,6 % Szenario 3: 3,3 %
Neues Innenstadt- quartier	2.5 Wohnstraße 	Szenario 1: 0,5 % Szenario 2: 1,6 % Szenario 3: 3,3 %
Blockrand- bebauung	4.3 Quartierstraße 	Szenario 1: 0,73 % Szenario 2: 2,4 % Szenario 3: 4,9 %
Zeilen- und Reihen- bebauung	3.5 Sammelstraße 	Szenario 1: 0,69 % Szenario 2: 2,3 % Szenario 3: 4,6 %

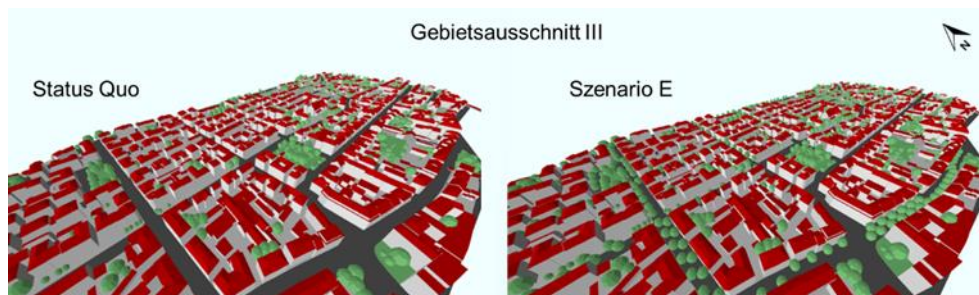
G = Gehweg | P = Parkfläche | F = Fahrbahn

5 Zunahme des Grünanteils

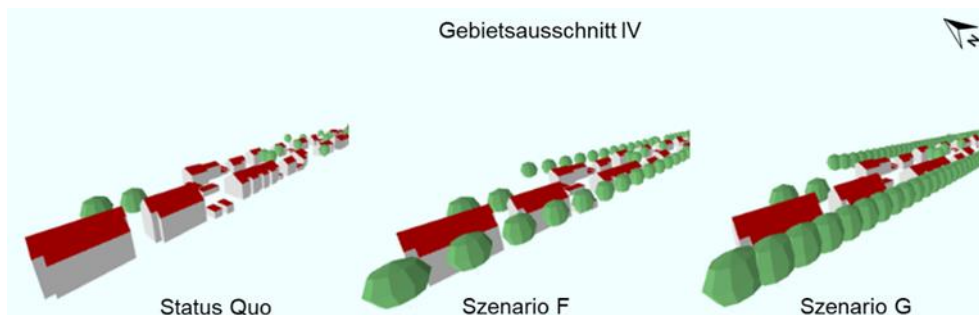
5.1 Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt I (Datengrundlage: eigene Berechnungen)



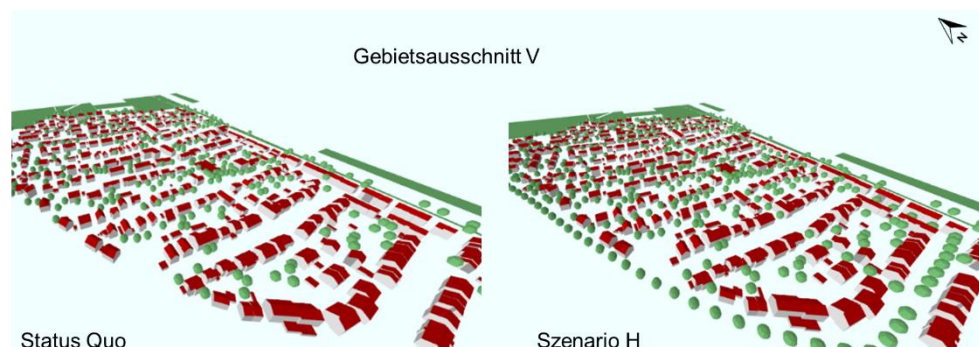
5.2 Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt III (Datengrundlage: eigene Berechnungen)



5.3 Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt IV (Datengrundlage: eigene Berechnungen)



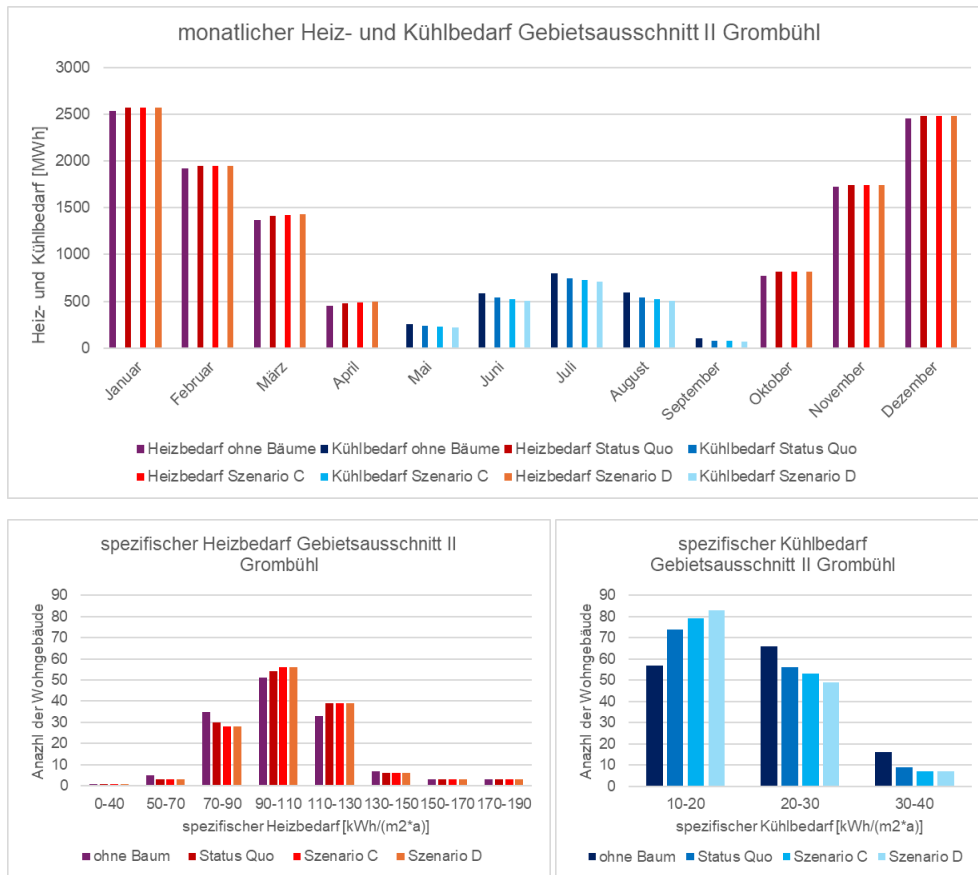
5.4 Zunahme des Grünanteils im Gebietsausschnitt V (Datengrundlage: eigene Berechnungen)



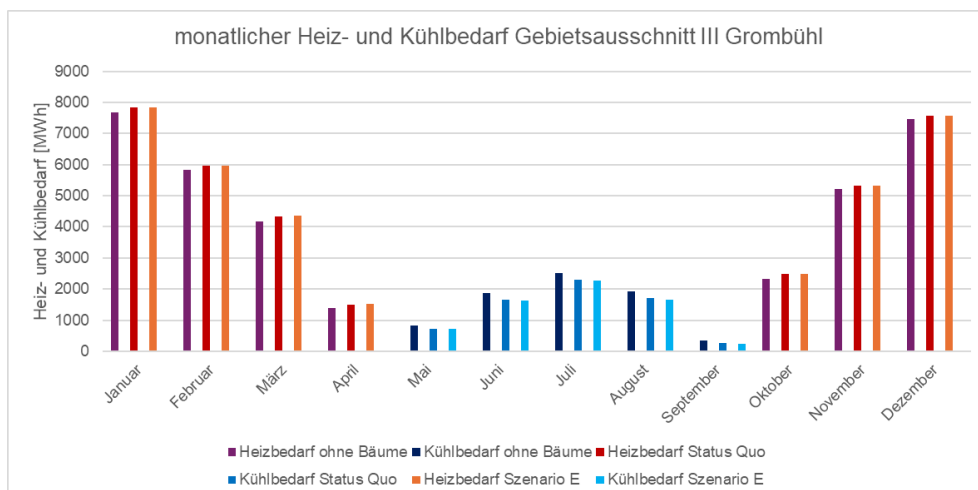
6 Heiz- und Kühlbedarfe

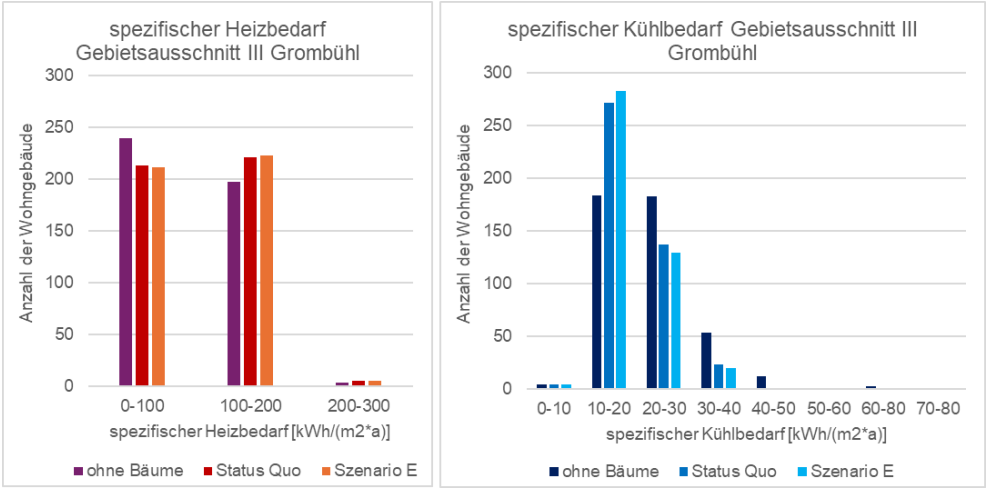
Die Datengrundlage der in diesem Kapitel dargestellten Diagramme sind die Simulationsergebnisse aus dem Tool SimStadt sowie die auf diesen aufbauenden eigenen Berechnungen. Für die Gebietsausschnitte II – V ist der monatliche sowie der spezifische Heiz- und Kühlbedarf für die Simulation ohne Baumverschattung, sowie den Status Quo und die jeweiligen Szenarien des Gebietsausschnitts mit Verschattungseffekt dargestellt.

6.1 Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt II

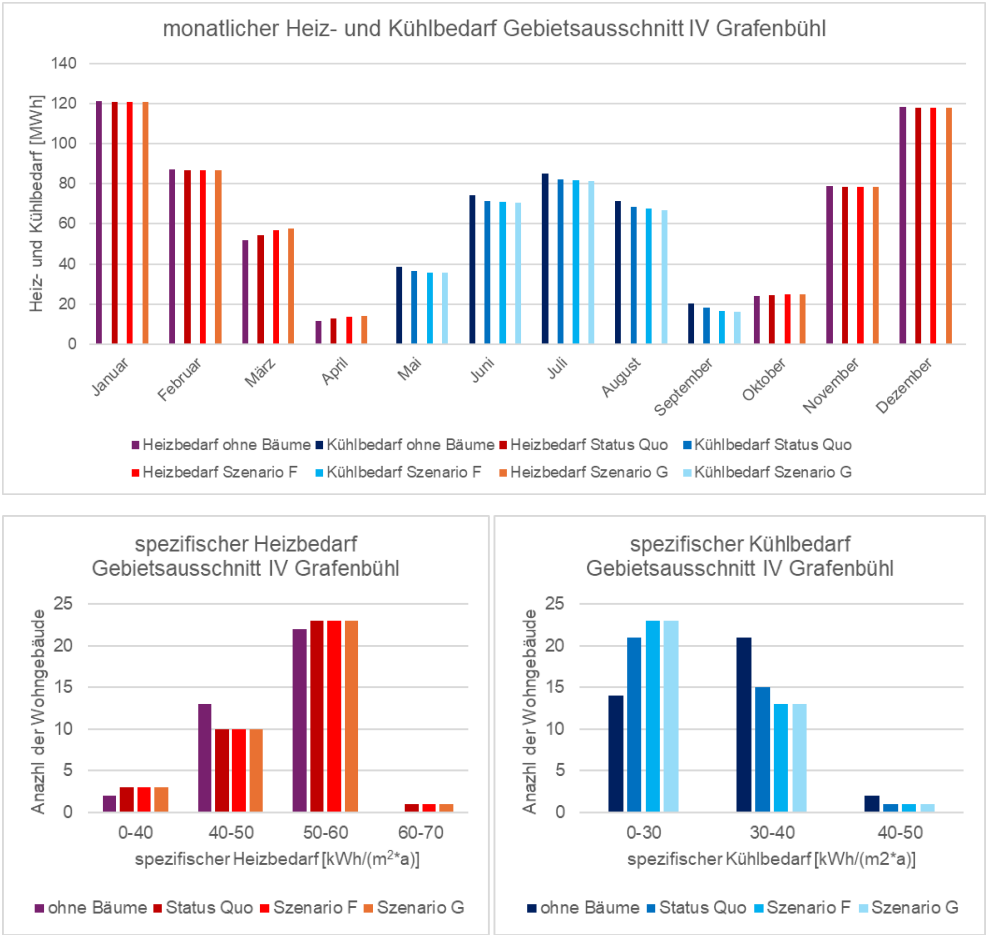


6.2 Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt III

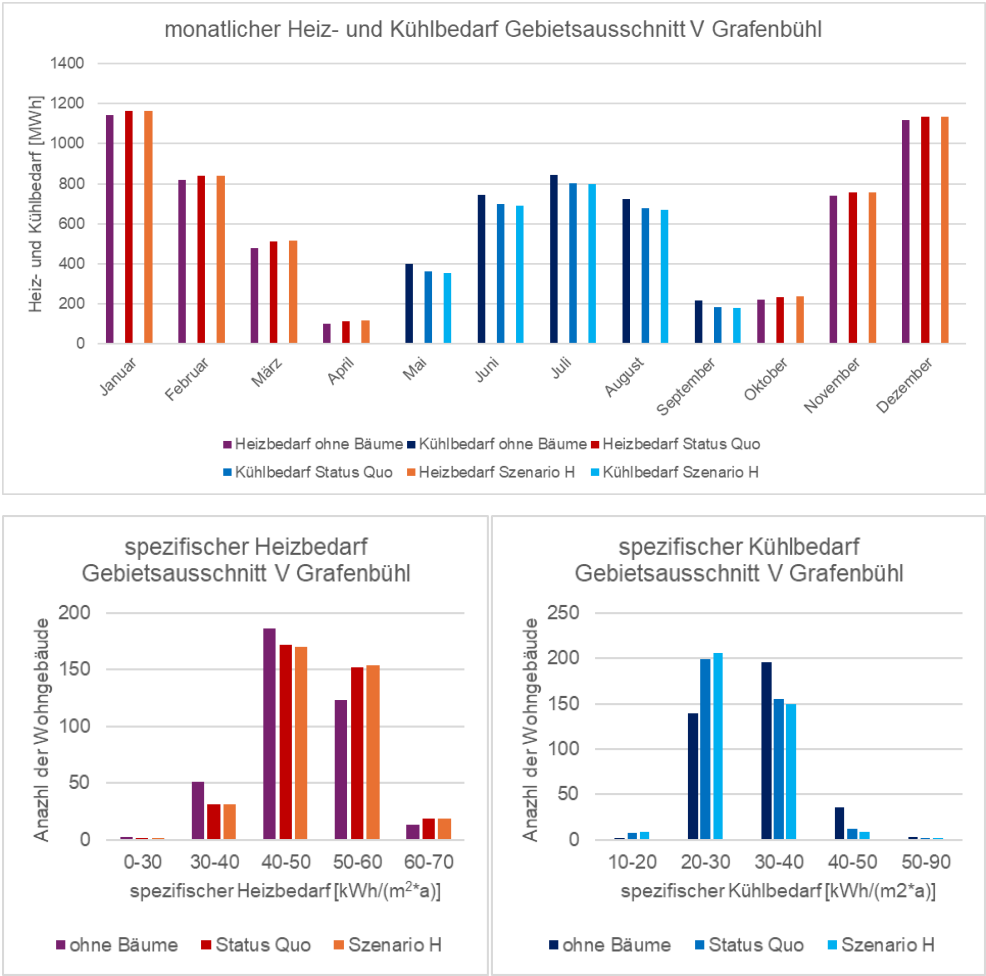




6.3 Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt IV



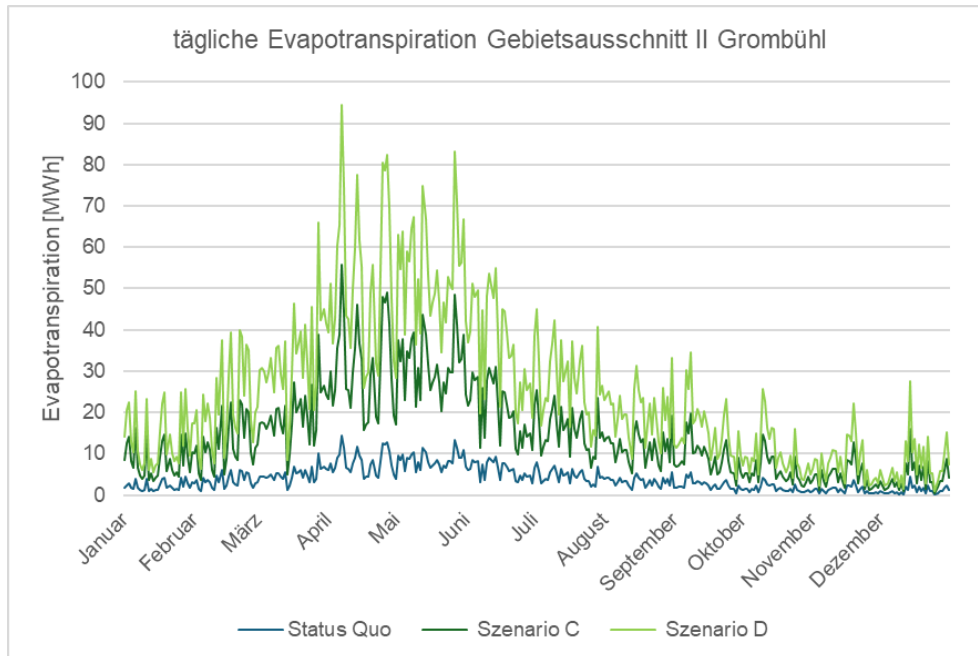
6.4 Monatlicher und spezifischer Heiz- und Kühlbedarf im Gebietsausschnitt V



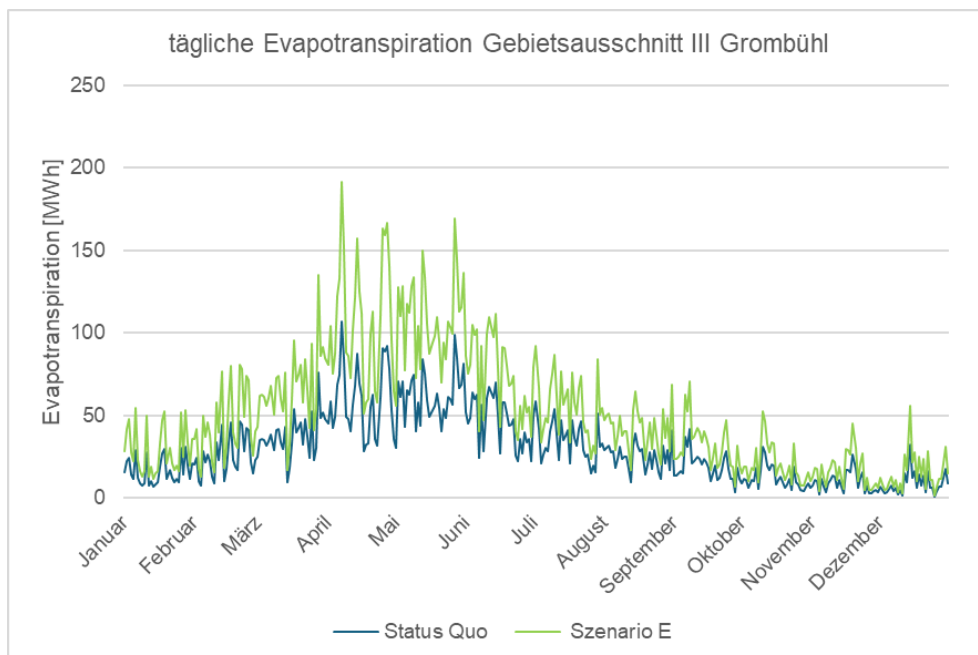
7 Zunahme der Evapotranspiration

Die Datengrundlage der in diesem Kapitel dargestellten Diagramme sind die Simulationsergebnisse aus dem Tool SimStadt und die auf diesen aufbauenden eigenen Berechnungen. Für die Gebietsausschnitte II – V ist die Evapotranspiration dargestellt.

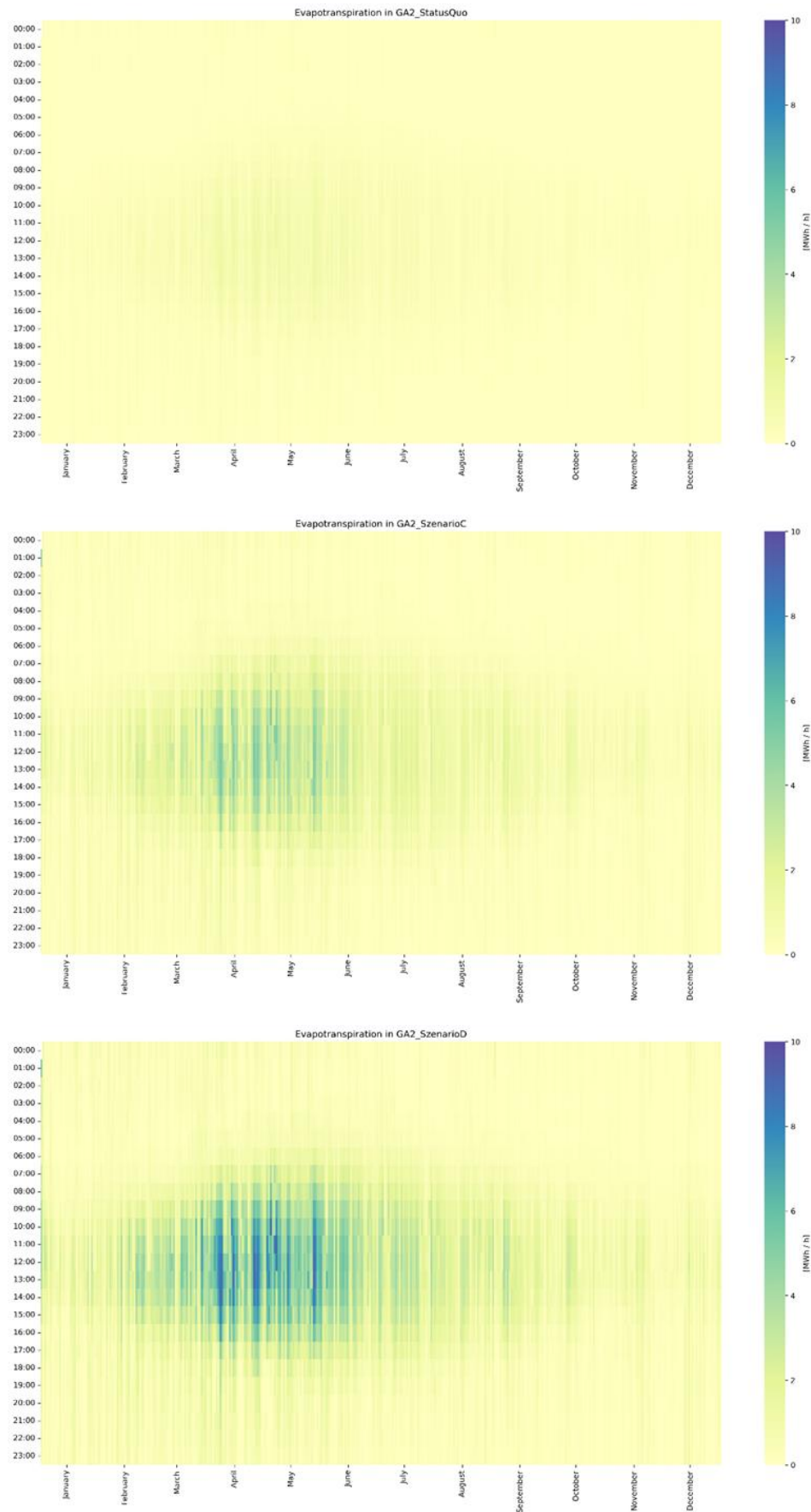
7.1 Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt II



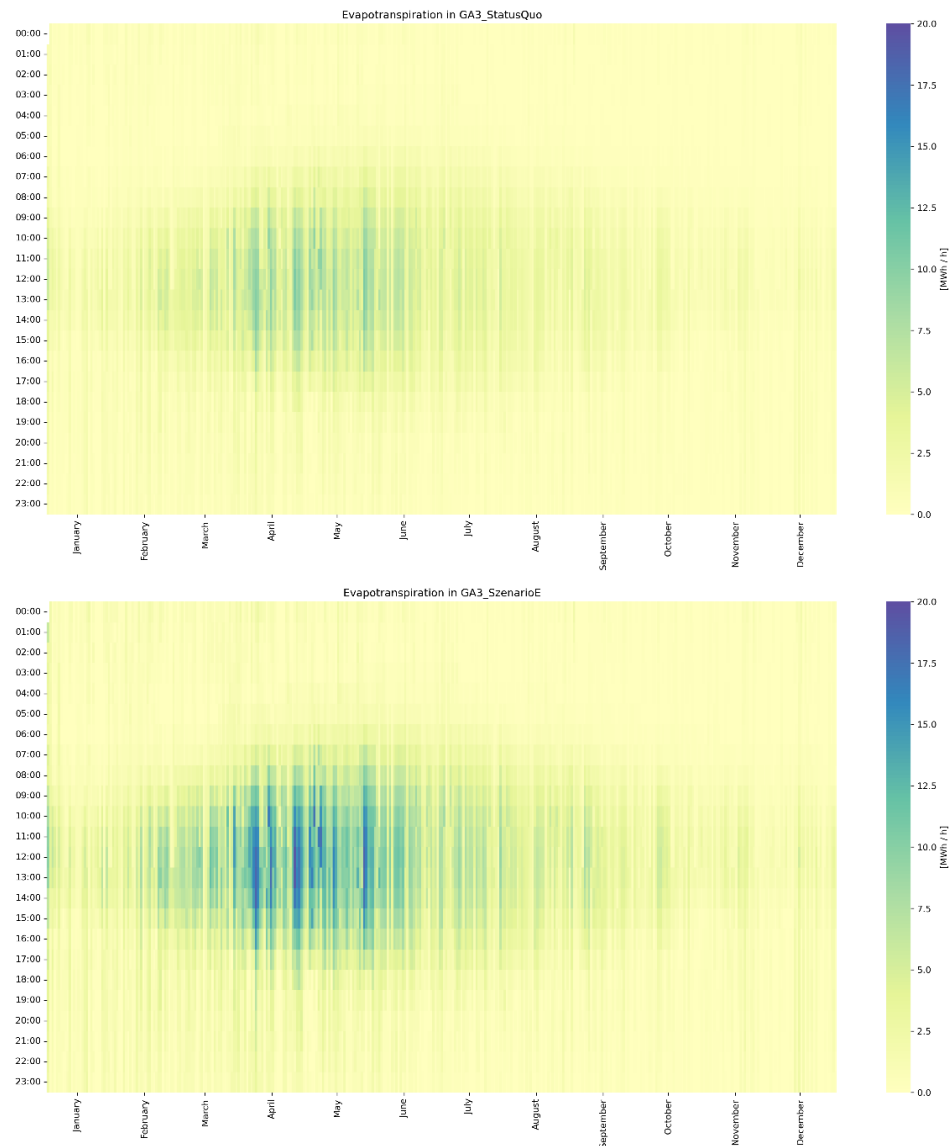
7.2 Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt III



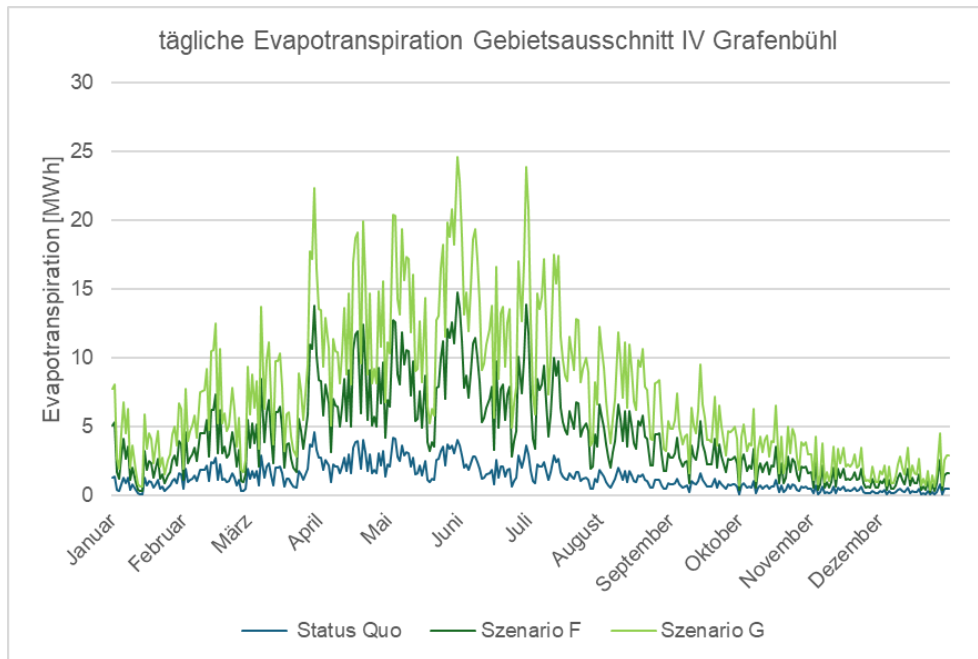
7.3 Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben), Szenario C (mitte) und Szenario D (unten) in Gebietsausschnitt II



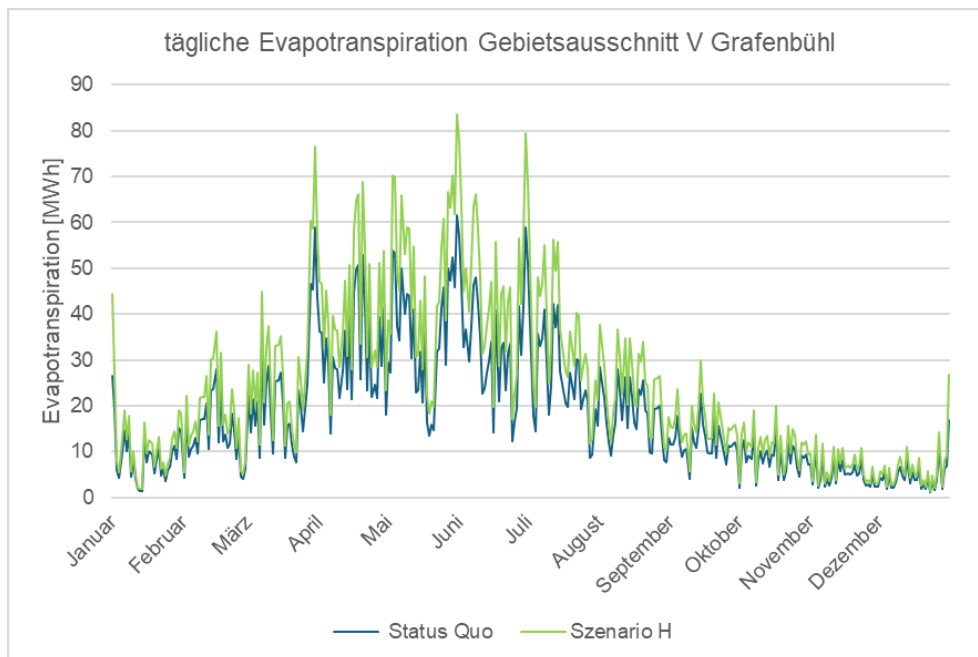
7.4 Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben) und Szenario E (unten) in Gebietsausschnitt III



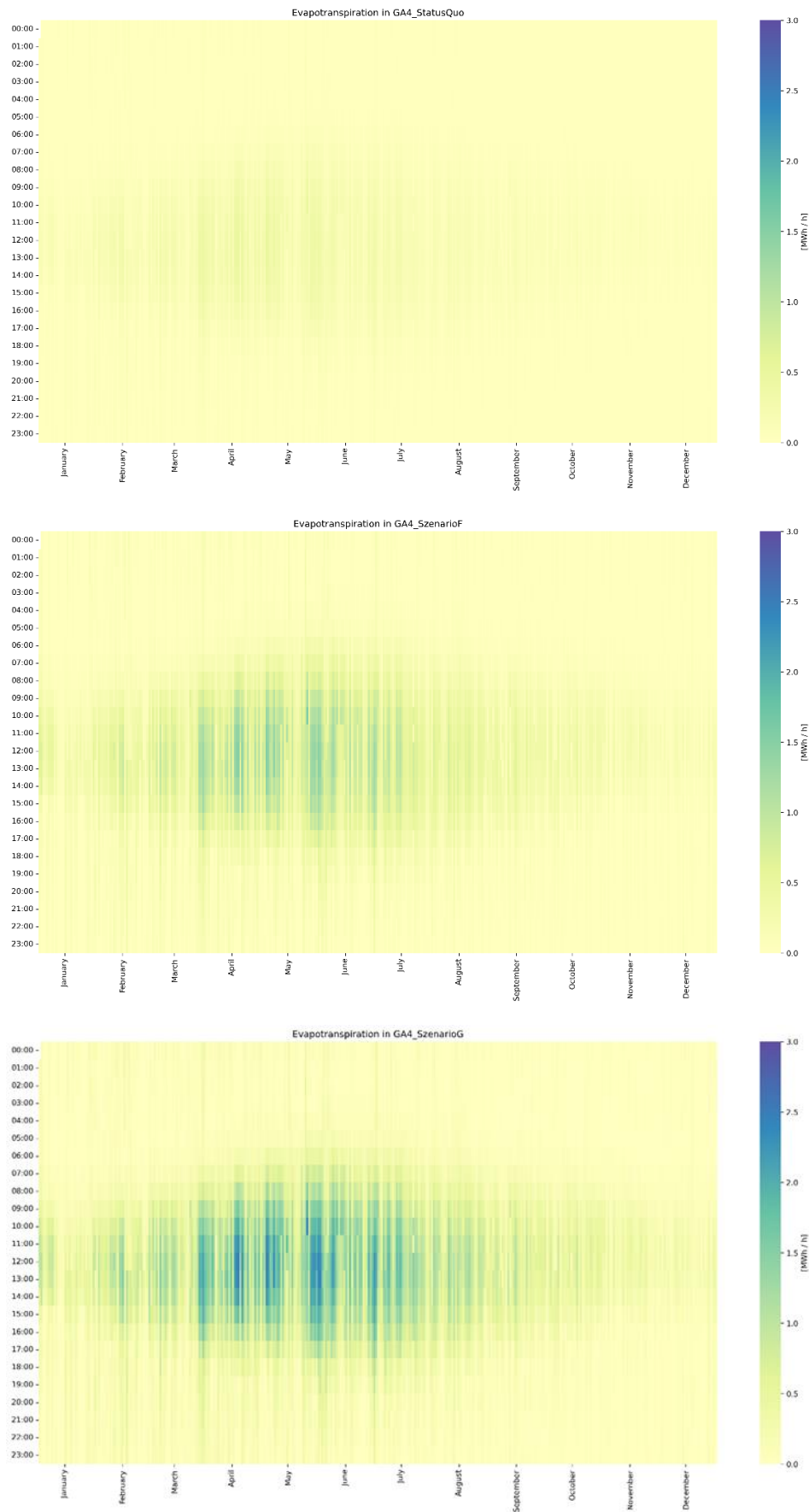
7.5 Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt IV



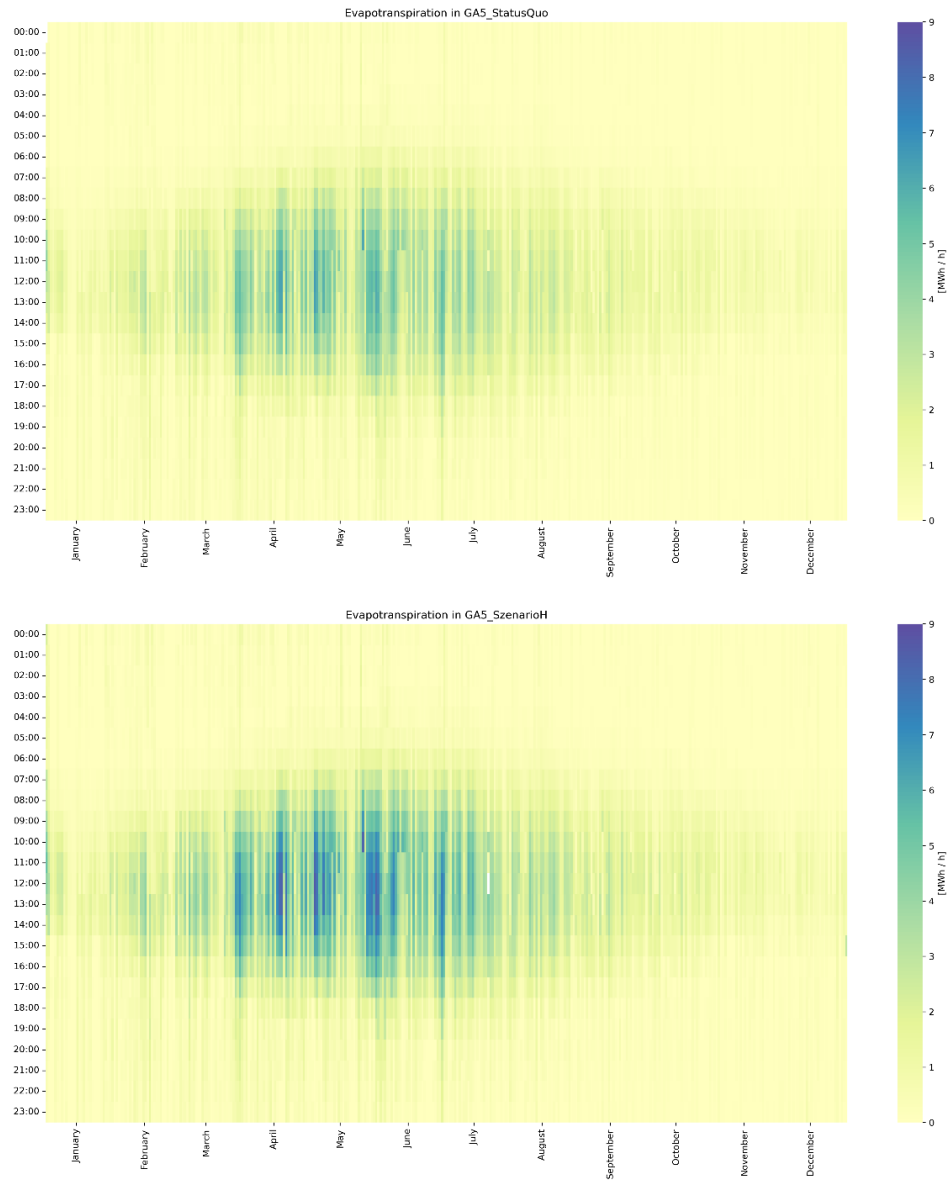
7.6 Summe der täglichen Evapotranspiration in Gebietsausschnitt V



7.7 Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben), Szenario F (mitte) und Szenario G (unten) in Gebietsausschnitt IV



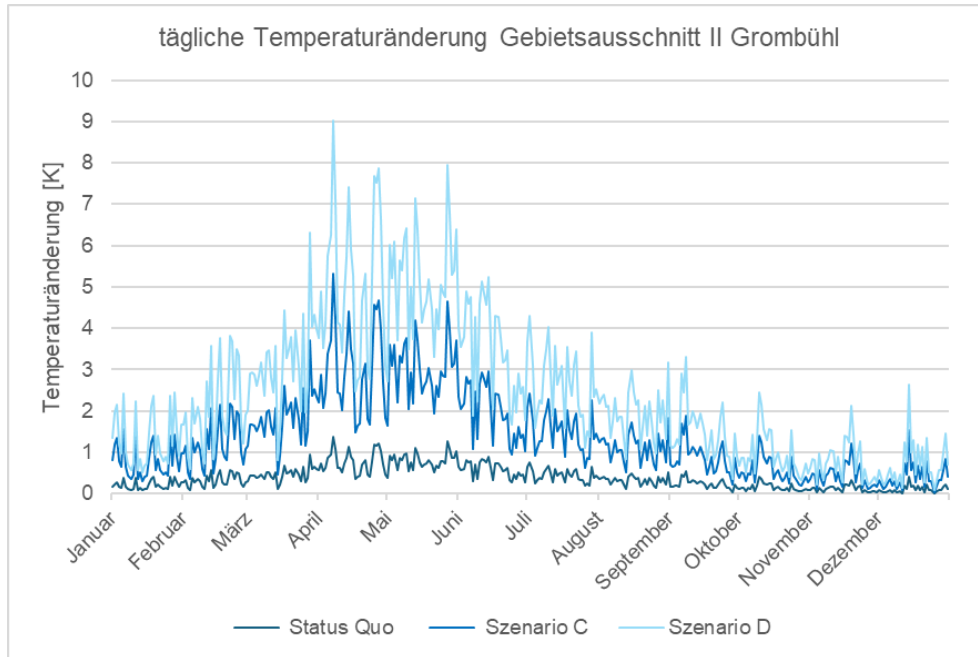
7.8 Stündliche Evapotranspiration eines Jahres für den Status Quo (oben) und das Szenario H (unten) in Gebietsausschnitt V



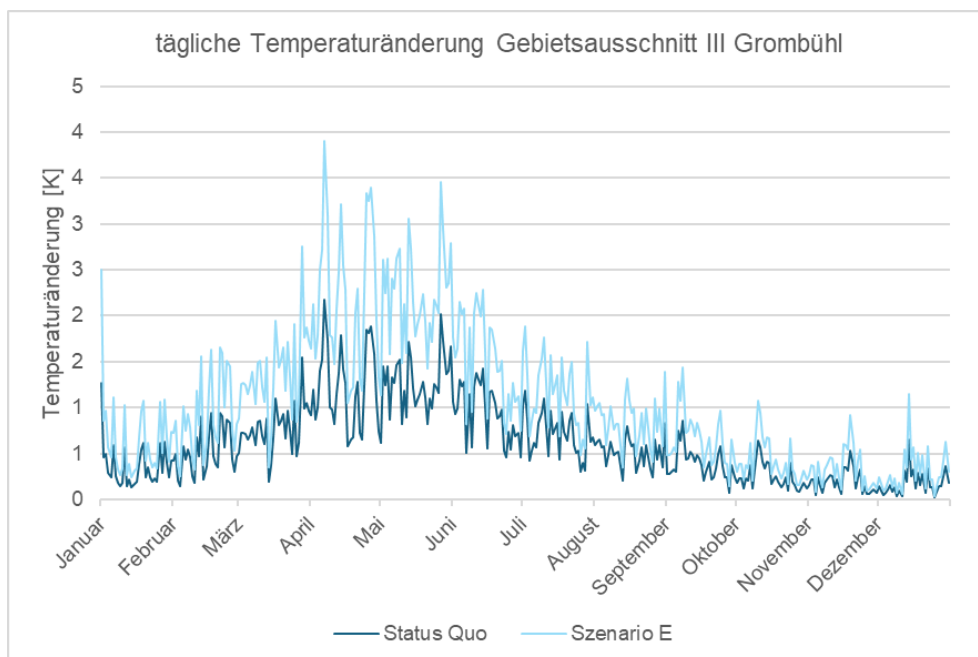
8 Temperaturänderung durch Evapotranspiration

Die Datengrundlage der in diesem Kapitel dargestellten Diagramme sind die Simulationsergebnisse aus dem Tool SimStadt und die auf diesen aufbauenden eigenen Berechnungen. Für die Gebietsausschnitte II – V ist die mögliche Temperaturänderung durch Evapotranspiration dargestellt

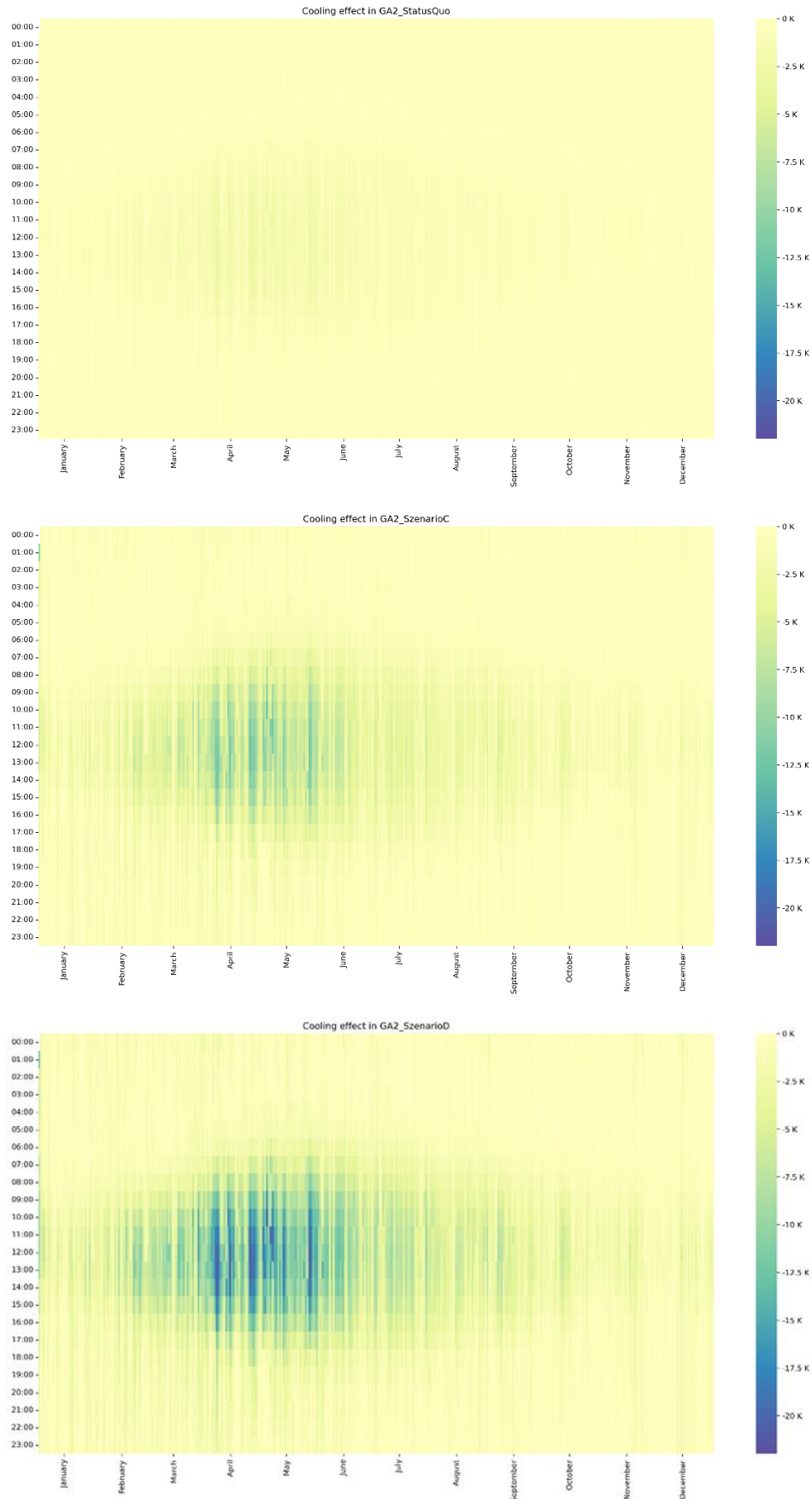
8.1 Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt II



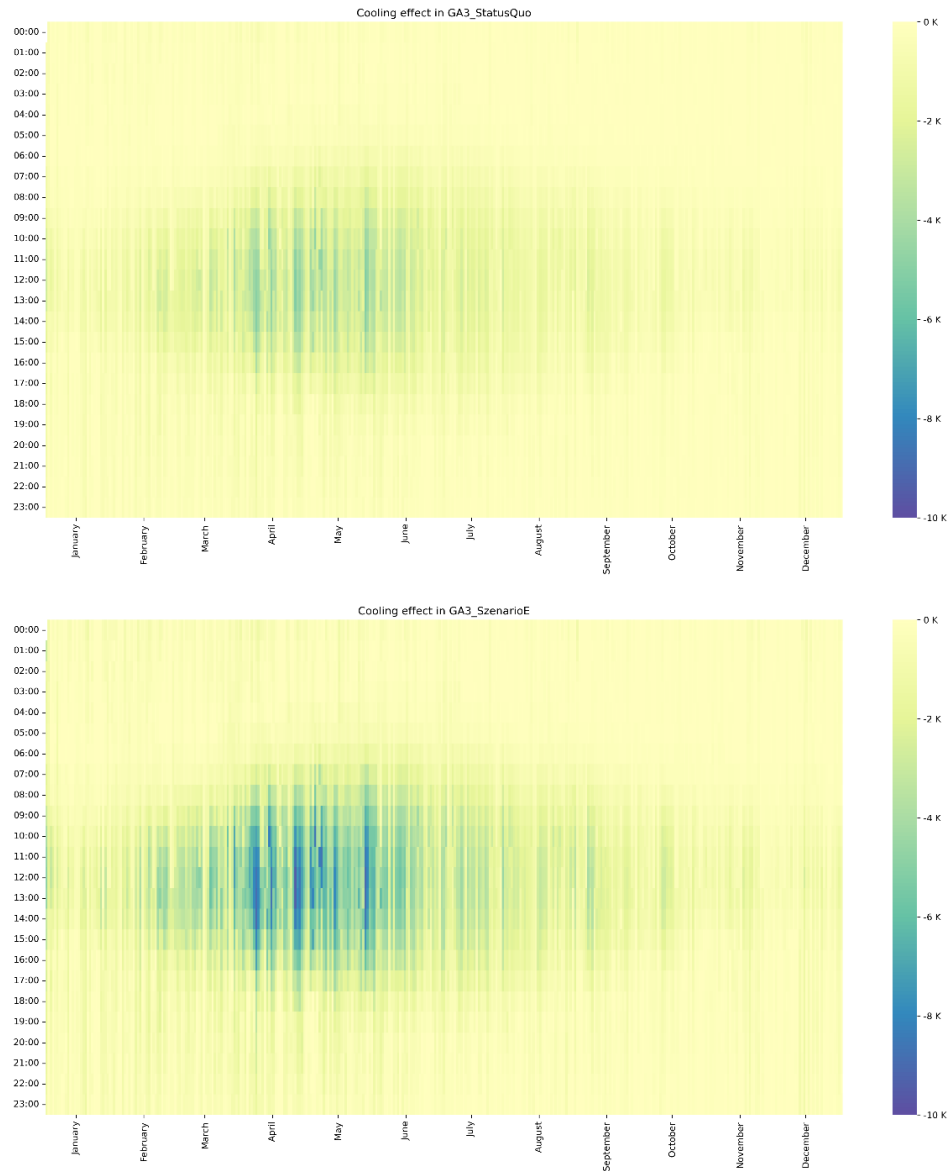
8.2 Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt III



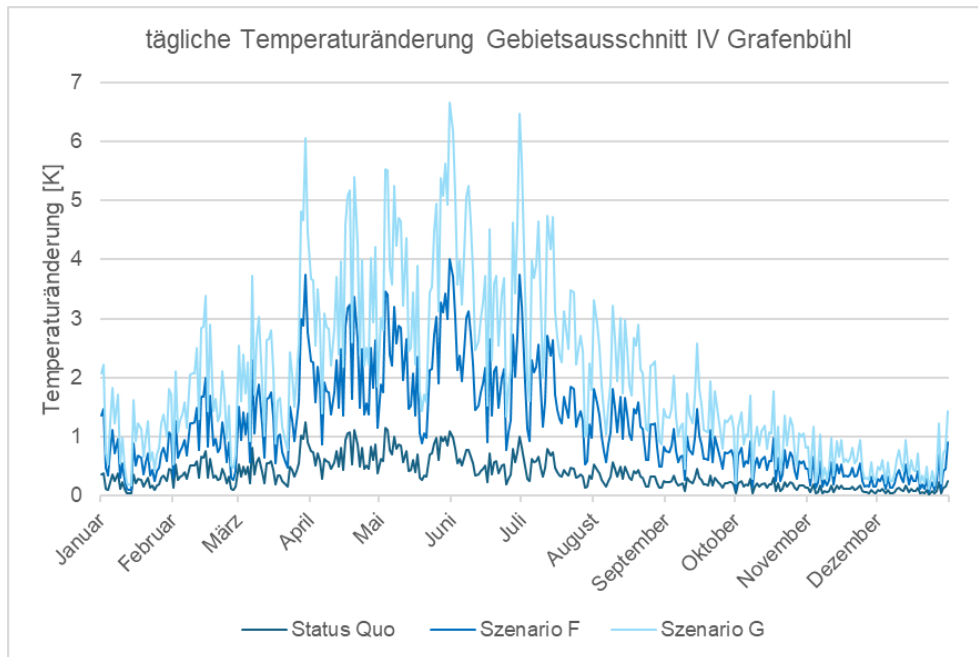
8.3 Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben), das Szenario C (mitte) und das Szenario D (unten) in Gebietsausschnitt II



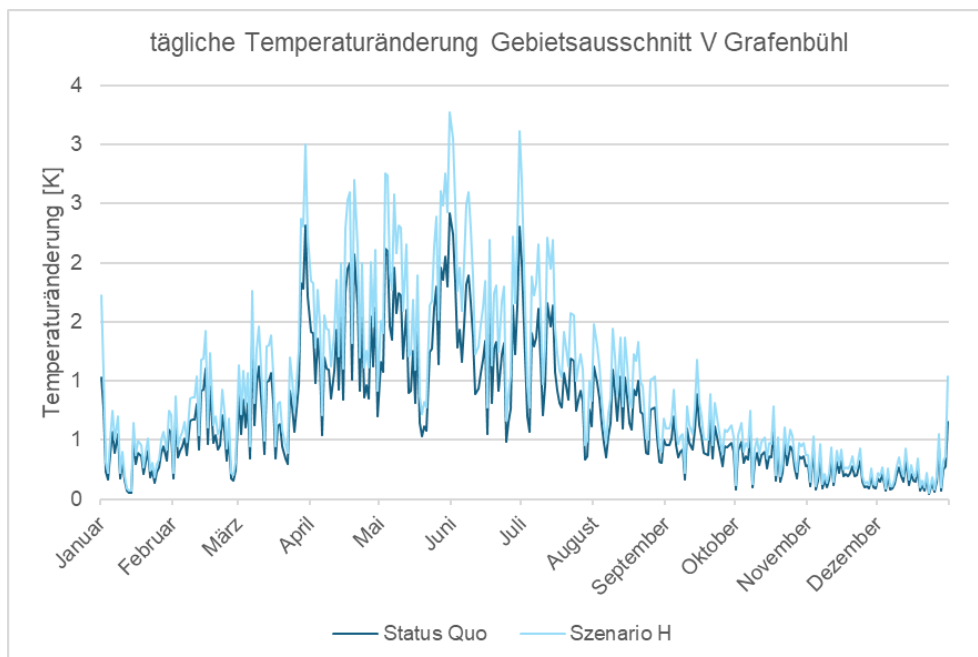
8.4 Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben) und das Szenario E (unten) in Gebietsausschnitt III



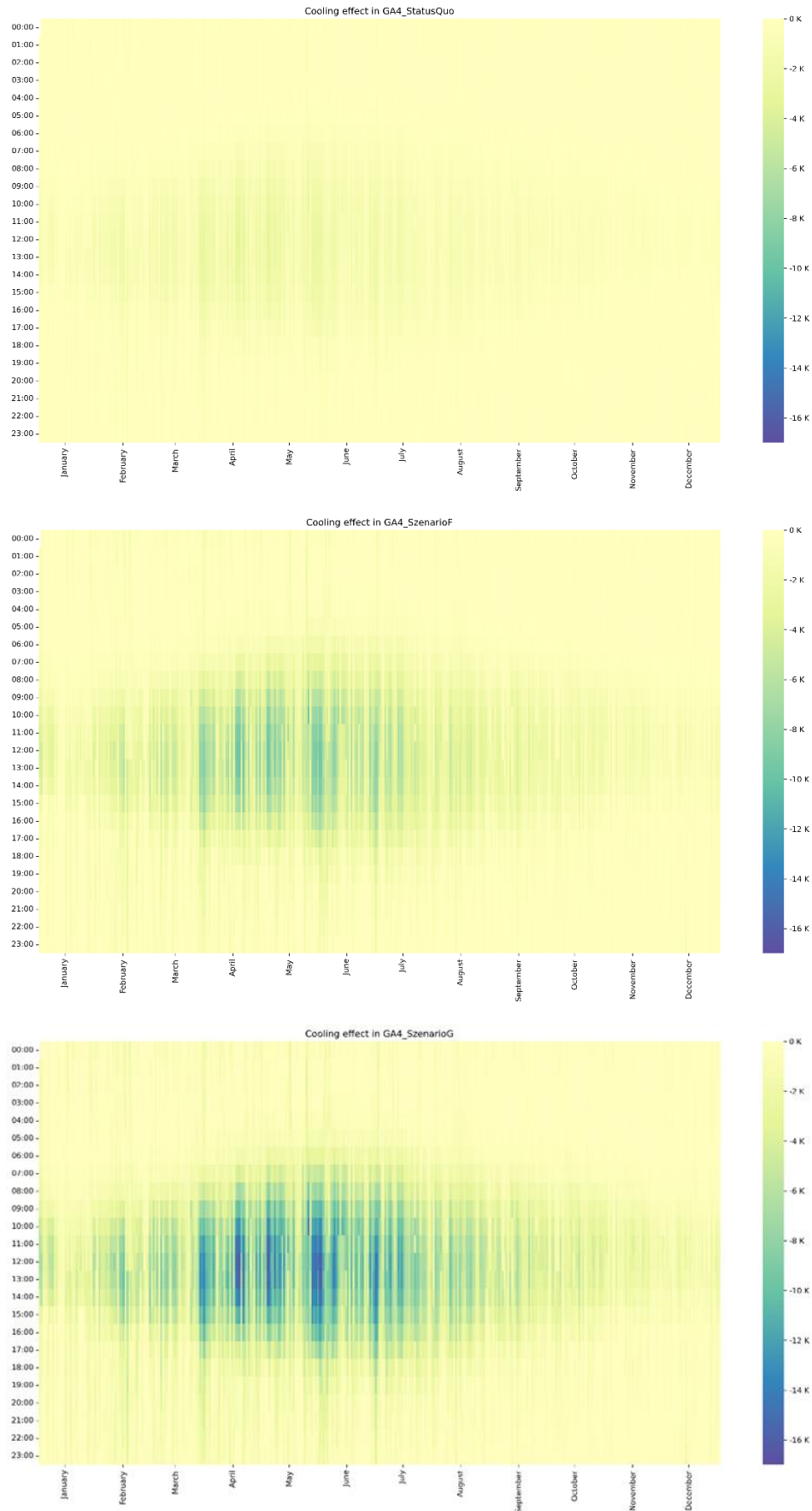
8.5 Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt IV



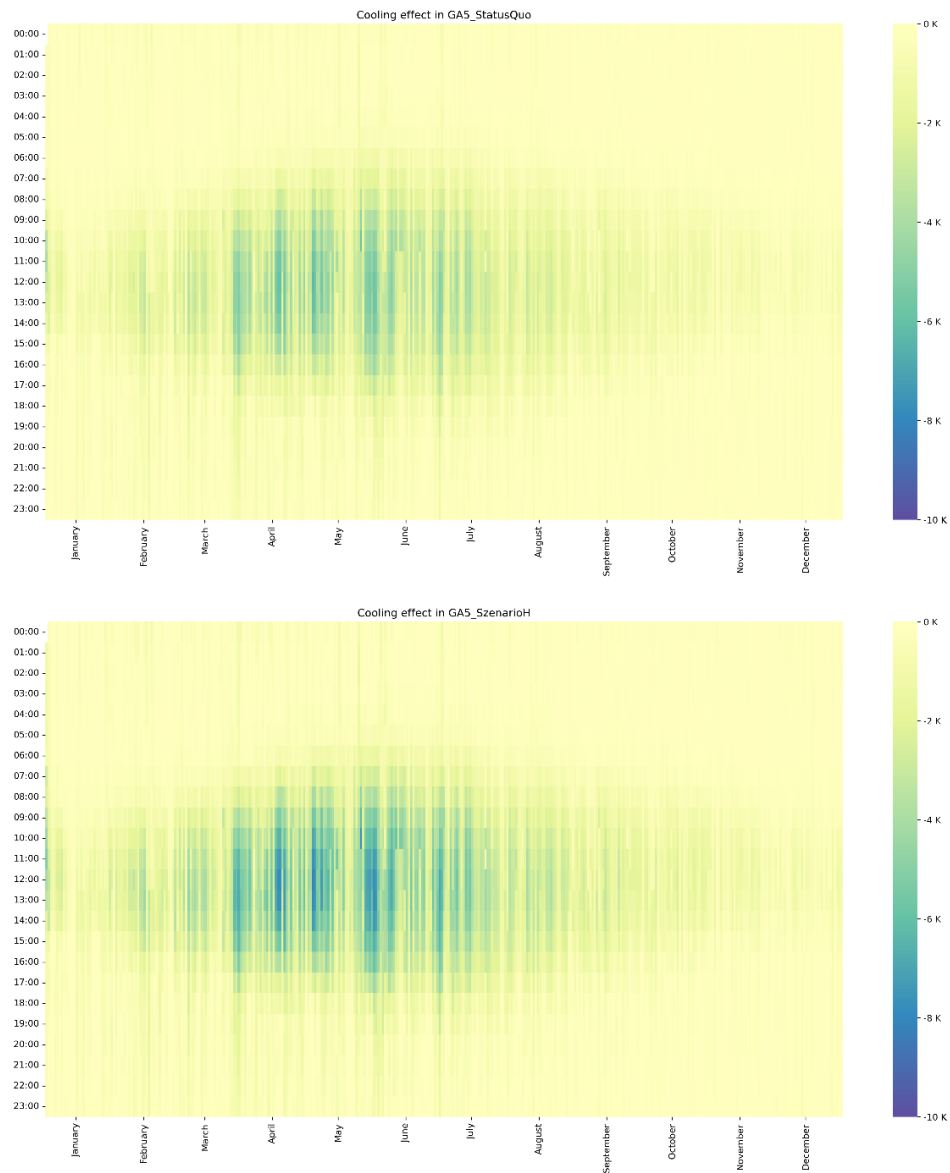
8.6 Tägliche Temperaturänderung in Gebietsausschnitt V



8.7 Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben), das Szenario F (mitte) und das Szenario G (unten) in Gebietsausschnitt IV



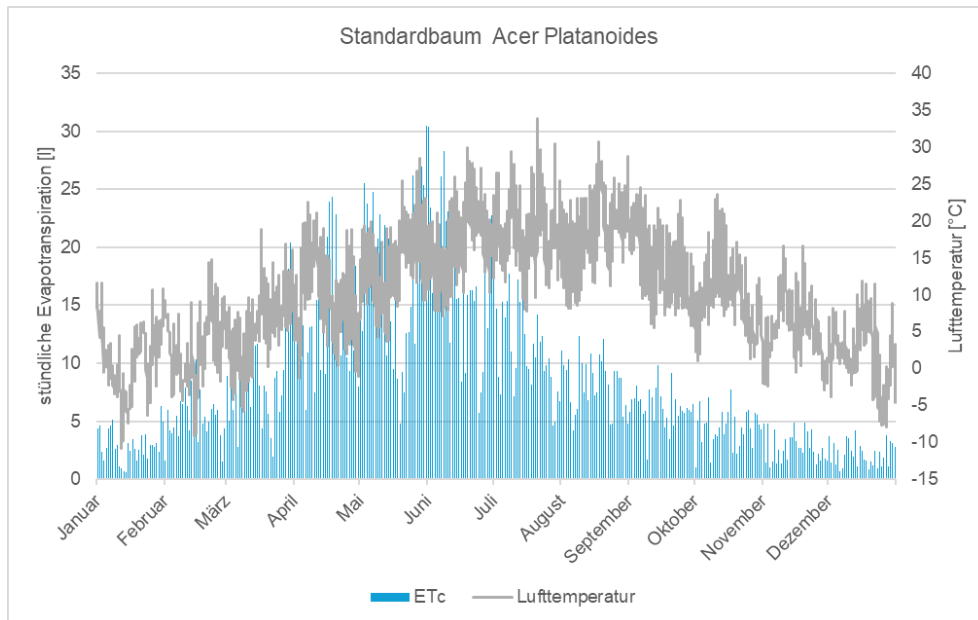
8.8 Stündliche Temperaturänderung eines Jahres für den Status Quo (oben) das Szenario H (unten) in Gebietsausschnitt V



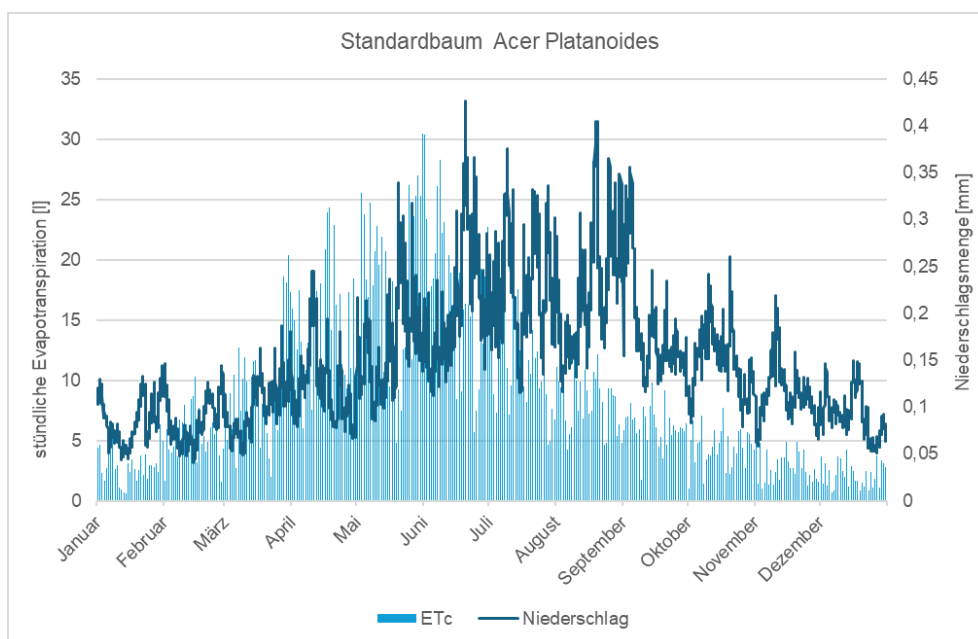
9 Zusammenhänge meteorologische Daten und Evapotranspiration

Datengrundlage für diese Aufstellungen stellen zum einen die Wetterdaten mit dem Vergleichsjahr 2005 der Plattform Meteonorm und zum anderen die Ergebnisse der Simulation des *Green Water Workflows* in SimStadt dar.

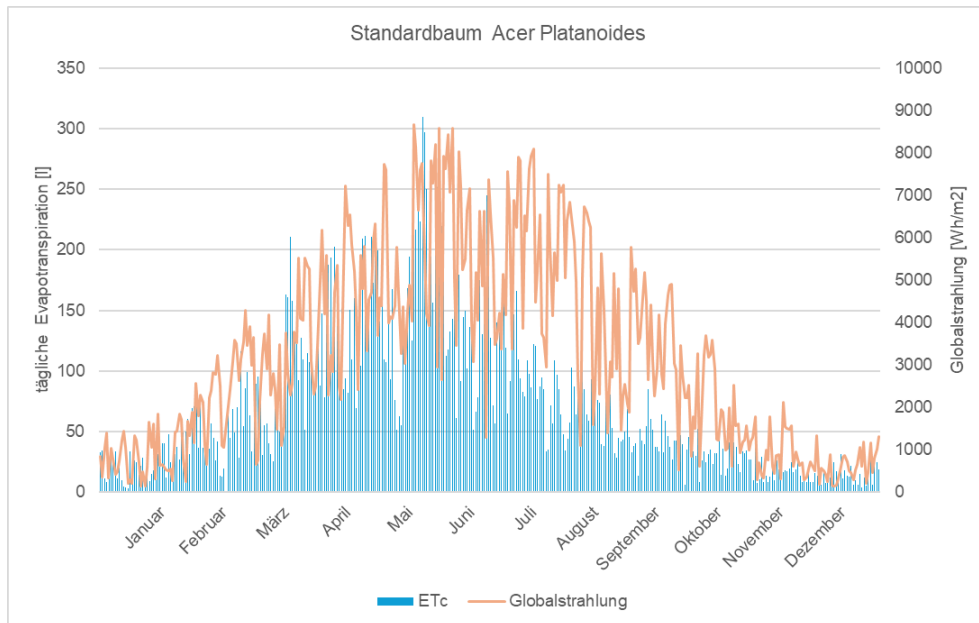
9.1 Stündliche Evapotranspirationsrate des *Acer Platanoides* und die stündliche Lufttemperatur



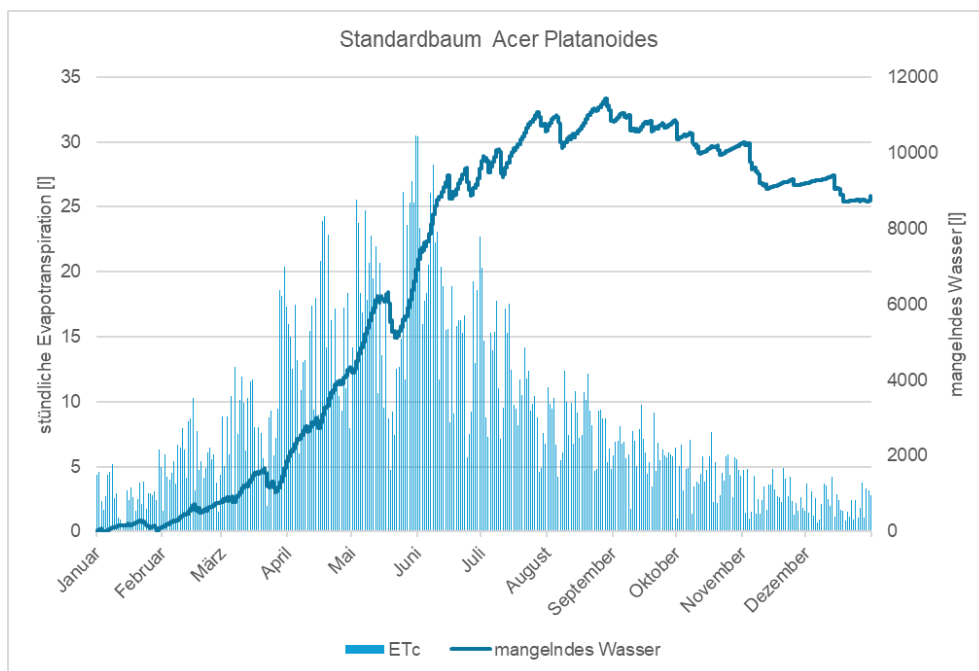
9.2 Stündliche Evapotranspirationsrate des *Acer Platanoides* und die stündliche Niederschlagsmenge



9.3 Summe der täglichen Evapotranspiration des Acer Platanoides und die tägliche Globalstrahlung



8.3 Stündliche Evapotranspirationsrate des Acer Platanoides und die stündlich fehlende Wassermenge



Selbständigkeitserklärung

nach Studien- und Prüfungsordnung, § 27, Abs. 1

Hiermit erkläre ich, Marieke Kreye, dass ich die vorliegende Bachelorthesis selbständig verfasst habe. Außer den in der Arbeit genannten Hilfsmitteln und Unterlagen habe ich keine weiteren Hilfsmittel in Anspruch genommen. Der Quellennachweis ist vollständig.

Stuttgart, 19.06.2023
Ort, Datum

M. Kreye
Unterschrift

Kognition: Erklärung zur Nutzung von generativen KI-Tools in Hochschulprüfungen

Titel der Arbeit: Analyse der Wechselwirkungen zwischen Mobilität, Stadtgrün und thermischen Gebäudeenergiebedarf anhand zweier Fallbeispiele

Abgabedatum: 20. Juni 2024

1. Verantwortungsvoller Umgang mit KI-Tools

Bestätigen Sie die folgenden Aussagen.

Aussagen zum verantwortungsvollen Umgang mit KI-Tools	Bestätigung: Ja
Ich bin über die Möglichkeiten und Grenzen der von mir verwendeten generativen KI-Tools informiert.	☒
Ich habe mich vergewissert, dass die von den KI-Tools gelieferten Ergebnisse korrekt sind, oder dass ich sie korrigiert habe.	☒
Ich erkenne an, dass die Verantwortung für die Arbeit bei dem Autor liegt, nicht bei den KI-Tools oder einer anderen Person.	☒

2. Detaillierte Tätigkeiten, für die KI-Tools genutzt wurden

Geben Sie an, welches KI-Tool Sie in welchem Umfang für welche Tätigkeit genutzt haben.

Aktivität	Beschreibung	Verwendete KI-Tools (falls zutreffend) ¹	Beschreibung der Nutzung der KI-Tools (Art der Nutzung, betroffene Abschnitte der Arbeit, etc.)
Ideenfindung & Konzeptualisierung	– Entwicklung von Ideen, Forschungszielen, Zielsetzungen und Forschungsfragen – Identifikation und Definierung relevanter Konzepte		
Literaturrecherche und -analyse	– Suche nach relevanter Literatur – Überprüfung von potenziell relevanter Literatur – Zusammenfassungen von relevanter Literatur		
Methodik	– Suche nach einer geeigneten Methodik		

¹ Nennen Sie die Namen der verwendeten KI-Tools, z.B. ChatGPT, DeepL Write, Microsoft 365 Copilot, Neuroflash, Grammarly, DeepL Translator, Google Translate, Perplexity, Elicit, Explainpaper, ResearchRabbit, GitHub Copilot.

	– Entwicklung und Anpassung der Methodik an die Forschungsfrage(n)		
Coding	– Erstellen und dokumentieren von Code, Algorithmen, Software – Testen und debuggen von bestehendem Code, Algorithmen, Software – Verständnis von bestehendem Code, Algorithmen, Software	ChatGPT	Genutzt, um Verständnisfragen und Toolfunktionen der Software ArcGIS Pro zu verstehen.
Datenerhebung und -analyse	– Erhebung von Primär- oder Sekundärdaten – Qualitative Datenanalyse (einschließlich Zusammenfassungen und Coding) – Quantitative Datenanalyse (einschließlich statistische Auswertung) – Mathematische, computergestützte oder andere formale Techniken zur Modellierung, Simulation und Analyse		
Interpretation und Validierung	– Interpretation der Ergebnisse – Ableitung von Implikationen für Forschung und Praxis – Überprüfung der allgemeinen Replikation/Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und anderer Forschungsergebnisse		
Strukturierung und Planung des Textes	– Gliederung der Arbeit – Gliederung von Abschnitten der Arbeit (z.B. Stichpunktliste pro Abschnitt)		
Generierung des Textes	– Generierung von Text zu verschiedenen Themen in verschiedenen Abschnitten der Arbeit (einschließlich Titel und Zusammenfassungen)		
Übersetzen von Text	– Übersetzung der von den Autor:innen verfassten Texte – Übersetzung der von anderen geschriebenen Texten	DeepL Translator	Teilweise zur Übersetzung von Fachliteratur genutzt.
Überprüfung & Editierung des Textes	– Kritische Überprüfung, Feedback oder Überarbeitung des Inhalts, der Organisation oder der Grammatik der Arbeit – Korrekturlesen	ChatGPT	Zur Umformulierung selbst geschriebener Textpassagen genutzt.

	– Umformulierung oder Paraphrasierung von Text – Kürzung/Erweiterung des Textes		
Präsentation	– Strukturierung einer Präsentation über die Arbeit – Füllen einer Präsentation über die Arbeit mit Inhalt		
Quellenverwaltung	– Erstellen der Referenzliste – Formatierung der Referenzen		
Weitere Aktivitäten			

Gibt es sonst noch etwas, das Sie bezüglich der Nutzung von KI-Tools angeben wollen, welches Ihre eigenständige, definierbare Leistung bei der Erstellung dieser Arbeit hervorheben oder einschränken würde?

Nein.

3. Unterschrift(en) des / der Autor:in / Autor:innen

	Autor:in Nachname, Vorname(n)	Matrikulationsnummer	Datum	Unterschrift
1	Marieke Kreye	1002127	19.06.24	M. Kreye

Hintergrund zu dieser Erklärung: Bewertungen an Universitäten müssen es ermöglichen, die Leistung der Studierenden zu ermitteln. Zu diesem Zweck muss die Leistung der Studierenden, die in einer Arbeit enthalten ist, von der Leistung anderer unterschieden werden. Es ist auch notwendig, die verwendeten KI-Tools zu verstehen. Solange die generative KI in der Hochschullehre noch relativ neu ist, muss ihr Einsatz im Detail erklärt werden. Dies dient der Bewertung der Leistung und gibt den Studierenden die Sicherheit, dass ihre Arbeit nicht im Nachhinein vor dem Hintergrund anderer Normen neu bewertet wird.

Quellen: Die Inhalte in Abschnitt 3 basieren zum Teil auf der CRediT Contributor Role Taxonomy von Allen et al. (2019) und den ChatGPT-Richtlinien von Gimpel et al. (2023a, 2023b).

Weiterführende Literatur: Gimpel et al. (2023a) bietet einen Überblick über generative KI in der Hochschullehre. Gimpel et al. (2023b) bietet eine Schritt-für-Schritt-Anleitung für den Einstieg in ChatGPT.

Quellen:

Allen, L., O'Connell, A., & Kiermer, V. (2019). How can we ensure visibility and diversity in research contributions? How the Contributor Role Taxonomy (CRediT) is helping the shift from authorship to contributorship. *Learned Publishing*, 32(1), 71-74

Gimpel, H., Hall, K., Decker, S., Eymann, T., Lämmermann, L., Mädche, A., Röglinger, M., Ruiner, C., Schoch, M., Schoop, M., Urbach, N., Vandirk, S. (2023a). Unlocking the Power of Generative AI Models and Systems such as GPT-4 and ChatGPT for Higher Education: A Guide for Students and Lecturers. University of Hohenheim, March 20, 2023. [https://digital.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/digital/Generative AI and ChatGPT in Higher Education.pdf](https://digital.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/digital/Generative_AI_and_ChatGPT_in_Higher_Education.pdf)

Gimpel, H., Jung, C., Utz, L., Wöhl, M. (2023b). Von Null auf ChatGPT: Eine Schritt-für-Schritt-Anleitung, um sich mit der künstlichen Intelligenz vertraut zu machen. Universität Hohenheim, 21. April 2023. [https://digital.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/digital/Von Null auf ChatGPT - Anleitung.pdf](https://digital.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/digital/Von_Null_auf_ChatGPT_-_Anleitung.pdf)

Weitere Nutzung:

Dieses Material ist unter der Creative Commons Attribution ShareAlike 4.0 (CC BY-SA) Lizenz lizenziert und darf in jedem Format oder Medium für jeden Zweck, einschließlich kommerzieller Zwecke, bearbeitet, vervielfältigt und verbreitet werden, vorausgesetzt, die Autoren werden genannt und das Material wird unter denselben Bedingungen neu veröffentlicht.

Rechtlicher Hinweis: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/en/legalcode>



Empfohlene Quellenangabe: Gimpel, H., Dilger, P., Lämmermann, L., Urbach, N. (2023). KOGNITION: Erklärung zur Nutzung von generativen KI-Tools in Hochschulprüfungen. Forschungsinstitut für Informationsmanagement, Mai 22, 2023.