

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Urban Heat Island Mitigation: Ein Vergleich der Strategien von
Wien und Singapur unter Berücksichtigung klimatischer
Unterschiede

verfasst von | submitted by
Lukas Novy BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree
programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 199 500 510 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Bewegung und Sport Unterrichtsfach Geographie
und wirtschaftliche Bildung

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Kurzzusammenfassung

Urban Heat Islands (UHI) sind ein zunehmend relevantes Problem in Städten weltweit. Sie entstehen durch verschiedene Faktoren wie direkte anthropogene Wärmeemissionen, ungünstige Stadtgeometrien, den Verlust urbaner Vegetation, einen hohen Anteil versiegelter Flächen sowie hitzespeichernde Baumaterialien. Diese Kombination führt dazu, dass die Temperaturen in Städten deutlich höher sind als im umliegenden ländlichen Raum. Diese Arbeit untersucht die Ursachen, Auswirkungen und möglichen Gegenmaßnahmen urbaner Hitzeinseln mit einem Fokus auf zwei Städte: Wien und Singapur. Anhand einer umfassenden Literaturrecherche und Analyse bestehender Strategien werden unterschiedliche Maßnahmen zur Reduzierung von UHI-Effekten evaluiert. Der Vergleich der Maßnahmen zeigt, dass der Wiener UHI-STRAT natürliche Kühlmechanismen wie Luftzirkulation und die Erhöhung der Vegetation als wirksam bewertet, während Singapur auf technologische Anpassungen und die Reduktion von anthropogener Wärme fokussiert ist. Ein zentraler Aspekt der Arbeit ist der Vergleich der Bewertungsmethoden für UHI-Minderungsstrategien in beiden Städten. Die Methoden zur Bewertung der Maßnahmen führen dabei zu unterschiedlichen Priorisierungen. Während Wien durch qualitative Expert:innenbewertung die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen in einem übergeordneten Stadtplanungsprozess bewertet, verwendet Singapur computergestützte Klimasimulationen zur quantitativen Messung der Temperaturreduktion. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln signifikant von den angewendeten Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit abhängt. Die Arbeit endet mit einer Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Stadtplanung in Wien und Singapur, um die besten Ansätze beider Städte zu nutzen und voneinander zu lernen.

Abstract

Urban heat islands (UHI) are an increasingly relevant problem in cities worldwide. They are caused by various factors such as direct anthropogenic heat emissions, unfavourable urban geometries, the loss of urban vegetation, a high proportion of sealed surfaces and heat-storing building materials. This combination leads to significantly higher temperatures in cities than in the surrounding rural areas. This thesis analyses the causes, effects and possible countermeasures of urban heat islands with a focus on two cities: Vienna and Singapore. Based on a comprehensive literature review and analysis of existing strategies, different measures to reduce UHI effects are evaluated. The comparison of the measures shows that the Vienna UHI-STRAT evaluates natural cooling mechanisms such as air circulation and the increase of vegetation as effective, while Singapore focusses on technological adaptations and the reduction of anthropogenic heat. A central aspect of the work is the comparison of the evaluation methods for UHI mitigation strategies in both cities. The methods used to evaluate the measures lead to different prioritisations. While Vienna uses qualitative expert assessment to evaluate the effectiveness of individual measures in an overarching urban planning process, Singapore uses computerised climate simulations to quantitatively measure temperature reduction. The results show that the evaluation of measures to reduce urban heat islands depends significantly on the methods used to measure their effectiveness. The thesis concludes with recommendations for sustainable urban planning in Vienna and Singapore in order to utilise the best approaches of both cities and to learn from each other.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	II
Abstract.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
2 Hypothesen und Forschungsfragen	3
3 Methodik	5
4 Theoretische Grundlagen.....	7
4.1 Definition des urbanen Hitzeinseleffekts	7
4.2 Arten von Hitzeinseln.....	8
4.3 Zeitliches Erscheinungsbild von urbanen Hitzeinseln.....	9
4.4 Faktoren, die zur Bildung urbaner Hitzeinseln beitragen	10
4.4.1 Meteorologische Einflussfaktoren	10
4.4.2 Anthropogene Einflussfaktoren	12
4.4.3 Geographische Einflussfaktoren	17
4.5 Gesundheitliche, wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen	18
4.5.1 Gesundheitliche Auswirkungen	19
4.5.2 Wirtschaftliche Auswirkungen.....	20
4.5.3 Ökologische Auswirkungen.....	20
4.6 Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln	20
4.6.1 Vegetation.....	21
4.6.2 Stadtgeometrie	22
4.6.3 Erhöhung des urbanen Wasseranteils	25
4.6.4 Materialien und Oberflächen	27
4.6.5 Beschattung	28
4.6.6 Transportmittel	29
4.6.7 Energie	31
5 Internationale Strategien	32

5.1	Wien	32
5.1.1	Klimatische Bedingungen.....	32
5.1.2	Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln in Wien	33
5.1.3	„UHI- STRAT“	35
5.1.4	Methode der Maßnahmenbewertung	36
5.1.5	Wirksamste Maßnahme gegen urbane Hitzeinseln in Wien	38
5.2	Singapur	44
5.2.1	Klimatische Bedingungen.....	45
5.2.2	Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln in Singapur	46
5.2.3	„Cooling Singapore“	48
5.2.4	Methode der Maßnahmenbewertung	49
5.2.5	Wirksamste Maßnahme gegen urbane Hitzeinseln in Singapur	50
6	<i>Bewertung und Vergleich</i>	55
6.1	Handlungsempfehlung	59
7	<i>Schlussfolgerung</i>	61
8	<i>Perspektiven</i>	63
9	<i>Literatur.....</i>	68

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Sichtbares und infrarotes Bild ausgewählter Baumaterialien (Quelle: Doulos et al., 2004: 235)	15
Abb. 2 Maximale Temperaturabweichung im Zentrum von Siedlungen gegenüber dem Umland (Quelle: Schönwiese 2024: 293)	16
Abb. 3 Das Energiebudget von Siedlungsgebieten und der UHI- Effekt (Quelle: MA 22, 2015: 7)	23
Abb. 4 Hochhaus in Singapur mit einer horizontal offenen Bauweise (Quelle: Privataufnahme)	24
Abb. 5 Jährliche Hitzetage in Wien seit 1873 (Quelle: Wetter - Offizielle Statistik der Stadt Wien, 2024)	33
Abb. 6 Wärmebild von Wien und Umgebung bei Nacht (Quelle: Damyanovic et al., 2016 zitiert nach MA 22, 2015: 263)	34
Abb. 7 Beispiel einer Spiderweb-Grafik zu einer Straßenbegleitbegrünung einer zweiseitigen Allee (Quelle: MA 22, 2015: 25)	37
Abb. 8 Spiderweb- Grafik - Freiraumvernetzung mit Anbindung an Kaltluftproduktionsflächen (Quelle: MA 22, 2015: 29)	38
Abb. 9 Frei.Raum.Netz.Wien (Quelle: MA 22, 2015: 28)	40
Abb. 10 Spiderweb- Grafik - Errichtung von Parks (Quelle: MA 22, 2015: 40)	43
Abb. 11 Komponenten der Fernkälte (District Cooling) Singapurs (Quelle: Riegelbauer et al., 2020: 6)	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammenfassung der anthropogenen Wärme in Singapur im Jahr 2016 (Quelle: Kayanan et al., 2019, 26)	47
--	----

1 Einleitung

Es wird prognostiziert, dass die Zahl der Stadtbewohner weltweit von derzeit 55 % auf 68 % im Jahr 2050 ansteigen wird. Die fortschreitende Verstädterung bringt zahlreiche Herausforderungen für die städtische Umwelt und das menschliche Wohlergehen mit sich. Eine der Herausforderungen sind „Urban heat islands“ (UHI). Urban Heat Islands, auf Deutsch urbane Hitzeinseln genannt, sind städtische Gebiete, die aufgrund menschlicher Aktivitäten und Bebauung höhere Temperaturen aufweisen als ihre ländliche Umgebung. Dieses Phänomen wird durch verschiedenste Faktoren verstärkt. (Hupfer, 2006)

Diese Arbeit ist in mehrere Kapitel unterteilt. Zunächst werden die verschiedenen Hypothesen sowie die daraus abgeleiteten Forschungsfragen vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel wird die verwendete Methode beschrieben, die zur Überprüfung der Hypothesen und zur Beantwortung der Forschungsfragen dient.

Am Beginn des Kapitels „State of the Art“ werden zunächst die Effekte urbaner Wärmeinseln definiert. Daraufhin werden die verschiedenen Typen von Hitzeinseln vorgestellt und deren zeitliches Auftreten analysiert, um eine fundierte Grundlage für die Zuordnung und Analyse im empirischen Teil der Arbeit zu schaffen. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der Faktoren, die maßgeblich zur Bildung urbaner Hitzeinseln beitragen. Diese werden in drei Kategorien unterteilt: meteorologische, anthropogene und geografische Einflussfaktoren. Die Auswirkungen auf die städtische Bevölkerung werden im darauffolgenden Kapitel untersucht, wobei gesundheitliche, wirtschaftliche und ökologische Folgen von Wärmeinseln im Fokus stehen. Zudem werden verschiedene nationale und internationale Maßnahmen präsentiert, die zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln eingesetzt werden. Im „State of the Art“ wird die Nullhypothese mit der zugehörigen Alternativhypothese geprüft: „Urbane Hitzeinseln haben keinen signifikant negativen Einfluss auf die städtische Bevölkerung.“ Daraus ergeben sich folgende Forschungsfrage(n): „Welche nationalen und internationalen Strategien zu Bewältigung von urbanen Hitzeinseln gibt es?“ und „Wie beeinflussen UHI-Effekte die städtische Bevölkerung?“

Im Kapitel „Internationale Strategien“ werden zunächst beide Städte hinsichtlich der klimatischen Bedingungen genauer analysiert und die jeweiligen Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln aufgedeckt. Beide Städte haben innovative und vielfältige Ansätze entwickelt, um UHI-Effekte zu bekämpfen, jedoch unterscheiden sich ihre Strategien aufgrund ihrer

spezifischen klimatischen und geografischen Gegebenheiten (Schönwiese, 2024). Während Wien durch gemäßigtes Klima geprägt ist (Pfadenhauer & Klötzli, 2014), handelt es sich bei Singapur um eine tropische Stadt mit einer hohen Bevölkerungsdichte und einer intensiven Urbanisierung (Aflaki et al., 2016). Außerdem gibt es für die Bewertung der Maßnahmen unterschiedliche Methoden, was die Identifizierung der wirksamsten Maßnahme gegen urbane Hitzeinseln, erschwert (MA 22, 2015; Rüfenacht; Acero, 2017). Diese Unterschiede verlangen unterschiedliche Herangehensweisen und stellen eine Herausforderung dar, wenn es darum geht, allgemeingültige Empfehlungen abzuleiten. Für diesen Teil der Arbeit wird somit folgende Hypothese mit der jeweiligen Alternativhypothesen aufgestellt: „Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln aufgrund der verschiedenen Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit zwischen den Strategieplänen „UHI-STRAT“ und „Cooling Singapore“. Um herauszufinden, welche spezifische Maßnahme innerhalb der Bewertungsmethoden als die Wirksamste gilt, wurde folgende Forschungsfrage abgeleitet: „Welche spezifischen Maßnahmen zur Minderung städtischer Wärmeinseln werden unter Berücksichtigung der verschiedenen Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit als am wirksamsten bewertet?“

Zudem werden in dieser Arbeit ein Vergleich sowie die Möglichkeiten des Austauschs neuer Maßnahmen analysiert. Somit wurde die letzte Nullhypothese folgendermaßen formuliert: „Wien und Singapur können durch den Austausch und die Umsetzung bewährter Strategien der jeweils anderen Stadt urbanen Hitzeinseln nicht entgegenwirken.“ Daraus lässt sich folgende Forschungsfrage bilden: „Welche Strategien können trotz der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in Wien und Singapur angewendet werden oder neu implementiert werden?“

2 Hypothesen und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, sowohl nationale als auch internationale Maßnahmen zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die städtische Bevölkerung zu analysieren. Zudem wird untersucht, inwieweit die unterschiedlichen Bewertungsmethoden in Wien und Singapur die Bestimmung der jeweils als wirksamsten eingestuften Maßnahmen beeinflussen. Abschließend soll auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine Handlungsempfehlung formuliert werden.

1. Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen urbaner Hitzeinseln auf die städtische Bevölkerung sowie Strategien zu deren Bewältigung. Es bildet sich die Hypothese, dass UHI-Effekte einen signifikanten negativen Einfluss auf die Lebensqualität und Gesundheit der Stadtbewohner haben. Zur Beantwortung dieser Hypothese werden zwei Forschungsfragen formuliert. Dafür werden nationale und internationale Maßnahmen zur Minderung von UHI vorgestellt und untersucht, inwieweit die klimatischen Veränderungen durch urbane Hitzeinseln die Bevölkerung beeinflussen.

Hypothese:

H_0 : Urbane Hitzeinseln haben keinen signifikanten negativen Einfluss auf die städtische Bevölkerung.

H_1 : Urbane Hitzeinseln haben einen signifikanten negativen Einfluss auf die städtische Bevölkerung.

Forschungsfragen:

- Welche nationalen und internationalen Strategien zu Bewältigung von urbanen Hitzeinseln gibt es?
 - Wie beeinflussen UHI-Effekte die städtische Bevölkerung?
2. Eine zentrale Frage, welche sich diese Arbeit widmet ist, ob und inwiefern unterschiedliche Erfassungsmethoden Einfluss auf die Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln haben. Die Nullhypothese (H_0) besagt, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung zwischen den Strategieplänen „UHI-STRAT“ und „Cooling Singapore“ gibt, obwohl verschiedene Methodiken zur Wirksamkeitserfassung

angewendet werden. Im Gegensatz dazu geht die Alternativhypothese (H1) davon aus, dass die Bewertungsunterschiede durch die angewendeten Methoden deutlich variieren. Ziel der Arbeit ist es, dabei herauszufinden, welche spezifischen Maßnahmen unter Berücksichtigung der jeweiligen Methoden als am wirksamsten angesehen werden.

Hypothese:

H₀: Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln aufgrund der verschiedenen Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit zwischen den Strategieplänen „UHI-STRAT“ und „Cooling Singapore“.

H₁: Die Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln variiert aufgrund der verschiedenen Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit signifikant zwischen den Strategieplänen „UHI-STRAT“ und „Cooling Singapore“.

Forschungsfragen:

- Welche spezifischen Maßnahmen zur Minderung städtischer Wärmeinseln werden unter Berücksichtigung der verschiedenen Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit als am wirksamsten bewertet?
3. Am Ende der Arbeit wird untersucht, ob der Austausch und die Umsetzung bewährter Strategien zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln zwischen Wien und Singapur zu einer effektiven Minderung des städtischen Wärmeinsel-Effekts führen kann. Die Nullhypothese (H₀) geht davon aus, dass der Austausch und die Umsetzung dieser Strategien keine signifikante Wirkung haben, während die Alternativhypothese (H₁) eine positive, wirksame Veränderung vermutet. Es wird außerdem analysiert, welche der bewährten Strategien trotz der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in beiden Städten verstärkt angewendet oder neu implementiert werden könnten. Ziel der Untersuchung ist es, die Übertragbarkeit erfolgreicher Maßnahmen zwischen den Städten zu evaluieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Hypothese:

H₀: Wien und Singapur können durch den Austausch und die Umsetzung bewährter Strategien der jeweils anderen Stadt urbanen Hitzeinseln nicht entgegenwirken.

H₁: Wien und Singapur können durch den Austausch und die Umsetzung bewährter Strategien der jeweils anderen Stadt urbanen Hitzeinseln effektiv entgegenwirken.

- Welche Strategien können trotz der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in Wien und Singapur verstärkt angewendet oder neu implementiert werden?

3 Methodik

Vor Beginn der Schreibarbeit wurde ein strukturierter Arbeitsplan erstellt, der die methodische Herangehensweise der Arbeit beeinflusste. Ein zentraler Bestandteil war die systematische Auswahl relevanter Literatur. Hierzu wurde eine umfangreiche Tabelle in Microsoft Word angelegt, die in drei Spalten gegliedert war: Quelle – Name der Publikation, inklusive Link zur Suchmaschine oder Webseite; Inhaltsübersicht – Kurze Zusammenfassung des jeweiligen Dokuments für eine schnelle Orientierung; Schlagwörter und Zitation – Zentrale Stichwörter sowie die vollständige APA-Zitierung zur späteren Verwendung. Dieser Prozess wurde durch den Einsatz eines KI-Programms (ChatGPT) effizienter und zeitsparender gestaltet. Zunächst wurden die zuvor beschriebenen Spalten erstellt. Anschließend genügte es, den jeweiligen Link zur Quelle in das KI-Programm einzufügen, sodass die Tabelle schrittweise automatisch vervollständigt werden konnte. Die Recherche erfolgte über verschiedene wissenschaftliche Datenbanken. Hauptsächlich wurde die Suchmaschine u:search der Universität Wien genutzt, über die auch physische Bücher entliehen wurden. Zusätzlich wurde Google Scholar verwendet, insbesondere für weiterführende Literatur mit Schwerpunkt auf tropischen Klimabedingungen. Für die Suche nach relevanten Publikationen wurden spezifische englische Schlüsselwörter verwendet, darunter: "Urban Heat Island (UHI), Heat Mitigation Strategies, Sustainable Urban Planning, Heat Wave Impact, Anthropogenic Heat Emissions, Urban Microclimate, Cooling Technologies, UHI-STRAT, Cooling Singapore, Meteorology and Climate, Health Risks of Urban Heat". Auch hier wurde manchmal gezielt auf den Einsatz künstlicher Intelligenz zurückgegriffen. Durch die Nutzung von ChatGPT und ScopusAI konnten nach der Eingabe spezifischer Schlüsselwörter relevante wissenschaftliche Quellen gefunden werden, die einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit leisteten. Um zentrale Begriffe zu klären, wie beispielsweise „Oberflächenalbedo“, wurde gezielt in den zuvor genannten Datenbanken nach Publikationen mit passenden Definitionen gesucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass jede Information von mindestens zwei unabhängigen Quellen

bestätigt wurde. Dieses Vorgehen wurde in allen Unterkapiteln angewandt, um eine wissenschaftlich fundierte Basis zu gewährleisten.

Diese Arbeit gliedert sich in zwei zentrale Teile: eine umfassende Literaturrecherche sowie eine empirische Analyse. Der erste Teil, die theoretischen Grundlagen, basiert auf einer systematischen Literaturrecherche, in deren Rahmen grundlegende Informationen zu urbanen Hitzeinseln erarbeitet wurden. Mithilfe der oben genannten Recherchewerkzeuge und passender Schlagwörter wurden die relevanten Informationen zu den einzelnen Kapiteln zunächst gesammelt und anschließend für diese Arbeit zusammengefasst. Für die Kapitel 4.1, 4.2 und 4.3 wurde insbesondere auf die Literatur von Hupfer (2006) zurückgegriffen, da diese Quelle die zentralen Inhalte umfassend und gut strukturiert abdeckt. Ergänzt und bestätigt wurden diese Informationen mit weiteren wissenschaftlichen Arbeiten. Kapitel 4.4 widmet sich den verschiedenen Einflussfaktoren, die zur Verstärkung urbaner Hitzeinseln beitragen. Um eine strukturierte Darstellung darzubieten, wurde dieses Kapitel in drei Unterkapitel gegliedert: meteorologische, anthropogene und geografische Einflussfaktoren. Aufgrund des Umfangs der anthropogenen Faktoren erfolgte eine weiterführende Untergliederung in sieben thematische Abschnitte (siehe Kapitel 4.4.2). Dabei wurde zuerst die Namengebung dieser sieben Aspekte mit einer Vorrecherche getroffen. Anschließend wurden diese mit Hilfe einer Literaturrecherche ausgearbeitet. Im Kapitel 4.5 wurde versucht die Einflüsse urbaner Hitzeinseln auf die Stadtbevölkerung zu beschreiben. Auch hier wurden mit Hilfe einer Literaturrecherche drei Unterkapitel gebildet. Kapitel 4.6 wurde ähnlich wie Kapitel 4.4.2 aufgebaut. Zunächst wurden übergeordnete Kategorien bestimmt, unter denen sich geeignete Maßnahmen zur Minderung urbaner Hitzeinseln sinnvoll zusammenfassen lassen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Maßnahmen wurde dieses Kapitel in Anlehnung an das Projekt „Cooling Singapore“ strukturiert. Die dort aufgeführten Maßnahmen wurden als Ausgangspunkt genommen und nach und nach durch Inhalte aus weiteren Quellen, wie dem Projekt UHI-STRAT und anderen Studien, ergänzt und beschrieben.

Zur Beantwortung der letzten zwei Hypothesen und Forschungsfragen wurde die Methode einer vergleichenden Fallstudie gewählt. Der Fokus lag auf einer Analyse der Strategien zur Reduktion urbaner Hitzeinseln in den Städten Wien und Singapur. Ziel war es, die angewandten Methoden zu deren Wirksamkeitserfassung zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Für Wien wurde der Strategieplan „UHI-STRAT“ der Stadt Wien als zentrale Quelle herangezogen. Dieses Dokument stellt die Maßnahmen zur Reduktion urbaner Hitzeinseln systematisch dar und bewertet diese mithilfe eines qualitativen Ansatzes in Form

von Spider-Web-Grafiken. Ergänzend wurde einschlägige Fachliteratur zur Thematik analysiert, um ein umfassendes Bild über die stadtinternen Einflussfaktoren zu erhalten. Die Auswahl der Quellen erfolgte auf Basis ihrer Relevanz, Aktualität und Bezug zur Wiener Stadtplanung. Für Singapur diente das Projekt „Cooling Singapore“ als Untersuchungsgrundlage. Im Gegensatz zu Wien basiert dieses Projekt auf einer Vielzahl wissenschaftlicher Einzelstudien, die zunächst systematisch identifiziert, thematisch geordnet und auf relevante Inhalte geprüft wurden. Zentrale Bedeutung hatte das sogenannte DUCT-Modell, das mithilfe computergestützter Klimasimulationen die Effektivität einzelner Maßnahmen quantitativ bewertet. Entsprechend spielte das Modell im Kapitel 5.2.5 eine zentrale Rolle und wurde dort oft herangezogen.

Im Rahmen der Analyse wurden somit eine Dokumentenanalyse durchgeführt, welche die Strategiepläne beider Städte im Hinblick auf die Zielsetzungen, Maßnahmenkataloge und Bewertungsmethoden untersucht. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Vergleichbarkeit der Bewertungsansätze gelegt. Die unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden gegenübergestellt, um zu analysieren, inwiefern sie zu abweichenden Bewertungen verschiedener Maßnahmen führen. Abschließend wurde geprüft, welche Strategien trotz klimatischer und methodischer Unterschiede potenziell in der jeweils anderen Stadt implementiert werden könnten. Grundlage dafür bildete ein Vergleich der klimatischen Rahmenbedingungen aus den Kapiteln 5.1.1 und 5.2.1, die mit den Erkenntnissen der vergleichenden Fallanalyse verknüpft wurden. Darauf aufbauend konnte abschließend eine Handlungsempfehlung gegeben werden.

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Definition des urbanen Hitzeinseleffekts

Die städtische Überwärmung ist das am häufigsten untersuchte und am deutlichsten nachweisbare Phänomen in der Stadtklimatologie und wird in der Fachliteratur als „Urban heat island“ bezeichnet. Es beschreibt das Phänomen, dass in städtischen Gebieten höhere Oberflächen- und Lufttemperaturen im Vergleich zum ländlichen Umland gemessen werden. In mitteleuropäischen Städten tritt dieses Phänomen besonders in den Sommernächten bei ruhigem Wetter auf. Ein präziserer Begriff wäre „Wärmearchipel“, da städtische Gebiete selten gleichmäßig überhitzt sind. Stattdessen entstehen, bedingt durch heterogene Faktoren wie

zum Beispiel unterschiedliche Flächennutzungen, Wärmeinseln, die von kühleren Zonen umgeben sind. (Hupfer, 2006)

4.2 Arten von Hitzeinseln

In der Literatur von Giguère (2009) werden drei Arten von städtischen Wärmeinseln beschrieben. Zum einen gibt es die Oberflächenwärmeinseln oder auch Bodenwärmeinseln genannt. Diese werden mit Hilfe von Messungen an der Oberfläche und reflektierenden Infrarotstrahlungen (IR- Thermografie) gemessen und erweisen sich dadurch als leicht messbar (Hupfer, 2006). Sie erstreckt sich meist parallel zur Ausdehnung der bebauten Gebiete und entstehen, wenn die natürlichen Flächen in der Umgebung der Stadt kühler sind als die versiegelten, urbanen Böden. Zu den stärksten Einflüssen für diese Art von Wärmeinsel sind die erhöhten Absorptionen kurzwelliger Strahlung (Albedo), die reduzierte Verdunstung sowie ein intensiverer Bodenwärmestrom. (Hupfer, 2006)

Eine weitere Art von urbanen Hitzeinseln sind die der Baumkronenschicht (Giguère, 2009) oder auch Stadthindernisschichtwärmeinseln genannt (Hupfer, 2006). Die Baumkronenschicht ist die Luftzirkulation zwischen Boden und Baumkronen oder Dächern von Gebäuden. Tagsüber speichern die Oberflächen und Gebäude in der Stadt die Strahlungsenergie der Sonne. Nachts, wenn keine weitere Sonnenstrahlung mehr eintrifft und die Temperaturen allmählich sinken, wird diese gespeicherte Wärme wieder freigesetzt. Bei windstillen Bedingungen erwärmt sich dadurch die Luftschicht bis zur mittleren Gebäudehöhe. Diese Luftschicht ist nachts wärmer als tagsüber, wodurch eine Wärmeinsel entsteht, die im Vergleich zum kühleren Umland deutlich spürbar ist. In ländlichen Gebieten kann dieser Effekt aufgrund fehlender wärmespeichernder Massen nicht beobachtet werden. Bei diesem Wärmeinseltyp handelt es sich um ein überwärmtes Luftvolumen, das bereits bei leichter Luftbewegung, zum Beispiel durch kühlere Luft aus dem Umland, verformt und in verschiedene Richtungen verteilt wird. Beeinflussende Faktoren sind zum einen die Stadtgeometrie, die die Luftzirkulation mehr oder weniger begünstigen kann. Zum anderen tragen die Abwärme aus Siedlungen und Verkehr sowie der versiegelte, vegetationslose Untergrund maßgeblich zur Entstehung einer Stadthindernisschichtwärmeinsel bei. Die Ursachen für diesen Wärmeinseltyp umfassen ähnlich wie bei den Bodenwärmeinseln eine verstärkte Absorption kurzwelliger Strahlung, eine erhöhte atmosphärische Gegenstrahlung, eine reduzierte effektive langwellige Ausstrahlung, die Produktion anthropogener Wärme, eine

vermehrte Wärmespeicherung, geringere Verdunstung sowie eine eingeschränkte turbulente Luftdurchmischung. (Hupfer, 2006)

Die dritte Art von urbanen Hitzeinseln sind die Stadtgrenzschichtwärmeinseln. Diese Grenzschicht befindet sich oberhalb des Krondachs und entsteht durch Windsysteme und den damit verbundenen Wärmetransporten in Windrichtung. Durch turbulente Energietransporte aus der unteren oder oberen Atmosphäre entsteht über dem städtischen Gebiet eine Kuppel aus warmer Luft. Tagsüber kann dieses Wärmegewölbe kilometerweit in die Atmosphäre reichen, während sich die Höhe der Luftschicht in der Nacht auf einige hundert Meter reduziert. Einflussfaktoren sind die industriellen und siedlungsbedingten Wärmeemittenten, Wärmeinseln der Stadthindernisschicht und die Entstehung einer Dunstglocke. Auch bei diesem Typ der Wärmeinsel lassen sich die Hauptursachen überwiegend auf anthropogene Wärmequellen und die verstärkte Absorption kurzweilliger Strahlung zurückführen. Ein weiterer Faktor ist der erhöhte Luftaustausch mit oberen und unteren Schichten der Atmosphäre. (Hupfer, 2006)

Genauer betrachtet gibt es noch eine vierte Art von Wärmeinsel. Diese entsteht im Untergrund durch die extreme Aufheizung der Bodenoberflächen, die durch verschiedene Baumaterialien verstärkt werden kann. Die Wärme dringt mehrere Meter in den Boden ein und kann zu einer messbaren Erwärmung des Grundwassers führen. (Henninger, 2011)

4.3 Zeitliches Erscheinungsbild von urbanen Hitzeinseln

Die Intensität und das Aufkommen von Hitzeinseln ändert sich täglich und saisonal in Abhängigkeit von den verschiedenen meteorologischen und anthropogenen Parametern. Doch es lässt sich auch eine enge Bindung an die Tages- und Jahreszeit erkennen. (Henninger, 2011) Hupfer (2006) zeigt in einem Modell, das den Tagesverlauf und die jahreszeitlichen Unterschiede der städtischen Überwärmung im Vergleich zum Umland darstellt, dass die Lufttemperatur in urbanen Gebieten das ganze Jahr über langsamer schwankt als im Umland. Noch vor Sonnenuntergang beginnt im Umland eine relativ starke Abkühlung, während in der Stadt der sogenannte Temperaturhalteeffekt einsetzt. Die höchsten stündlichen Temperaturänderungen treten im Umland auf, während in städtischen Gebieten flachere Temperaturverläufe und zeitliche Verschiebungen der Extremwerte typisch sind. Dies ist vor allem auf die größere Wärmespeicherung, fehlende Verdunstungskühlung und begrenzte Wärmeabstrahlung in urbanen Gebieten zurückzuführen. Vergleicht man diese

Informationen mit jenen von Giguère (2009), lässt sich zusammenfassen, dass die Intensität des Effektes urbaner Wärmeinseln nachts stets höher ist als tagsüber.

4.4 Faktoren, die zur Bildung urbaner Hitzeinseln beitragen

Es gibt mehrere zentrale Faktoren, die zur Entstehung und Verstärkung urbaner Hitzeinseln beitragen. Der erste Aspekt betrifft die meteorologischen Einflüsse. Hierbei spielen insbesondere der Bedeckungsgrad des Himmels, die Windgeschwindigkeit, atmosphärischen Schichtungsverhältnisse, der Niederschlag und die Luftfeuchtigkeit eine entscheidende Rolle, da diese Parameter maßgeblich beeinflussen, wie stark sich eine städtische Region aufheizt oder abkühlt. (Lei et al., 2020)

Der zweite wesentliche Faktor sind die anthropogenen Parameter. Dazu zählen die direkte anthropogenen Wärmeemittenten, Treibhausgasemissionen, Verlust des städtischen Waldbestandes, Undurchlässigkeit von Materialien, thermischen Eigenschaften von Materialien, der Einfluss der Albedo, städtische Morphologie und Größe der Stadt sowie Bebauungsdichte. (Santamouris, 2013)

Auch geographische Einflussfaktoren, die für eine Bildung von urbanen Hitzeinseln verantwortlich sein können, dürfen nicht unterschätzt werden. Darunter zählt die Topographie, die Entfernung größerer Wasserkörper, und die Seehöhe der jeweiligen Stadt. (Henninger, 2011)

Zusammen bilden diese drei Aspekte – meteorologische Einflüsse, menschliche Aktivitäten und geographische Einflussfaktoren – ein komplexes Zusammenspiel, das die Entstehung und Intensität urbaner Hitzeinseln maßgeblich bestimmt.

4.4.1 Meteorologische Einflussfaktoren

Hupfer (2006) beschreibt in seinem Buch die Wichtigkeit der meteorologischen Einflussfaktoren auf die Entstehung und Verstärkung von urbanen Hitzeinseln. In seinen Untersuchungen kommt heraus, dass ein hoher Bedeckungsgrad tagsüber die nächtliche Wärmeinselintensität aufgrund der fehlenden direkten Einstrahlungen stark verringert. Ist der Himmel hingegen nicht mit Wolken bedeckt, so steigt die Intensität von Wärmeinseln aufgrund der erhöhten direkten Wärmeeinstrahlung auf das urbane Gebiet. Die Stärke des Wärmeinseleffekts hängt auch von der Windgeschwindigkeit ab. In größeren Städten gibt es eine bestimmte Windgeschwindigkeit, ab der der Wärmeinseleffekt vollständig verschwindet.

Diese Schwelle wird jedoch von der Stadtgröße beeinflusst. Auch die Studie von Lei et al. (2020), in der die "Surface Urban Heat Island" (SUHI), also die Bodenwärmeinsel, in chinesischen Großstädten untersucht wurde, bestätigt den erheblichen Einfluss des Windes auf die Entstehung und Intensität von Wärmeinseln. In mehreren Untersuchungen zeigte sich, dass bei stärkerem Wind die Intensität der SUHI deutlich geringer ausfiel.

Ebenso ist es wesentlich, ob eine stabile atmosphärische Schichtung der Luft besteht oder nicht. Ist diese stabil, so sind die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umgebung stärker. Stabil geschichtete Luft bedeutet, dass die Luft in Schichten liegt und sich wenig durchmischt. Die Wahrscheinlichkeit der Entstehung einer städtischen Wärmeinsel ist somit höher. Wenn die Luftschichtung hingegen neutral oder instabil ist (also gut durchmischt), gibt es kaum einen ausgeprägten Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland. In solchen Fällen entsteht keine klare städtische Wärmeinsel. (Hupfer, 2006)

Niederschlag kann ebenfalls die Intensität von Urbanen Hitzeinseln, insbesondere die Bodenwärmeinseln verändern bzw. verringern (Lei et al., 2020). Um den Einfluss des Niederschlages deutlicher zu machen hat Lei et al., (2020) niederschlagsreiche und niederschlagsfreie Perioden verglichen. Das Ergebnis war eindeutig. An Tagen mit Niederschlag kommt es zu einer geringeren Ausprägung von städtischen Wärmeinseln. Zudem hat unter den meteorologischen Faktoren die relative Luftfeuchtigkeit den größten Einfluss auf die bodennahe Wärmeinsel. Das ist insofern erklärbar, da an Tagen mit höherer Luftfeuchtigkeit mehr Wasserdampf in der Atmosphäre vorhanden ist, was die Strahlungsbelastung der Erdoberfläche verringert. Dadurch wird der Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land bei der nächtlichen Abkühlung kleiner, was die nächtlichen UHI-Effekte abschwächt. (Lei et al., 2020)

Sowohl Hupfer (2006) und Lei et al. (2020) sind der Meinung, dass nach wie vor weitere quantitative Untersuchungen erforderlich sind, um allgemeingültige meteorologische Einflussfaktoren auf urbane Hitzeinseln in verschiedenen Städten mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen aufzuzeigen. Ein für diese Arbeit wesentliches Ergebnis zeigt auch, dass die meteorologischen Faktoren die Intensität der städtischen Wärmeinseln stärker in gemäßigten Klimazonen beeinflussen als in subtropischen Regionen (Lei et al., 2020).

4.4.2 Anthropogene Einflussfaktoren

Neben den klimatischen und meteorologischen Bedingungen und Einflüssen, gibt es jene der menschenverursachten Parameter. Städtische Wärmeinseln werden maßgeblich durch direkte anthropogene Wärmeemissionen, Treibhausgase, den Rückgang der städtischen Vegetationsflächen, die Undurchlässigkeit und thermischen Eigenschaften von Materialien sowie durch Faktoren wie Albedo, Stadtgröße und Stadtgeometrie beeinflusst. (Giguère, 2009)

Direkte anthropogene Wärme

Direkte anthropogene Wärme ist jene die direkt mit menschlichen Aktivitäten zusammenhängt. Hierunter fallen die Wärmeemissionen von Fahrzeugen, Klimaanlage und industriellen Prozessen. Diese Quellen geben kontinuierlich Wärme ab und tragen erheblich zur Erhöhung der städtischen Temperaturen bei. Vor allem in stark urbanisierten Gebieten, in denen der Verkehr und industrielle Tätigkeiten hoch sind, verstärken diese Faktoren den Effekt der urbanen Hitzeinseln signifikant. (USEPA, 2008, zitiert nach Giguère, 2009)

Treibhausgasemissionen

Die größten Treibhausgasemittenten in Städten sind in der Regel Fahrzeuge, Heizungssysteme von Gebäuden, sowie industrielle Prozesse, die fossile Brennstoffe nutzen. Treibhausgase bewirken, dass die Sonnenenergie in der Atmosphäre eingeschlossen wird, sodass eine Wärmeabstrahlung weniger möglich ist, was zur Erwärmung der Luft führt. Da die Treibhausgasemissionen in Städten oft höher sind als im Umland, erwärmen sich städtische Gebiete tendenziell schneller als das ländliche Umfeld. (Giguère, 2009) Durch das Einfangen der Treibhausgase bildet sich eine sogenannte „Dunstglocke“, die den Treibhauseffekt erheblich verstärkt. Zusätzlich zum Hitzeinseleffekt führt dies zu einer erhöhten Aerosolkonzentration und einer deutlichen Verschlechterung der Luftqualität, was wiederum weitere und weitreichendere Probleme nach sich zieht. (Schönwiese, 2024)

Verlust der städtischen Vegetation

Giuguere (2009) zeigen die Bedeutung der städtischen Vegetationsflächen anhand eines Beispiels aus Quebec, wo diese seit den 1960er Jahren kontinuierlich abnimmt. Hauptverursacher dieses Verlustes ist die Entwicklung der städtischen Infrastruktur in den

vergangenen Jahrzehnten. Dadurch ging ein wichtiger Teil der natürlichen Kühlung verloren, da sowohl die Verdunstung als auch die Beschattung des Bodens und der Gebäude stark reduziert wurden. Im Optimalfall wird nämlich ein Teil der städtischen Überhitzung durch die Verdunstung von Wasser abgegeben, was zu einem natürlichen Kühlungseffekt führt. Außerdem spielt die Vegetation sowohl in städtischen Gebieten als auch im Umland von Städten eine wesentliche Rolle in der effektiven Regenwasserbewirtschaftung und trägt zur Verbesserung der Luftqualität bei.

Neben der kühlenden Wirkung und der Verbesserung der Luftqualität bietet eine städtische Vegetation oder ein städtischer Waldbestand zusätzlich den Vorteil, dass durch die Verdunstung möglicherweise Wolkenbildung und Niederschlag gefördert werden können. Darüber hinaus trägt natürliche Vegetation zur qualitativ hochwertigen Humusbildung und Bodenentwicklung bei und erhöht führt zu einer hohen Biodiversität. (Schönwiese, 2024)

Undurchlässigkeit von Materialien

In städtischen Gebieten sind natürliche Böden zunehmend durch versiegelnde Materialien wie Asphalt und Beton ersetzt. Da die meisten dieser Baumaterialien keine Filter- oder Absorptionsfunktion für Wasser bieten, wird der natürliche Weg des Regenwassers erheblich verändert. (Giguère, 2009) Laut einer Studie der United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007) liegt die Bodeninfiltrationsrate in Städten bei etwa 15%, während rund 55% des Regenwassers oberflächlich in die Kanalisation abfließen. Im Gegensatz dazu versickern in natürlichen Umgebungen etwa 50% des Regenwassers im Boden und rund 10% fließen direkt in natürliche Gewässer. Natürliche Abkühlungsprozesse wie die Verdunstung der Bodenfeuchtigkeit und die Evapotranspiration sind in städtischen Gebieten eingeschränkt und können die dortige Erwärmung nicht ausreichend ausgleichen (Giguère, 2009). Der Begriff Evapotranspiration beschreibt die Verdunstung von Wasser sowohl aus der Tier- und Pflanzenwelt als auch von Wasser- und Bodenoberflächen (Schaumberger et al., o. D). Eine wesentliche Messzahl, die für die kommenden Kapitel wichtig sein wird, ist der sogenannte Versiegelungsgrad. Dieser beschreibt das Verhältnis der versiegelten Flächen zu entsprechenden Gesamtfläche und widerspiegelt somit die Intensität der Bodenversiegelung (Henninger, 2011). Die Überbauung natürlicher und durchlässiger Oberflächen gilt laut Kuttler (2011) als Hauptursache für die Entstehung städtischer Wärmeinseln.

Die thermischen Eigenschaften von Materialien und der Einfluss der Albedo

Baumaterialien mit einer hohen Wärmespeicherkapazität und geringem Albedowert absorbieren tagsüber große Mengen an Wärme, die sie nachts wieder an die Umgebung abgeben. Die Albedo gibt an, wie viel Sonnenstrahlung von einer Oberfläche reflektiert wird. Helle Flächen reflektieren deutlich mehr Licht und Wärme und bleiben daher kühler, was zu einem hohen Albedowert führt. (Yang et al., 2015) Dieser Wert wird in einem Bereich von 0 bis 100 Prozent gemessen, wobei 0 % eine sehr geringe Albedo darstellt (keine Reflektion der Lichtstrahlen) und 100 % eine maximale Albedo bedeutet (volle Reflektion der Strahlen) (Balzer, 2024). Im Sommer können Materialien mit einer geringen Albedo Temperaturen von bis zu 80°C erreichen (Liébard & DeHerdé, 2005, zitiert nach Giguère, 2009). Bei der Auswahl von Baumaterialien legen Stadtplaner und Architekten oft den Schwerpunkt auf technische Anforderungen wie Sicherheit, Langlebigkeit und Kosten, was die klimatischen Auswirkungen dieser Materialien oft in den Hintergrund treten lässt (Giguère, 2009).

In einer Studie von Doulos et al. (2004) wurden verschiedene Materialien auf ihre Eignung für den Einsatz im städtischen Außenbereich untersucht. Ziel war es, Materialien zu identifizieren, die zur Senkung der Umgebungstemperatur und zur Bekämpfung des Wärmeinseleffekts beitragen. Die Ergebnisse zeigten, dass Faktoren wie Farbe, Oberflächenstruktur und das verwendete Material einen entscheidenden Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften, insbesondere auf die Albedo der Materialien, haben. Raue und dunkel gefärbte Oberflächen neigen dazu, mehr Sonnenstrahlen zu absorbieren als glatte und helle, weshalb sie deutlich wärmer sind. Die ungleichmäßige Temperaturverteilung auf bestimmten Oberflächen wurde durch Farbkontraste, Oberflächenrauigkeit und die Wärmeleitfähigkeit der Materialien verursacht. Baumaterialien wie Marmor, Mosaik und Stein weisen im Vergleich zu Kiesel, Pflastersteinen und Asphalt niedrigere Oberflächentemperaturen auf. Neben den thermischen Eigenschaften von Materialien spielt die Oberflächenrauigkeit auch für die Windverhältnisse einer Stadt eine wesentliche Rolle. Raue Oberflächen verringern die Windgeschwindigkeit erheblich und können dadurch die Kaltluftströme aus dem Umland oder aus unbebauten sogenannten Kaltluftproduktionsstätten erheblich abschwächen. Daher ist der bewusste Einsatz sogenannter „kalter“ Materialien in besonders heißen Städten von großer Bedeutung. In folgender Abbildung (Abb. 1) von Doulos et al., (2004) werden verschiedene Materialien dargestellt, wobei einige heller und andere dunkler sind. Auf der linken Seite sind sie unter normalen Lichtverhältnissen fotografiert, während auf der rechten Seite die jeweilige Oberflächentemperatur mithilfe einer Infrarotkamera erfasst wird. Es ist deutlich zu erkennen, dass die dunkleren Materialien eine höhere Temperatur aufweisen als die helleren Fliesen.

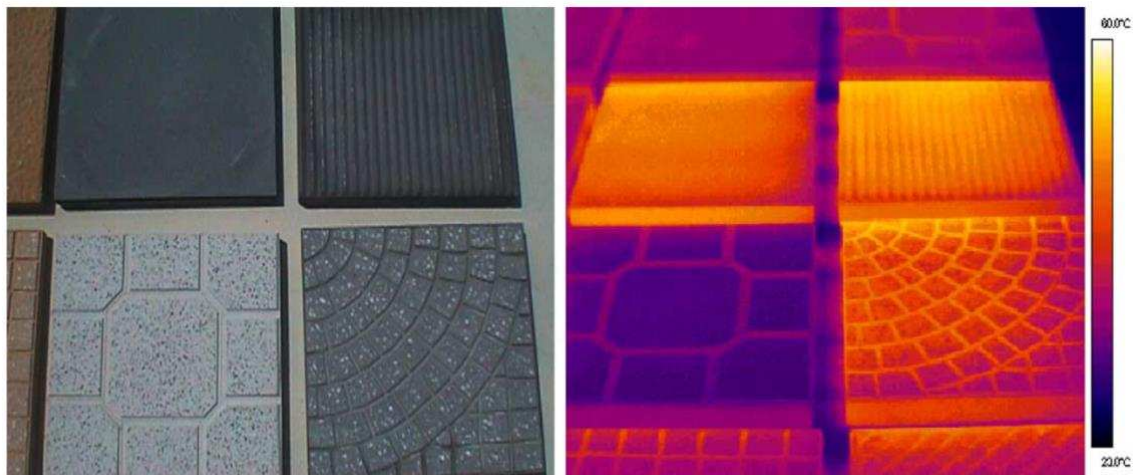


Abb. 1 Sichtbares und infrarotes Bild ausgewählter Baumaterialien (Quelle: Doulos et al., 2004: 235)

Größe der Städte

Die Größe von Städten hat einen entscheidenden Einfluss auf die Entstehung urbaner Hitzeinseln (Hupfer, 2008). Auch wenn dieser Zusammenhang, unter anderem von Böhm (1998), nicht immer uneingeschränkt anerkannt wird, gilt die Einwohnerzahl einer Stadt als eine der zuverlässigsten und vor allem einfachsten Methoden, um den Zusammenhang zwischen Stadtgröße und der Intensität urbaner Hitzeinseln zu quantifizieren (Hupfer, 2008). Die unten abgebildete Grafik (Abb. 2) zeigt den Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und maximaler Temperaturerhöhung im Zentrum verschiedener Städte. Die Daten verdeutlichen den Effekt der städtischen Wärmeinsel. Mit zunehmender Einwohnerzahl steigt die Temperaturdifferenz zwischen dem städtischen Zentrum und dem Umland. Die Unterschiede zwischen den abgebildeten Regionen (Asien, Europa, USA/Kanada) weisen auf die unterschiedlichen Bauweisen, Stadtplanungen oder Klimazonen hin. Diese Grafik unterstreicht den Einfluss der Urbanisierung auf lokale Temperaturerhöhungen und den damit verbundenen Effekt der städtischen Wärmeinseln. (Schönewiese, 2024)

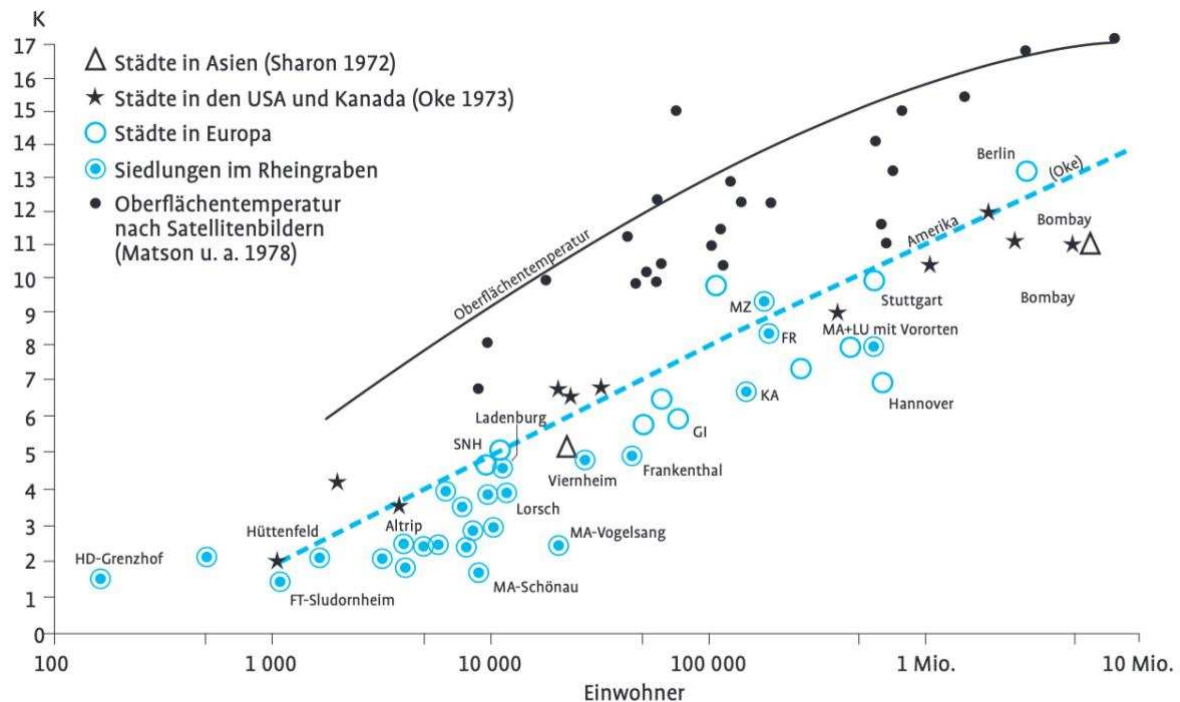


Abb. 2 Maximale Temperaturabweichung im Zentrum von Siedlungen gegenüber dem Umland (Quelle: Schönwiese 2024: 293)

Auch Hupfer (2008) betont in seinem Buch die Abhängigkeit der maximalen städtischen Wärmeinselintensität von der Einwohnerzahl. Er untersuchte dabei Städte in Nordamerika, Westeuropa, Japan und Korea. Die unterschiedlichen Steigungen in den Regressionsfunktionen erklärt er mit den Variationen in der Gebäudestruktur, Bebauungsdichte, dem Anteil an Grün- und Wasserflächen sowie dem Energieverbrauchsverhalten der jeweiligen Stadtbevölkerung. In seinen Untersuchungen, bei denen er sich auf die Daten von Matzarakis (2001) bezieht, zeigt sich, dass Nordamerika eine höhere UHI-Intensität aufweist als Westeuropa, obwohl die Einwohnerzahl vergleichbar ist. Dieser signifikante Temperaturunterschied wird durch die höhere anthropogene Wärmeproduktion, insbesondere durch die Klimatisierung von Gebäuden in nordamerikanischen Städten, erklärt. Henninger (2011), der ebenfalls die Daten von Matzarakis (2001) verwendet, erkennt darin zudem einen Zusammenhang zwischen den verwendeten Baumaterialien und der Intensität urbaner Hitzeinseln. In japanischen und koreanischen Städten mit einer Einwohnerzahl unter 300.000 wird traditionell überwiegend mit Holz gebaut, während Städte mit einer größeren Bevölkerung moderneres Baumaterial nach europäischem Standard verwenden. Daraus lässt sich schließen, dass Holz im Vergleich zu

modernerer Materialien vorteilhaftere thermische Eigenschaften besitzt und somit zu einer geringeren Wärmeakkumulation beiträgt.

Böhm (1998) hält diese Art von Untersuchung für wenig aufschlussreich. Seiner Ansicht nach hängen die Effekte urbaner Hitzeinseln vielmehr von stadtspezifischen Faktoren ab, die nicht allein durch allgemeine Größen wie die Einwohnerzahl erfasst werden können:

„This way of proceeding may not be adequate to describe the real structure of the urban heat island and its forcing factors. [...] Equally, heat island intensity is not directly influenced by the number of inhabitants but by factors like energy release, thermal comfort habits, fractions of paved, concrete, grassland, park and forest areas within the city, the number of buildings and so on.“ (Böhm, 1998: 114)

Stadtgeometrie

Die Stadtgeometrie beschreibt die räumliche Anordnung, Höhe und Form von Gebäuden sowie die Breite, Ausrichtung und Vernetzung von Straßen und Freiflächen innerhalb einer urbanen Umgebung und spielt eine zentrale Rolle bei der Entstehung urbaner Hitzeinseln. In dicht bebauten Stadtgebieten führt eine schlechte Anordnung und Struktur von Gebäuden dazu, dass Wärme gespeichert und nur verzögert wieder abgegeben wird. Besonders Hochhäuser und enge Straßenschluchten beeinflussen die Luftzirkulation erheblich, indem sie die natürliche Ventilation einschränken und den Austausch zwischen warmer Stadtluft und kühlerer Umgebungsluft reduzieren. Eine starke Bebauungsdichte beeinflusst zudem die Luftströmungen innerhalb der Stadt. In stark versiegelten und dichten Stadtstrukturen entstehen durch begrenzten innerstädtischen Luftaustausch Wärmenester, die den Hitzeinseleffekt erhöhen. (Rüfenacht & Acero, 2017)

4.4.3 Geographische Einflussfaktoren

Topographische Gegebenheiten

Verschiedene topografische Gegebenheiten können städtische Wärmeinseln sowohl begünstigen als auch vermindern. Es macht einen erheblichen Unterschied, ob eine Stadt an einem Hang, in einem Tal oder in einer Becken- oder Insellage liegt. Darüber hinaus sind die

Unterschiede zwischen Städten an der Küste und solchen im Landesinneren deutlich spürbar. (Henninger, 2011)

Auch Schönwiese (2024) beschreibt den topographischen Einfluss am Beispiel der Stadt Stuttgart. Aufgrund ihrer geographischen Beckenlage und der dichten Bebauung wird der Zustrom von Kalt- und Frischluft aus dem Umland stark eingeschränkt. Dies führt dazu, dass sowohl tagsüber als auch nachts extreme städtische Wärmeinseln entstehen können. Sofern diese nicht durch starke Winde aufgelöst werden, bildet sich in dieser Beckenlage ein thermisches Tiefdruckgebiet. Dieses Tiefdruckgebiet erzeugt eine strömende Luftbewegung in Richtung Stadt, die als Flurwind bezeichnet wird. Wenn jedoch der Flurwind durch zu dichte Bebauung blockiert wird, kann die Zufuhr von frischer und kühler Luft aus dem Umland unterbrochen werden, was die städtische Überhitzung verstärkt.

Entfernung zu großen Wasserkörpern

Die Nähe zu großen Gewässern beeinflusst das Klima einer Stadt maßgeblich. Verdunstungsprozesse in der Umgebung von Seen und Meeren führen zu einem maritimen Klima, das sich durch eine hohe Luftfeuchtigkeit im Sommer auszeichnet. Dies sorgt für eine schwüle Hitze, die sich deutlich von der trockeneren Hitze in Städten im Landesinneren unterscheidet. Hohe Temperaturen werden vom Menschen als weniger belastend empfunden, wenn die Luftfeuchtigkeit niedrig ist, während schwüle, heiße Luft den Organismus stärker beansprucht. (Henninger, 2011) Jedoch wie bereits im Kapitel 4.4.1 erläutert, führt laut Lei et al. (2020) eine hohe Luftfeuchtigkeit zu einem erhöhten Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre, wodurch die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche verringert wird. Dadurch wird der Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land bei der nächtlichen Abkühlung kleiner, was die nächtlichen UHI-Effekte abschwächt. Aus diesen beiden Quellen lässt sich ableiten, dass die Nähe zu einem großen Gewässer einerseits das Wohlbefinden der städtischen Bevölkerung beeinträchtigen kann, während sie gleichzeitig einen positiven Einfluss auf die Verminderung urbaner Hitzeinseln haben kann.

Die Nähe zum Meer kann jedoch auch positive Effekte haben, die das Wohlbefinden der Bevölkerung spürbar steigern. Die umliegende Meeresluft begünstigt lokale bis regionale Windzirkulationen, die kühlere Luft in die Stadt transportieren und somit den thermischen Komfort deutlich verbessern können (Rüfenacht & Acero, 2017).

4.5 Gesundheitliche, wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen

Städtische Wärmeinseln haben sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf Gesundheit, Wirtschaft und Ökologie (Grewe, 2016). Inwiefern die Nachteile überwiegen und welche Herausforderungen damit verbunden sind, wird im folgenden Kapitel erläutert.

4.5.1 Gesundheitliche Auswirkungen

Städtische Wärmeinseln können erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben, insbesondere durch die Verstärkung extremer Hitzeereignisse. Urbane Hitzeinseln führen zu einer erhöhten Mortalität und Morbidität. Besonders gefährdet sind ältere Menschen, Kinder, chronisch Kranke, sozial isolierte Menschen, Obdachlose, Personen, die im Freien arbeiten sowie Menschen mit körperlichen oder geistigen Einschränkungen. In den Ländern der Europäischen Union ist zu erwarten, dass die Mortalität pro Grad Celsius Temperaturanstieg oberhalb des regionalen Schwellenwerts um 1–4 % zunimmt. (Grewe, 2016)

Hoeckner et al. (2020) beschreiben in ihrem Artikel die Auswirkungen von Hitzeperioden anhand von Zahlen. Im August 2003, einem besonders heißen Monat, wurden in Europa rund 45.000 hitzebedingte Todesfälle verzeichnet, wobei die Sterblichkeit in dem Zeitraum in Deutschland um 29 % anstieg. Eine deutschlandweite Analyse aller Sterbe- und Krankenhausdaten von 1999 bis 2008 zeigt zudem, dass an besonders heißen Tagen die Sterblichkeit in der Altersgruppe über 30 Jahre um 10 % höher liegt.

Im Jahr 2018 starben in Österreich 766 Menschen vorzeitig infolge extremer Hitze. Das sind rund 357 mehr als die Zahl der Todesopfer im Straßenverkehr. Prognosen zufolge werden im Jahr 2040 etwa 2,5 Millionen Menschen in Österreich über 65 Jahre alt sein. Angesichts dieser demografischen Entwicklung ist es umso dringender erforderlich, Maßnahmen gegen hitzebedingte Gesundheitsrisiken zu ergreifen. (VCÖ, 2019)

Wichtig ist hierbei zu betonen, dass diese Todesfälle nicht direkt durch urbane Hitzeinseln verursacht werden. Vielmehr sind sie die Folge allgemein längerer und intensiverer Hitzewellen, die durch den Klimawandel sowohl in ländlichen als auch in städtischen Gebieten zunehmen. Urbane Hitzeinseln sind dabei ein Phänomen, das die Auswirkungen von Hitze in Städten zusätzlich verstärken kann aufgrund zuvor beschriebener Ursachen.

Ein positiver Aspekt des urbanen Hitzeinsel-Effekts zeigt sich in den Wintermonaten. Städte verzeichnen weniger Frost- und Eistage, und die Schneedecke bleibt im Vergleich zum Umland deutlich kürzer liegen. (Henninger, 2020)

4.5.2 Wirtschaftliche Auswirkungen

Aus wirtschaftlicher Perspektive bieten urbane Hitzeinseleffekte insbesondere in Klimazonen mit Winterzeiten gewisse Vorteile. Die verkürzte Frostperiode führt zu einem geringeren Energiebedarf für Heizungen, was eine Reduktion der Heizgradtage zur Folge hat und somit Einsparungen bei den Heizkosten ermöglicht. Diese Energieeinsparung wird jedoch durch den anhaltenden Trend der Nutzung von Klimaanlage verringert. (Henninger, 2020) In subtropischen Regionen spielt der Energiebedarf im Winter eine untergeordnete Rolle. Hier wirkt sich der Energieverbrauch für die Gebäudeklimatisierung in den Sommermonaten wirtschaftlich deutlich stärker aus. Neben der dafür nötigen höheren Kraftwerksleistung und dem damit verbundenen erhöhten CO₂-Ausstoß stellen Klimaanlage auch eine zusätzliche direkte Wärmequelle dar und sind somit weitere anthropogene Wärmeemittenten. (Kuttler, 2011) Aflaki et al. (2016) beschreibt in seinem Artikel, dass eine Senkung der Umgebungstemperatur, welche durch den Einsatz von UHI- Minderungsstrategien erreicht wird, kann die Kühllast von den Gebäuden effektiv verringern und somit eine deutliche Energieeinsparung in heißen Jahreszeiten bewirken.

Die beschriebenen positiven und negativen Folgen in unterschiedlichen Klimazonen verdeutlichen, dass der regionale Aspekt des globalen Klimawandels einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat, beziehungsweise in Zukunft haben wird (Kuttler, 2004).

4.5.3 Ökologische Auswirkungen

Auch das städtische Pflanzenleben wandelt sich durch das erhöhte Wärmeangebot. Zum einen beginnt die Vegetationsperiode früher, und es gibt mehr wintergrüne Pflanzenarten. Zum anderen verbreiten sich zunehmend frost- und kälteempfindliche, lichtliebende sowie stickstoffliebende Pflanzenarten, während feuchtigkeitsliebende Arten seltener werden. (Henninger, 2020) Hupfer (2008) erkennt in der Veränderung der städtischen Pflanzenwelt die Möglichkeit, die Blatt- und Blütenentwicklung verschiedener Pflanzenarten als Indikator für ihre Reaktion auf bestehende Umwelteinflüsse und Ereignisse, wie etwa urbane Hitzeinseln, zu nutzen (Pflanzenphänologie).

4.6 Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln

Um die Vielzahl der Maßnahmen zu ordnen, werden sieben Unterkapitel unterschiedlicher Ansatzpunkte betrachtet: von der Erhöhung einer Vegetation und der Anpassung der Städtegeometrie bis hin zur Verwendung innovativer Materialien, einer verstärkten Nutzung von Wasserflächen und der Förderung nachhaltiger Mobilität. Neben direkten baulichen Maßnahmen spielen auch Energieeffizienz und Beschattungsstrategien eine zentrale Rolle. Gemeinsam bilden diese Ansätze ein umfassendes Konzept zur Abkühlung städtischer Räume und zur Verbesserung des urbanen Klimas. (Santamouris, 2014)

4.6.1 Vegetation

Die Erhöhung der Vegetation gilt in nahezu allen Studien als eine der wirkungsvollsten Strategien zur Abschwächung urbaner Wärmeinseln. Pflanzen bieten eine Vielzahl an Vorteilen, die das Stadtklima positiv beeinflussen. Ihre erhöhte Albedo im Vergleich zu anderen städtischen Oberflächen, ihre geringe Wärmeleitfähigkeit und die kühlenden Effekte durch Evapotranspiration tragen maßgeblich zur Temperatursenkung bei. (Farshid et al., 2021) Darüber hinaus sorgt Vegetation für eine effektive Beschattung horizontaler Erd- und vertikaler Gebäudeoberflächen. Dadurch wird der Wärmegewinn durch Sonneneinstrahlung reduziert, was den thermischen Komfort in städtischen Gebieten verbessert. Ein weiterer bedeutender Vorteil zeigt bei der Energieeffizienz: Die Beschattung von Gebäuden führt zu einer Absenkung der Raumlufttemperatur und senkt somit den Energiebedarf für die Innenraumkühlung erheblich. (Rüfenacht & Acero, 2017) Neben diesen klimatischen Effekten bietet städtische Vegetation weitere wichtige ökologische Vorteile. Sie erhöht die Wasserrückhaltefähigkeit, bindet Staub und Kohlendioxid und fördert die Biodiversität in urbanen Räumen (Wang et al., 2021).

Die Wahl der geeigneten Baumart zur Erhöhung der Vegetation hängt maßgeblich von der urbanen Morphologie und dem Standort ab (Morakinyo, 2020). Laut der Studie von Morakinyo (2020), die den „Right tree, right place – Ansatz“ verfolgt, ist eine gezielte Auswahl entscheidend, um die urbane Hitze effektiv zu reduzieren. Demnach besitzen Bäume mit dichter Belaubung das größte Potenzial zur Hitzereduktion, da sie nicht nur großflächigen Schatten spenden, sondern auch durch eine erhöhte Verdunstungskühlung zur Temperatursenkung beitragen. Dabei spielen die Standortwahl und der damit verbundene Himmelsschichtfaktor (siehe Kapitel 4.6.2) eine wesentliche Rolle. In Bereichen mit einem niedrigen Himmelsschichtfaktor sind hohe Bäume mit moderater bis dichter Belaubung und einem hohen Stamm vorteilhaft, da sie die Luftzirkulation nicht übermäßig beeinträchtigen. In

offenen Gebieten mit einem hohen Himmelsschichtfaktor hingegen sind Bäume mit einer dichten Krone und hohem Stamm besonders wirksam, da sie dort die Hauptquelle für Schatten und Kühlung darstellen, da Gebäude in dem Fall kaum zur Beschattung beitragen. Zudem variiert die Wahl der Baumarten je nach den vorherrschenden klimatischen Bedingungen erheblich, sodass eine an den jeweiligen Standort angepasste Auswahl entscheidend für die Effektivität der Maßnahme ist.

Zu der Kategorie „Vegetation“ gehören folgende Maßnahmen:

- Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen (Santamouris, 2014).
- Erhaltung und Ausweitung des Bestands an (Straßen-)Bäumen (Santamouris, 2014).
- Förderung von „urban farming“: Stadtfarmen können auf ungenutzten urbanen Flächen wie Dächern, verlassenen Gebäuden oder brachliegenden Grundstücken eingerichtet werden, um den Anbau von Lebensmitteln zu ermöglichen und gleichzeitig den Grünanteil in der Stadt zu erhöhen. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Begrünung von Fassaden und Dächern (Santamouris, 2014).

4.6.2 Stadtgeometrie

Wie bereits im Kapitel 4.4.2 beschrieben beeinflusst die Geometrie einer Stadt die thermische Leistung urbaner Gebiete maßgeblich. Eine durchdachte Platzierung von Gebäuden und Straßen kann nicht nur Schatten spenden, sondern auch die Frischluftzufuhr und Windzirkulation fördern. Dies trägt zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität in Straßenräumen bei und reduziert das Risiko lokaler Überhitzung. (Rüfenacht & Acero, 2017)

In dicht bebauten Stadtgebieten absorbieren vertikale Gebäudeflächen sowohl direkte Sonnenstrahlung als auch die von benachbarten Gebäuden reflektierte Strahlung. Durch den oft geringen Himmelsschichtfaktor, ein Maß für die Offenheit eines städtischen Freiraums gegenüber dem Himmel, wird die Luftzirkulation weiter eingeschränkt, und die langwellige Wärmeabstrahlung reduziert. Flächen mit niedriger Albedo oder starker Exposition heizen sich unter diesen Bedingungen besonders schnell auf. (Kuttler, 2011)

Die folgende Abbildung verdeutlicht, dass in dicht bebauten Stadtzentren die kurzwellige Rückstrahlung zwischen vertikalen Gebäudeflächen verstärkt auftritt, während die langwellige Abstrahlung durch den geringen Himmelsschichtfaktor blockiert wird. Infolgedessen entstehen

höhere Temperaturen als wie im Umland. (MA 22, 2015)

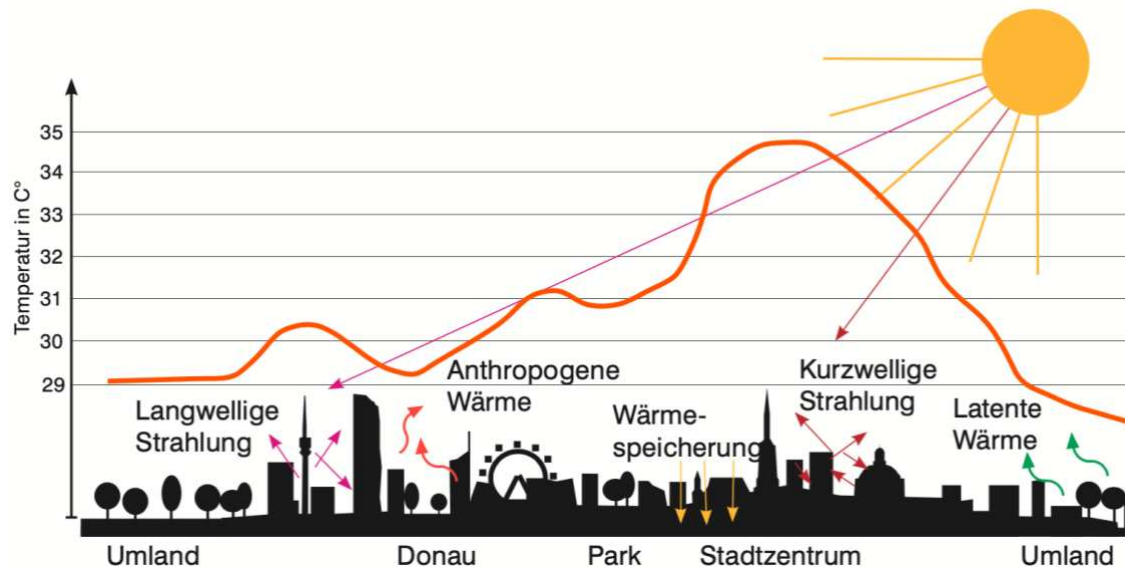


Abb. 3 Das Energiebudget von Siedlungsgebieten und der UHI- Effekt (Quelle: MA 22, 2015: 7)

Auf einer übergeordneten räumlichen Ebene spielt bei der Stadtgeometrie eine durchdachte Stadtplanung eine zentrale Rolle, um das regionale Klima optimal zu nutzen. Dabei geht es insbesondere darum, Luftströmungen gezielt zu lenken und geeignete Luftkorridore zu schaffen, die in das Stadtgebiet hineinreichen. Solche Korridore tragen dazu bei, angestaute Wärme effektiv abzutransportieren und das städtische Mikroklima zu verbessern. Ein anschauliches Beispiel für eine solche stadtplanerische Maßnahme ist die Schaffung von Durchlässigkeit in Gebäuden durch gezielte Öffnungen oder Lücken in horizontaler und vertikaler Ausrichtung. (Rüfenacht & Acero, 2017) Die folgende Abbildung zeigt ein Gebäude in Singapur, dessen offene Architektur die Luftzirkulation optimal fördert und so die Luftdurchlässigkeit maximiert.



Abb. 4 Hochhaus in Singapur mit einer horizontal offenen Bauweise (Quelle: Privataufnahme)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Stadtgeometrie eine langfristige und wirkungsvolle Maßnahme für die Stadtplanung darstellt, um städtische Hitzeinseln zu reduzieren. Durch eine gezielte Gestaltung kann zudem das Potenzial topografischer und klimatischer Gegebenheiten, wie beispielsweise häufig auftretende Winde, optimal genutzt werden. (Rüfenacht & Acero, 2017).

Zu der Kategorie „Stadtgeometrie“ gehören folgende Maßnahmen:

- Eine Erhöhung des Himmelsschichtfaktors: Er reicht von 0 bis 1. Ein Himmelsschichtfaktor von 1 bedeutet zum Beispiel, dass der Himmel vollständig sichtbar ist und es keine Hindernisse gibt. (Kuttler, 2011)
- Verbesserte Streckungsverhältnisse: Ein Streckungsverhältnis beschreibt das Verhältnis von Gebäudehöhe zur Straßenbreite in einer Straßenschlucht. Es wird

üblicherweise ermittelt, indem die durchschnittliche Höhe der Gebäude durch die Breite der Straße dividiert wird. (Rüfenacht & Acero, 2017)

- Optimales Verhältnis zu mittleren Gebäude- und Baumhöhen: Das Verhältnis der Höhen von mittleren Gebäuden und Bäumen beeinflusst den Schattenwurf der Bäume auf die Fassaden. Dadurch wird die Oberflächenerwärmung reguliert. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Angepasste Gebäudeformen: Die geometrische Gestaltung und Anpassung einzelner Gebäude oder ganzer Gebäudekomplexe, um eine optimale Luftzirkulation zu gewährleisten. Zum Beispiel fördern runde Kanten im Gegensatz zu scharfen Kanten viel eher eine Luftzirkulation. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Variation der Gebäudehöhen: Unterschiedliche Höhen der Gebäude fördern ebenfalls eine bessere Durchlüftung, da sie die Windströmung positiv beeinflussen können (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Vergrößerung der Straßenbreite: Eine Vergrößerung der Straßenbreite verbessert den Luftaustausch in Straßenschluchten und fördert die Entstehung von Windkorridoren, die in dicht bebauten Stadtbereichen für eine effektive Belüftung sorgen (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Erhaltung der gesamten städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume (Santamouris, 2014).

4.6.3 Erhöhung des urbanen Wasseranteils

Wasser im öffentlichen Raum trägt durch Verdunstung zu einer spürbaren Abkühlung und einer verbesserten Luftqualität bei und fördert so das Wohlbefinden der Menschen in städtischen Gebieten. Besonders effektiv ist bewegtes Wasser, wie zum Beispiel Springbrunnen, da durch den erhöhten Verdunstungseffekt eine stärkere kühlende Wirkung entsteht. Auch Fließgewässer spielen eine bedeutende Rolle bei der Abkühlung urbaner Räume. Je nach Ausrichtung zur Hauptwindrichtung können sie als wichtige Luftleitbahnen dienen und so das Mikroklima positiv beeinflussen. Es gibt zahlreiche Ansätze, den Wasseranteil in einer Stadt zu erhöhen. Eine Möglichkeit besteht darin, Wasserinstallationen im öffentlichen Raum zu integrieren, wie etwa Springbrunnen, Trinkbrunnen, Hydranten mit Sprühaufsätzen oder Anlagen zur Erzeugung von Sprühnebel. Darüber hinaus können Wasserspielplätze, Wasserflächen in Parks, Fließgewässer sowie ein integratives

Regenwassermanagement dazu beitragen, den Anteil an Wasserflächen im urbanen Raum nachhaltig zu steigern. (Mathey et al., 2012, zitiert nach MA 22, 2015)

Da Wasserkörper und die damit verbundene Verdunstung die Luftfeuchtigkeit erhöhen, eignet sich diese Maßnahme besonders für heiß-trockene Klimazonen. In feuchtwarmen Regionen, wie beispielsweise Singapur, sind die positiven Effekte jedoch begrenzt. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Zu der Kategorie „Erhöhung des urbanen Wasseranteils“ gehören folgende Maßnahmen:

- Bewässerung durch intelligentes Regenwassermanagement: Um Trinkwasser für die Bewässerung von Grünflächen zu sparen, kann Regenwasser gesammelt und zwischengespeichert werden. Dies lässt sich beispielsweise durch unterirdische Zisternen oder Teiche realisieren, die das Niederschlagswasser zurückhalten und gleichzeitig eine natürliche Verdunstung ermöglichen. (MA 22, 2015)
- Durch Entsiegelung die Verdunstung des Regenwassers fördern: Regenwasser soll direkt vor Ort auf verschiedensten entsiegelten Flächen (z.B.: Schotterrassen) verdunsten können. Zusätzlich ist bei dieser Maßnahme der Einsatz von luft- und wasserdurchlässigen Materialien vorgesehen wie zum Beispiel offener Asphalt. (MA 22, 2015)
- Schaffung von mehr Wasserinstallationen (MA 22, 2015).
- Bereitstellung von mehr Trinkwasser (z.B. durch Trinkbrunnen) (MA 22, 2015).
- Erhöhung des Anteils an Wasserflächen (z.B. mit Hilfe von einem höheren Einsatz von „blue roofs“ oder „rain gardens“) (Giguère, 2009).
- Freilegen von verrohrten Gewässern (MA 22, 2015).
- Bau und Erhalt eines Wassereinzugsgebiet: Ein Wassereinzugsgebiet ist eine in die natürliche Landschaft integrierte Fläche, die das Regenwasser auffängt und in andere Gewässer abfließen lässt (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Förderung von Trockenbrunnen: Nehmen abfließendes (Regen-)Wasser auf und lassen es leicht in den Boden einsickern. Bringt in Bereichen von Dachabflüssen viele Vorteile und ist leicht zu installieren. (Giguère, 2009)
- Besprühen von Flächen, um die Oberflächentemperatur zu mindern (Giguère, 2009).

4.6.4 Materialien und Oberflächen

Wie bereits im Kapitel 4.4.2 dargelegt, spielen die verwendeten Baumaterialien eine entscheidende Rolle bei der Intensität von urbanen Hitzeinseln. Daher sollte die Gestaltung des städtischen Raums gezielt auf die thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien ausgerichtet sein. Es ist wichtig, sowohl die optischen als auch die verschiedenen physikalischen Eigenschaften zu analysieren, um Straßen- und Gebäudeoberflächen effektiv und passiv kühlen zu können. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Faktoren wie Farbe, Oberflächenstruktur und das verwendete Material haben einen entscheidenden Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften, insbesondere auf die Albedo der Materialien. Raue und dunkel gefärbte Oberflächen neigen dazu, mehr Sonnenstrahlen zu absorbieren als glatte und helle, weshalb sie deutlich wärmer sind. Baumaterialien wie Marmor, Mosaik und Stein weisen im Vergleich zu Kiesel, Pflastersteinen und Asphalt niedrigere Oberflächentemperaturen auf. Daher ist der bewusste Einsatz sogenannter „kalter“ und weiterer innovativer Materialien in besonders heißen Städten von großer Bedeutung. (Dolous et al., 2004)

Zu der Kategorie „Materialien und Oberflächen“ gehören folgende Maßnahmen:

- Einsatz heller und wasserdurchlässiger Oberflächen im Fußgänger- und Straßenbereich (Santamouris, 2013).
- Einsatz von Oberflächen mit photokatalytischen Eigenschaften: Oberflächen, die mit speziellen Mischungen oder Zusatzstoffen behandelt werden, um die Oberflächen möglichst lang sauber zu lassen, um folglich die Sonnenreflexion zu maximieren. Dieser Vorgang kann vor, während oder nach dem Einbau stattfinden und ist für Straßen, Gehsteige und Gebäudehüllen anwendbar. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Einsatz heller Materialien auf Dächern (cool roofs): Verringert die Wärmeabgabe an die darunter liegenden Geschoße und führt automatisch zu einer Senkung des Kühlenergieverbrauches (Santamouris, 2014).
- Einsatz richtungsreflektierender Materialien: Richtungsreflektierende Oberflächen, die durch eine hohe Albedo die Fähigkeit haben, die Sonnenstrahlen in eine bestimmte Richtung reflektieren zu können. In Städten mit einer starken Sonneneinstrahlung zeigt sich diese Maßnahme als sehr wirksam. Jedoch kann es in dicht bebauten Städten zu einer Überhitzung und Blendung benachbarter Gebäude kommen. (Rüfenacht & Acero, 2017)

- Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM): Materialien die als ein Latentwärmespeicher fungieren und einen hohen Anteil an Kälte- und Wärmeenergie speichern können. Je nach Bedarf kann Wärme phasenverschoben wieder abgeben werden. Diese Materialien wechseln ihren Zustand – von fest zu flüssig und umgekehrt, wenn sie Wärme aufnehmen oder abgeben. (Lee et al., 2006)
- Einsatz von Materialien mit Trockenmittelsystemen: Sie entziehen der Luft Feuchtigkeit, sodass weniger Energie für die Verdunstungskühlung benötigt wird. Stattdessen wird die Wärme direkt abgeführt, was die Kühlung effizienter macht und das Raumklima angenehmer gestaltet. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Einsatz einer Wasserkühlung in Gebäuden (Fernkälte): Fassadenkühlsysteme mit Wasserkühlung, wie etwa die Fernkälte in Wien, leiten Wärme nach außen ab, indem sie gekühltes Wasser in die Fassade integrieren und durch Verdunstung für eine effiziente Kühlung sorgen (Wien Energie GmbH, 2024).
- Einsatz thermochromer und selektiver Materialien: Reflektierende Materialien, die auf nanotechnologischen Zusätzen basieren. Diese reagieren auf ihre thermische Umgebung und ändern je nach Temperaturanstieg ihre Farbe. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Einsatz dynamischer und aktiver Dächer/ Fassaden: Durch eine dynamische Anpassung von Fassaden oder Dächern an die aktuellen Wetterbedingungen kann die Effizienz eines Gebäudes optimiert werden. Ziel dieser Maßnahme ist es, die thermisch-energetische Leistung zu verbessern. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Verbesserung der Wärmedämmung von Gebäuden: Eine effektive Wärmedämmung reduziert den Wärmeeintrag in Gebäude, minimiert die Abgabe gespeicherter Wärme an die Umgebung und senkt den Energieverbrauch durch eine weniger intensive Kühlung (MA 22, 2015).
- Verringerung des Anteiles an Fensterflächen sowie der Glasanteil an Fassaden (MA 22, 2015).

4.6.5 Beschattung

Die gezielte Beschattung in urbanen Gebieten reduziert die direkte Sonneneinstrahlung auf Freiräume und Wege. Dadurch wird die Aufheizung von Oberflächen verringert, was zu einer spürbaren Verbesserung des Mikroklimas führt. Besonders auf großen Plätzen spielt Beschattung eine zentrale Rolle, da diese sonst in den warmen Monaten von den

Bewohner:innen gemieden werden könnten. Eine angenehme Beschattung trägt somit unmittelbar zum Wohlbefinden der Menschen bei. Zusätzlich können Beschattungselemente verschiedenste Witterungseinflüsse wie Schnee und Regen abhalten. Allerdings kann eine dichte Beschattung in städtischen Gebieten auch Nachteile mit sich bringen. Sie kann die nächtliche Wärmeabstrahlung behindern und die natürliche Durchlüftung einschränken. Daher sind Planungsrichtlinien erforderlich, um die Beschattung von Außenbereichen wie Straßen, Plätzen oder Parks nicht nur zu fördern, sondern auch zu kontrollieren, um die urbane Qualität der Räume zu verbessern. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Zu der Kategorie „Beschattung“ gehören folgende Maßnahmen:

- Beschattung von Freiflächen, Gebäuden, Sitzgelegenheiten und Wegen mit Hilfe von Dächern, Bäumen, Markisen, Pergolen, Arkaden, Sonnensegeln (MA 22, 2015).
- Einsatz von Photovoltaik- Anlagen als Beschattungselemente (MA 22, 2015).
- Einsatz von beweglichen Beschattungselementen: Bewegliche Beschattungselemente passen sich flexibel an den Sonnenstand und die Wetterbedingungen an, wodurch sie effizienter für eine Beschattung genutzt werden können (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Optimierte Gebäudeausrichtungen für eine Schattenbildung (Rüfenacht & Acero, 2017).

4.6.6 Transportmittel

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind unmittelbare Wärmequellen und tragen maßgeblich zu urbaner Hitzeinseln bei. Eine der gängigsten Maßnahmen zur Reduzierung dieses Effekts besteht darin, das Verkehrsaufkommen in Städten zu verringern. Die von einem Fahrzeug erzeugte Wärmemenge steht in direktem Zusammenhang mit seiner Durchschnittsgeschwindigkeit. Daher kann jede Maßnahme, die zu einer Reduzierung des Verkehrsaufkommens in einem Verkehrssystem führt, als Beitrag zur Minderung urbaner Hitzeinseln betrachtet werden. Solche Maßnahmen reichen von der generellen Reduzierung der Fahrzeugnachfrage bis hin zu optimierten Verkehrsführungen. Darüber hinaus bestehen technische Lösungen, die den Energieverbrauch und somit auch die Wärmeemissionen im Verkehrssektor minimieren können. Ergänzend dazu gibt es Strategien, die sich gezielt mit der Verringerung des von Fahrzeugen ausgehenden Wärmeflusses befassen und gleichzeitig den Komfort der täglichen Pendler:innen verbessern. (Rüfenacht & Acero, 2017) Ein weiterer wesentlicher Punkt in dieser Kategorie ist die Kühlung öffentlicher Verkehrsmittel. Obwohl

diese Maßnahme keinen direkten Einfluss auf das städtische Mikroklima hat und somit keine unmittelbare Lösung zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln darstellt, trägt sie dennoch erheblich zum Wohlbefinden der täglichen Pendler:innen bei. (MA 22, 2015)

Zu der Kategorie „Transportmittel“ gehören folgende Maßnahmen:

- Reduzierung des Fahrzeugbestandes: Zum Beispiel durch Erhöhung der damit verbundenen Preise (Rüfenacht & Acero, 2017) oder durch ein Beschränkungsverbot an Tagen während einer Hitzewelle (Giguère, 2009).
- Steigerung der Attraktivität und Qualität öffentlicher Verkehrsmittel: Erhöht man die Attraktivität und die Qualität öffentlicher Verkehrsmittel werden stärkere Anreize für ihre Nutzung geschaffen (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Einsatz von „Centralised routing systems“: Da manche Straßen häufig überlastet sind, während andere kaum genutzt werden, soll ein zentrales Routingsystem die Fahrten aller Nutzer:innen analysieren und optimale Routen berechnen, um den Verkehrsfluss effizienter zu gestalten (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Das Ersetzen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor durch Elektrofahrzeuge. Sowohl im Individual- als auch im öffentlichen Verkehr lässt sich der Einsatz elektrisch betriebener Fahrzeuge gezielt fördern. Diese tragen dazu bei, die Entstehung direkter Wärmequellen zu reduzieren. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Förderung autonomer Mobilität: Durch autonome Mobilität kann die Effizienz des Verkehrssystems gesteigert werden und somit der Kraftstoffverbrauch und die Wärmeemission verringert werden (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Einsatz heller Fahrzeugfarben. Helle Lackierungen reflektieren mehr Sonnenlicht, wodurch die Wärmeaufnahme reduziert und die Wärmestrahlung erhöht wird. Dies senkt die Kühllast der Fahrzeuge und ist insbesondere bei öffentlichen Verkehrsmitteln einfach umzusetzen. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Kühlung von ober- und unterirdischen Verkehrsanlagen: Durch den Einsatz von Klimaanlage, passiven Lüftungssystemen und der gezielten Beschattung offener Verkehrsbereiche kann eine wirksame Temperaturregulierung gewährleistet werden (MA 22, 2015). Die Kühlung geschlossener Verkehrsanlagen kann als nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Klimaanlage durch den Einsatz von Erdwärmeanlagen erfolgen. Diese ermöglichen es, im Winter die Stationen zu beheizen und im Sommer überschüssige Wärme effizient abzuleiten. Die Stadt Wien hat in diesem Bereich eine

internationale Vorreiterrolle übernommen. (Wiener Linien GmbH & Co KG, 2008, zitiert nach MA 22, 2015)

4.6.7 Energie

Die durch die städtischen Wärmeinseln erhöhte Temperatur beeinflusst den Energieverbrauch für Heizung und Kühlung je nach Jahreszeit positiv oder negativ. Im Winter reduziert der UHI-Effekt den Heizbedarf und damit auch den Energieverbrauch, während er im Sommer den Kühlbedarf und somit den Energieaufwand erhöht. (Rüfenacht & Acero, 2017) Durch gezielte Strategien zur Minderung des städtischen Wärmeinseleffekts lässt sich die Umgebungstemperatur senken. Dies trägt dazu bei, die Kühllast von Gebäuden zu reduzieren und führt insbesondere in heißen Jahreszeiten zu erheblichen Energieeinsparungen. (Aflaki et al., 2016) Im Energiesektor stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, um den Effekt urbaner Hitzeinseln zu verringern. Ziel dabei ist es, den Energieverbrauch in unterschiedlichen Bereichen zu senken und gleichzeitig die Energieeffizienz von Geräten sowie in Wohn-, Gewerbe- und Industriesektoren zu verbessern (Giguère, 2009).

Zu der Kategorie „Energie“ gehören folgende Maßnahmen:

- Reduktion des Wärmeverlustes in Gebäuden: Durch eine Reduzierung der Wärmeverluste in Gebäuden und eine optimierte Luftdichtheit wird der Energiebedarf für die Raumkühlung gesenkt. Dadurch gelangt weniger Wärme in die Atmosphäre, was sich positiv auf das Phänomen urbaner Hitzeinseln auswirkt. (Rüfenacht & Acero, 2017)
- Energieeffizienz von Klimatisierungssystemen: Dazu gehört nicht nur die Modernisierung von Klimageräten, sondern auch die gezielte Planung von ausreichend belüfteten Außenbereichen, um die abgeführte Wärme effizient an die Atmosphäre abzugeben (Rüfenacht & Acero, 2017).
- Verbesserung der Energieeffizienz von Haushalts- und Bürogeräten sowie Geräte im Industriesektor (Giguère, 2009).
- Einsatz moderner Kühltechnologien: Darunter zählen zum Beispiel: „[...] kontrollierte Wohnraumlüftung [...], solare Kühlung [...], Lüftungsanlagen mit Kühlung durch Zuluft über das Erdreich, geothermische Kühltechnologien sowie thermische Bauteilaktivierung bzw. Betonkernaktivierung.“ (MA 22, 2015, S. 64).
- Einsatz einer Wasserkühlung in Gebäuden (Fernkälte) (Rüfenacht & Acero, 2017).

- Optimierter Einsatz des künstlichen Lichtes: Einsatz von energieeffizienter und zeitgeschaltener Beleuchtung, um die ableitende Wärme zu reduzieren (Giguère, 2009).

5 Internationale Strategien

5.1 Wien

5.1.1 Klimatische Bedingungen

Österreich und Wien befinden sich in der kühl-gemäßigten Klimazone (nemorale Zone), die durch die vorherrschenden außertropischen Westwinde geprägt ist, auch als zyklonale Westwinddrift bekannt. Diese Winde sorgen für ein ganzjährig feuchtes (humides) Klima mit hoher Bewölkung, moderaten Temperaturschwankungen im Jahresverlauf und einem niederschlagsreichen Winter. Das Klima ist durch einen Wechsel zwischen polaren Kaltlufteinbrüchen aus dem Norden und warmen, mediterranen Luftmassen aus dem Süden geprägt, was zu einem insgesamt instabilen Wettergeschehen führt. Zusätzlich liegt Österreich im Übergangsbereich zwischen ozeanischem und kontinentalem Klima. Das ozeanische Klima, beeinflusst durch den Atlantik, bringt milde Winter, kühle Sommer und eine relativ hohe Niederschlagsmenge mit sich. Im Gegensatz dazu sorgt das Kontinentalklima für ausgeprägtere Temperaturunterschiede über das Jahr hinweg, mit heißen Sommern und kalten Wintern. Dieser Mix aus beiden Klimazonen verleiht Österreich und insbesondere Wien ein vielfältiges und dynamisches Wetter. (Pfadenhauer & Klötzli, 2014) Wien ist durch seine topographischen Gegebenheiten von einem natürlichen Windkanal geprägt, der als Düseneffekt bekannt ist. Dieser tritt besonders bei für ganz Österreich typischen West- und Nordwestwinden auf, wenn der anströmende Luftstrom zwischen den Hügeln des Wienerwaldes, etwa im Wiental, sowie entlang der Donau kanalisiert wird, insbesondere in der sogenannten Wiener Pforte zwischen Bisamberg und Leopoldsberg. Dadurch erhöht sich die Windgeschwindigkeit, sodass Wien häufig von starken Nordwestwinden beeinflusst wird. (Schwab & Steinicke, 2003)

Im Jahr 2024 erreichte Wien eine durchschnittliche Temperatur von 13,6 °C und wurde damit zum wärmsten Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Während die Monate März, Juli und September ungewöhnlich trocken ausfielen, führten intensive sommerliche

Starkregenfälle sowie die besonders niederschlagsreichen Monate April, November und Dezember zu einem deutlichen Anstieg der Gesamtniederschlagsmenge um 23 Prozent im Vergleich zum Durchschnitt. (Wetter - Offizielle Statistik der Stadt Wien, 2024)

Im Jahr 2024 wurde in Wien eine neue Rekordzahl an Hitzetagen verzeichnet. Die untenstehende Grafik verdeutlicht die Zunahme an Tagen, an denen eine Temperatur von 30°C oder mehr gemessen wurde. An der Wetterstation „Hohe Warte“ wurden im Jahr 2024 insgesamt 45 Hitzetage registriert. (Wetter - Offizielle Statistik der Stadt Wien, 2024) Die Wetterstation in der Inneren Stadt mit 52 Hitzetagen hat sogar noch höhere Werte gemeldet (GeoSphere Austria, 2024). Besonders interessant ist die zeitliche Entwicklung dieses Trends. Laut der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG, 2012) lag die durchschnittliche Anzahl an Hitzetagen in Wien zwischen 1961 und 1990 bei 9,6 Tagen pro Jahr. Im Zeitraum von 1981 bis 2010 stieg dieser Wert deutlich auf 15,2 Hitzetage jährlich an. Laut Damyanovic et al. (2016) lässt sich ein Anstieg der durchschnittlichen Temperaturen prognostizieren. So wird für das Jahr 2040 im Osten Österreichs im Vergleich zu 1980 eine Temperaturerhöhung erwartet, die je nach Jahreszeit variiert: um 1,3 bis 1,8 °C im Winter, 1,8 bis 2,5 °C im Frühling, 2,0 bis 2,5 °C im Sommer und 0 bis 2,5 °C im Herbst.

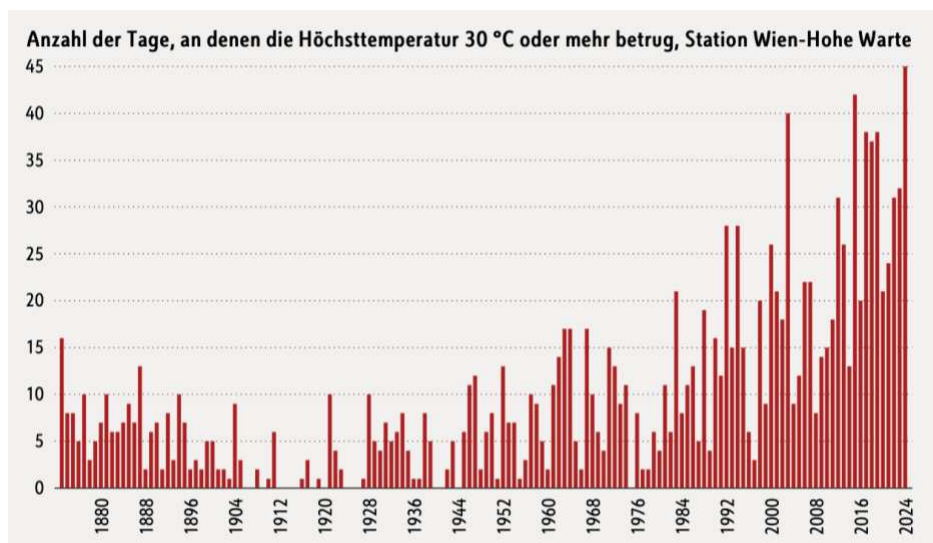


Abb. 5 Jährliche Hitzetage in Wien seit 1873 (Quelle: Wetter - Offizielle Statistik der Stadt Wien, 2024)

5.1.2 Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln in Wien

Laut Kuttler (2011) gilt die Überbauung natürlicher und durchlässiger Oberflächen als Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln in Wien. Dieser Effekt wird durch die fortschreitende Reduktion und Fragmentierung städtischer Grünflächen weiter verstärkt. Zusätzlich tragen

Abwärmequellen wie industrielle Prozesse, Klimaanlage und Kraftfahrzeuge zur Erhöhung der städtischen Temperaturen bei.

Auch die Bebauungsstruktur und Gebäudegeometrie spielen eine entscheidende Rolle in Wien. Sie erhöhen die Oberflächenrauigkeit, wodurch die Windgeschwindigkeit abnimmt und die natürliche Luftzirkulation behindert wird. Dies führt dazu, dass kühlende Luftströme aus sogenannten Kaltluftproduktionsgebieten nicht oder nur eingeschränkt in die Stadt gelangen (genauer in Kapitel 5.1.5), was den Hitzeinseleffekt weiter verstärkt (MA 22, 2015). Die folgende Abbildung von Damyanovic et al. (2016) veranschaulicht die nächtlichen Temperaturunterschiede zwischen der Peripherie und dem Stadtzentrum anhand einer Isothermenkarte. Diese macht die urbanen Hitzeinseln, also die Umrisse stark bebauter und versiegelter Flächen, wie Parkplätze oder Industriegebiete, deutlich sichtbar. Gleichzeitig sind auch kühlere Bereiche, etwa Parks, Gewässer oder landwirtschaftlich genutzte Flächen, erkennbar, da sie im Gegensatz zu den versiegelten Flächen grüne und somit temperaturmindernde Zonen darstellen.

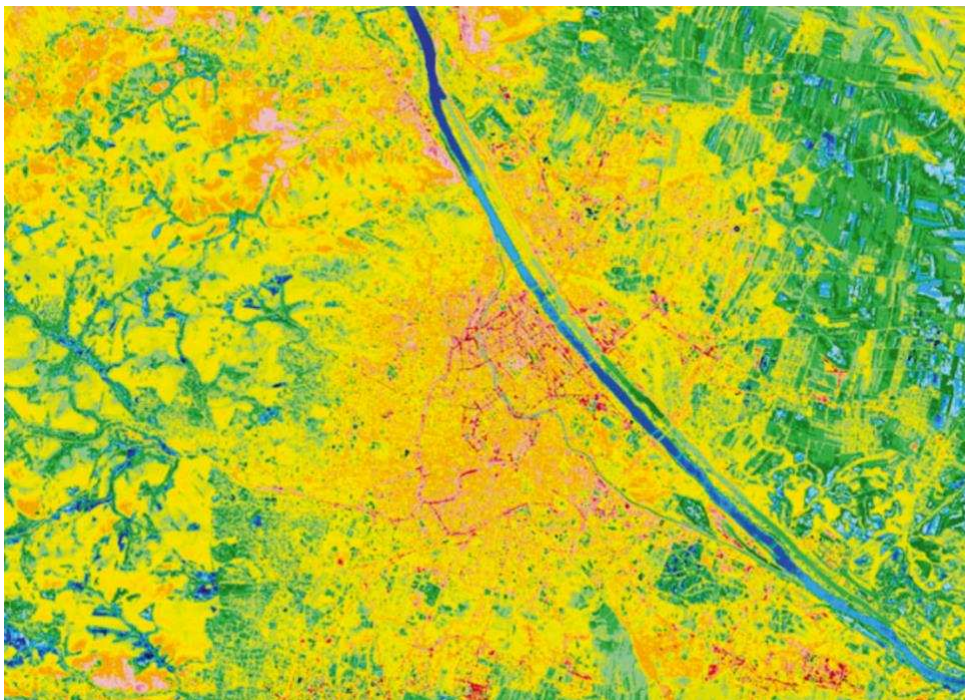


Abb. 6 Wärmebild von Wien und Umgebung bei Nacht (Quelle: Damyanovic et al., 2016 zitiert nach MA 22, 2015: 263)

Der zeitliche Verlauf urbaner Hitzeinseln in Wien ist besonders in windstillen und wolkenlosen Sommernächten am deutlichsten ausgeprägt. Die in der Stadt verwendeten Baumaterialien mit hoher Wärmespeicherfähigkeit absorbieren während des Tages große Mengen an Wärme

und geben diese auch nach Sonnenuntergang, teils bis in die frühen Morgenstunden, allmählich an die Umgebung ab. (MA 22, 2015)

Zusammenfassend lässt sich entnehmen, dass die Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln in Wien die zunehmende Überbauung natürlicher und durchlässiger Oberflächen sind sowie die fortschreitende Reduktion und Fragmentierung städtischer Grünflächen (Kuttler, 2011). Zusätzlich tragen Abwärmequellen wie industrielle Prozesse, Klimaanlage und Verkehr zur Erwärmung der Stadt bei. Die Bebauungsstruktur und Gebäudegeometrie spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle, da sie die Windgeschwindigkeit reduzieren und die Luftzirkulation behindern, wodurch kühlende Luftströme nur eingeschränkt in die Stadt gelangen (MA 22, 2015).

5.1.3 „UHI- STRAT“

Der UHI–STRAT (Urban heat Island – Strategieplan) ist ein Strategieplan der Stadt Wien, entwickelt von der Wiener Umweltabteilung (MA 22), der gezielte Maßnahmen zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln vorstellt. Dieser Plan dient nicht nur der Planung zukünftiger Projekte, sondern dokumentiert auch bereits erfolgreich umgesetzte Initiativen, die zur Minderung des UHI-Effekts in Wien beitragen sollen. Ziel der vielfältigen Maßnahmen ist es, das Stadtklima auf unterschiedlichen Ebenen nachhaltig zu verbessern. In enger Zusammenarbeit mit zahlreichen Fachabteilungen und Kooperationspartner:innen setzt die Stadt Wien auf Fortschritte in den Bereichen Klima, Naturschutz, Landschaftsplanung, Städtebau und Architektur, um eine lebenswertere und widerstandsfähigere Stadt zu schaffen. Zu Beginn des Projekts wurde eine umfassende internationale Literaturanalyse durchgeführt, um Ansätze zu ermitteln, die dazu beitragen können, den urbanen Hitzeeffekt in Wien zu reduzieren. Diese Ansätze wurden hinsichtlich ihrer Effekte auf das Mikro- und Mesoklima, ihrer Auswirkungen auf Lebensqualität und Biodiversität sowie ihrer volkswirtschaftlichen Kosten bewertet. Im Rahmen von drei Workshops, die in den Jahren 2013 und 2014 stattfanden, wurden bestehende Praxisbeispiele aus Wien analysiert. Dabei lag der Fokus auf der konkreten Umsetzung der Maßnahmen, den Verantwortlichkeiten und der Entwicklung fächerübergreifender Lösungsvorschläge. Ein zentraler Bestandteil des Projekts bestand darin, die Realisierungsmöglichkeiten dieser Maßnahmen in verschiedenen Steuerungsebenen, Anwendungsfeldern und Planungsinstrumenten der Stadtentwicklung zu prüfen und darzustellen. (MA 22, 2015)

Die Stadt Wien setzt ihren Schwerpunkt auf die Sicherung und Weiterentwicklung der grünen (z.B. Straßenbegleitgrün) und blauen Infrastruktur (z.B. offene Wasserflächen), um die Aufenthaltsqualität im Freien zu verbessern und urbane Hitzeinseln zu vermeiden. Zu den zentralen Maßnahmen gehören der Ausbau von Straßenbegleitgrün, die Bereitstellung von Trinkwasser und anderen Wasserinstallationen sowie die aktive und passive Kühlung von Gebäuden. Darüber hinaus werden Freiflächen und Sitzgelegenheiten gezielt beschattet, während öffentliche Verkehrsmittel sowie deren offene und geschlossene Stationen mit Kühlmaßnahmen ausgestattet werden. Insgesamt sollen diese Maßnahmen das Wohlbefinden der Wiener Bevölkerung nachhaltig steigern. (MA 22, 2015)

Eine Analyse des UHI- STRAT Wiens von Damyanovic et al. (2016) verdeutlicht, dass sich der Strategieplan zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln zu einem zentralen Element vorausschauender Stadtplanung und einer integrativen Aufgabe entwickelt hat. Dabei stehen verschiedene Handlungsfelder, Steuerungsebenen und Planungsprozesse in einer wechselseitigen Beziehung.

5.1.4 Methode der Maßnahmenbewertung

Zur Bewertung der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf das Mikro- und Mesoklima, die Biodiversität, die Lebensqualität der Bevölkerung sowie die Errichtungs- und Erhaltungskosten hat die Stadt Wien eine sogenannte „Spiderweb-Grafik“ entwickelt. Diese wurde unter der Koordination der Wiener Umweltschutzabteilung erstellt und durch die Einbindung von Fachkräften aus verschiedenen Magistratsabteilungen (Magistrat der Stadtentwicklung und Stadtplanung, Magistrat der Architektur und Stadtgestaltung, Magistrat der Energieplanung, Magistrat der Stadtteilplanung und Flächennutzung, Magistrat der Stadterneuerung und Prüfstelle für Wohnhäuser, Magistrat der Wiener Stadtgärten, Magistrat der Wiener Gewässer, Magistratsdirektion für Bauten und Technik, Magistratsdirektion der Klimaschutzkoordination, Wiener Umweltanwaltschaft) sowie Expert:innen unterschiedlicher Fachrichtungen, wie die Vegetationsökologie und Meteorologie, wissenschaftlich fundiert bewertet. Gestützt hat man sich dabei auf eine umfassende Analyse internationaler und nationaler wissenschaftlicher Arbeiten. Zusätzlich hat man „Good- Practice- Beispiele“ herangezogen und diese mit geplanten und bereits abgeschlossenen Projekten zur Minderung urbaner Hitzeinseln in Wien verglichen. Die „Spiderweb- Grafik“ dient als mehrstufiges, kategorisiertes Bewertungssystem und ermöglicht eine anschauliche Visualisierung der jeweiligen Maßnahme im Kampf gegen urbane Hitzeinseln. In der folgenden Grafik wird

beispielhaft ein „Spiderweb“ dargestellt, das die Wirkung einer zweiseitigen Straßenallee-Begrünung veranschaulicht. Um eine einheitliche Vergleichbarkeit der Maßnahmen zu gewährleisten und die Bewertung mit Hilfe der „Spiderweb-Grafik“ anschaulich darzustellen, wurden den verschiedenen Abstufungen in den einzelnen Kategorien numerische Werte zugewiesen. Dabei wurden die Kategorien Mikro- und Mesoklima, Biodiversität sowie Lebensqualität mit einheitlichen Bewertungsstufen versehen. Ein Wert von 3 bedeutet eine „deutliche Verbesserung“, 2 steht für eine „Verbesserung“, 1 für eine „geringfügige Verbesserung“, 0 für eine „vernachlässigbare Auswirkung“ und -1 für eine „Verschlechterung“ der jeweiligen Kategorie. Im Beispiel der zweiseitigen Allee-Begrünung zeigt die Bewertung, dass diese Maßnahme eine deutliche Verbesserung des Mikroklimas bewirken würde. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Maßnahmen, also der wirtschaftlichen Errichtung und Erhaltung, wurden zusätzlich die Opportunitätskosten sowie eine Nutzungsdauer von zehn Jahren in die Berechnung einbezogen. Die dafür zuständigen Behörden haben dabei folgende Einstufung festgelegt: Ein Wert von 3 steht für „sehr niedrige bis keine Kosten“ für die Umsetzung der jeweiligen Maßnahme, 2 kennzeichnet „niedrige Kosten“, 1 steht für „mittelmäßige Kosten“, während -1 auf „hohe bis sehr hohe Kosten“ hinweist. In Bezug auf das Beispiel der zweiseitigen Allee-Begrünung lässt sich aus der Grafik ableiten, dass die Errichtung mit hohen bis sehr hohen Kosten verbunden ist, während der Erhalt dieser Maßnahme eine moderate wirtschaftliche Belastung darstellt. Insgesamt kann zusammenfassend festgestellt werden, dass ein höherer Zahlenwert in einer der sechs Maßnahmenkategorien eine insgesamt positivere Wirkung der jeweiligen Maßnahme signalisiert. (MA 22, 2015)

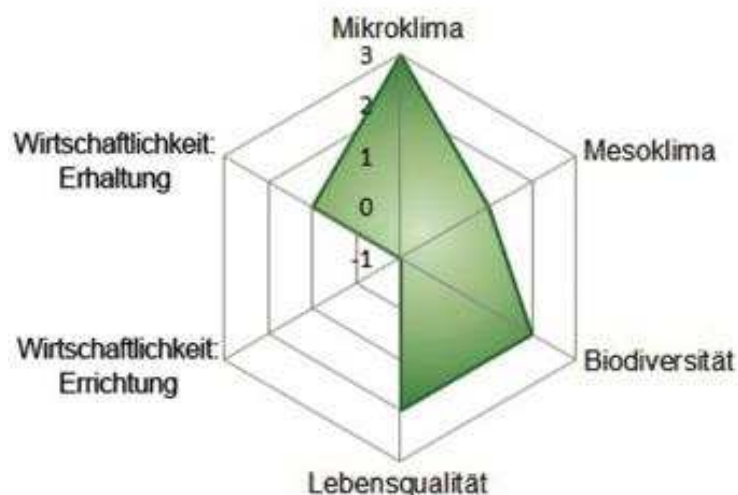


Abb. 7 Beispiel einer Spiderweb-Grafik zu einer Straßenbegleitbegrünung einer zweiseitigen Allee (Quelle: MA 22, 2015: 25)

5.1.5 Wirksamste Maßnahme gegen urbane Hitzeinseln in Wien

Um die effektivsten Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln in Wien zu ermitteln, wird untersucht, welche der bereits umgesetzten oder geplanten Maßnahmen im Bereich des Mikro- und Mesoklimas die besten Ergebnisse erzielt. Da urbane Hitzeinseln vor allem durch lokale Temperaturunterschiede entstehen, spielen das Mikroklima, das die unmittelbare Umgebung betrifft (z. B. Straßenzüge, Parks, Gebäude), und das Mesoklima, das größere städtische Bereiche umfasst, eine entscheidende Rolle bei deren Bekämpfung (Hupfer, 2006). Maßnahmen auf beiden Ebenen beeinflussen maßgeblich die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftzirkulation und sind daher wesentliche Faktoren zur Reduzierung der städtischen Wärmebelastung (MA 22, 2015). Dazu wird die zuvor beschriebene „Spiderweb“-Grafik analysiert und durch externe wissenschaftliche Literatur ergänzt.

Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume

Die laut „Spiderweb“- Grafik wohl effektivste Strategie zur Reduzierung urbaner Überhitzung in Wien ist die Sicherstellung einer funktionierenden Luftzirkulation sowie die gezielte Vernetzung von Freiräumen innerhalb der Stadt. Diese Maßnahme erzielt nicht nur die Bestwertung in den Bereichen Lebensqualität und Biodiversität, sondern erlangt als einzige auch die maximale Bewertung im Bereich des Mikro- und Mesoklimas (Abb. 8). (MA 22, 2015)

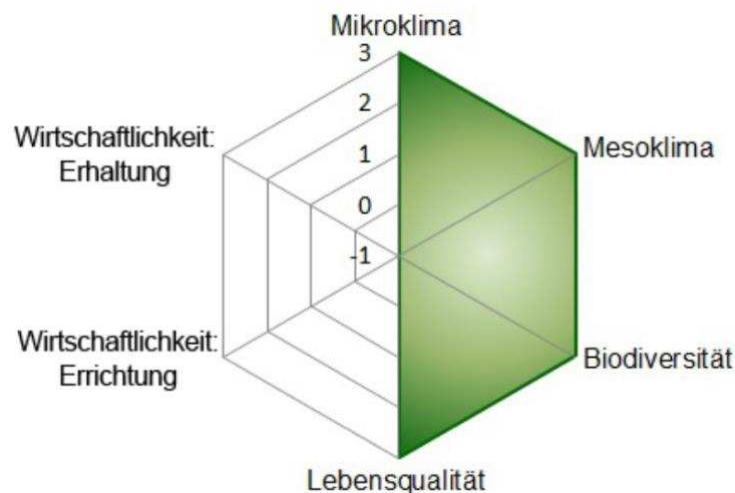


Abb. 8 Spiderweb- Grafik - Freiraumvernetzung mit Anbindung an Kaltluftproduktionsflächen (Quelle: MA 22, 2015: 29)

Besonders entscheidend bei dieser Maßnahme ist Anbindung von Kaltluftproduktionsflächen, wie land- und forstwirtschaftlichen Gebieten im Umland, an das innerstädtische Gebiet. Diese Flächen, die sich vor allem entlang der vorherrschenden Windrichtungen befinden, fördern die Durchlüftung der Stadt, transportieren aufgestaute Hitze ab und führen frische, kühle Luft zu. Dabei spielt die Topographie eine wesentliche Rolle, da Hanglagen die Luftbewegung begünstigen und insbesondere an windarmen Tagen eine wichtige Durchlüftungsfunktion übernehmen. Gleichzeitig fördern ebene, bewaldete sowie unbewaldete Grünflächen die Entstehung von Kaltluft. Daher ist es essenziell, sowohl die landschaftlichen Gegebenheiten als auch die vorherrschenden Windströmungen bei der Planung dieser Vernetzungen zu berücksichtigen. Neben der Schaffung und dem Erhalt von Kaltluftschneisen aus dem Umland ist auch die Vernetzung innerstädtischer Grün- und Freiflächen von großer Bedeutung. Diese dient nicht nur der Verbesserung der Luftzirkulation, sondern sorgt auch dafür, dass schadstoffbelastete Luftmassen effizient abtransportiert werden. Damit die Ventilationsbahnen ihre volle Wirkung entfalten können, sollten sie möglichst geringe Rauigkeit aufweisen, um den Luftstrom nicht zu bremsen. Besonders vorteilhaft sind hierfür Wiesen, Wasserflächen, Bachläufe oder breite Straßen. (MA 22, 2015) Laut Schwab und Steinicke (2003) sollte eine solche Luftleitbahn mindestens 50 Meter breit sein, um einen spürbaren Effekt zu erzielen. Die untenstehende Grafik zeigt das Hauptnetz der Grün- und Freiraumverbindungen, das im Rahmen des Projekts „Frei.Raum.Netz.Wien“ von der Magistratsabteilung 18 (Landschafts- und Freiraumplanung) erstellt wurde. Ziel dieses Projekts ist sowohl die langfristige Sicherung des Freiraumnetzes als auch die Reduktion urbaner Hitzeinseln. Die im Jahr 2011 entwickelte Grafik veranschaulicht eine konkrete Umsetzung dieser Strategie, insbesondere durch den Grünkorridor, der sich vom Vorland des Bisambergs und dem Marchfeldkanal im Norden Wiens bis zur Alten Donau und weiter in den Süden erstreckt. Dieser Korridor übernimmt zahlreiche stadtoökologische Funktionen, vor allem als Frischluftschneise und zur Verbesserung der Lufthygiene. Damit eine solche Luftleitbahn ihre volle Wirkung entfalten kann, muss die vorherrschende Windrichtung berücksichtigt werden. Wie im Kapitel 5.1.1 beschrieben, weht der Wind in Wien überwiegend aus westlicher oder nordwestlicher Richtung, weshalb dieser Grünkorridor optimal angelegt ist. (MA 22, 2015)

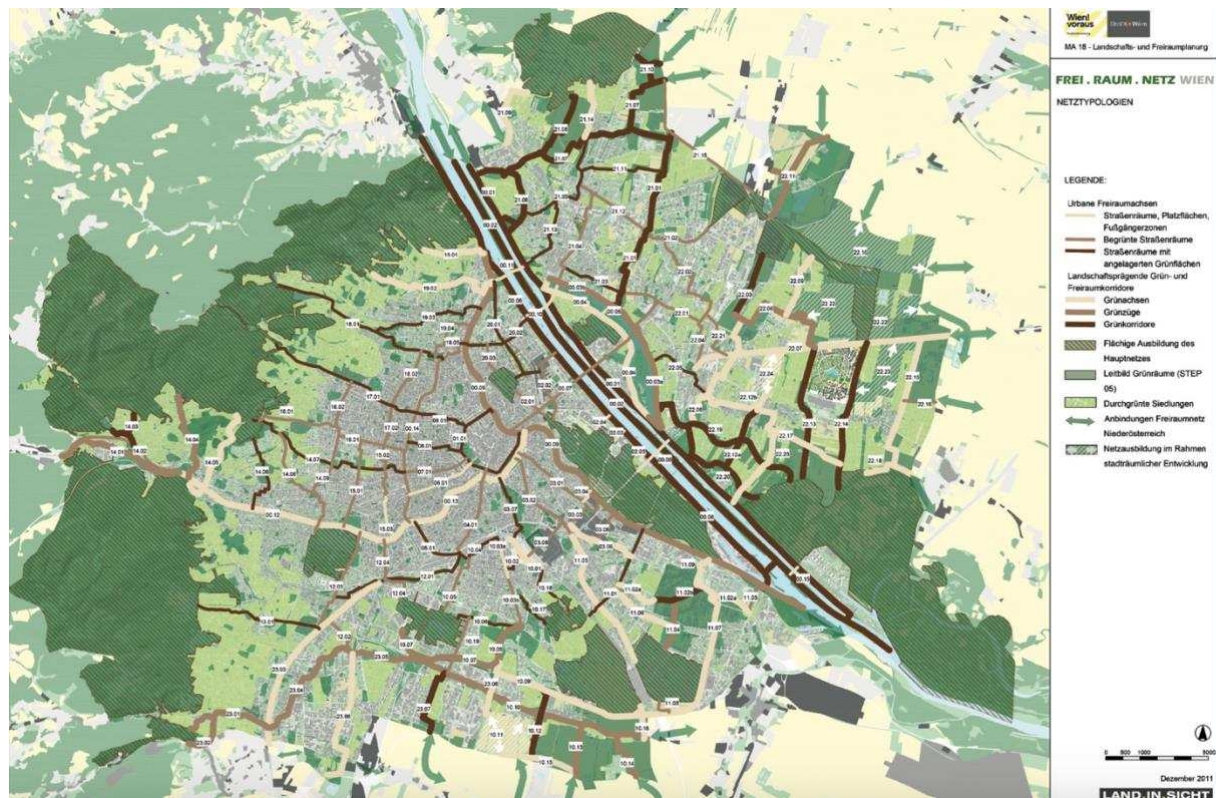


Abb. 9 Frei.Raum.Netz.Wien (Quelle: MA 22, 2015: 28)

Auch der Waldbestand im Umland und innerhalb der Stadt weist eine hohe Bedeutung im Zusammenhang dieser Maßnahme auf. Wie bereits im Kapitel 4.4.2 erläutert und am Beispiel Quebecs veranschaulicht, führt der Verlust des Waldbestandes zu einer verringerten Frischluftzufuhr und einer Verschlechterung der Luftqualität (Giuguere, 2009). Daher spielt die Erhaltung des Waldbestandes im Umland Wiens eine entscheidende Rolle bei der Prävention und Reduktion urbaner Hitzeinseln.

Auch die Oberflächenstrukturen bebauter Flächen, verwendeter Materialien und vorherrschenden Ventilationsbahnen spielen eine wesentliche Rolle für diese Maßnahme (Doulos et al., 2004). Wie im Kapitel 4.4.2 anhand der Untersuchungen von Doulos et al. (2004) dargelegt, können raue Oberflächen die Windgeschwindigkeit erheblich reduzieren und somit die Kaltluftströme aus dem Umland oder aus unbebauten Kaltluftentstehungsgebieten deutlich abschwächen.

Wie im Kapitel 4.6.2 beschrieben, spielt auch die Stadtgeometrie eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung der Windzirkulation und der Frischluftzufuhr in einer Stadt (Kuttler, 2011). Durch eine durchdachte städtebauliche Planung kann die Gebäudeanordnung so gestaltet werden, dass bestimmte Luftkorridore, wie der zuvor erwähnte Grünkorridor, der sich vom

Vorland des Bisambergs und dem Marchfeldkanal im Norden Wiens bis zur Alten Donau und weiter nach Süden erstreckt, gezielt und effektiver gelenkt werden. Dies ermöglicht eine effizientere Ableitung von Wärme und trägt zur Verbesserung des Stadtklimas bei. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Die Umsetzung einer solchen Maßnahme zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln ist mit verschiedenen Herausforderungen verbunden. Zum einen stehen oft konkurrierende stadtplanerische Ziele im Raum, etwa eine höhere Bebauungsdichte, eine bestimmte Stadtstruktur oder das Wachstum der Bevölkerung. Zudem können bestehende bauliche Strukturen die Planung und Realisierung erheblich erschweren. Die Interessen der beteiligten Grundstückseigentümer:innen sind dabei häufig unterschiedlich und in vielen Fällen primär wirtschaftlich motiviert. Ein weiterer entscheidender Faktor ist die notwendige Zusammenarbeit zwischen Wien und dem angrenzenden Niederösterreich. Aufgrund bürokratischer und gesetzlicher Rahmenbedingungen gestaltet sich diese Kooperation jedoch oft als komplex und herausfordernd. Außerdem, wird im UHI-STRAT beschrieben, dass in den heißen Sommermonaten die sogenannten „Pusztawinde“ auftreten können. Diese wehen aus dem Südosten und bringen aufgeheizte Luft aus der ungarischen Tiefebene in Richtung Wien. Ist das der Fall, dann führen die regionalen Luftleitbahnen kaum zu einer Abkühlung der urbanen Gebiete. (MA 22, 2015)

Die Studie von Damyanovic et al. (2016) verdeutlicht außerdem, dass die Maßnahme zur Sicherung der Frischluftzufuhr aus dem kühlen Umland, aufgrund der städtischen Struktur nicht überall in der Stadt gleichermaßen wirksam ist. Sowohl der UHI-STRAT der Stadt Wien (2015) als auch in der Studie von Damyanovic et al. (2016) verweisen daraufhin auf eine Kombination kleinräumig angewendeter Maßnahmen wie die Beschattung, Aufhellung der Oberflächen, Nutzung von Verdunstungskälte, Verringerung der Bebauungsdichte und die Vergrößerung der Grün- und Wasserflächen. Deshalb wird empfohlen, für geplante Stadtentwicklungsprojekte spezielle Studien durchzuführen, um die erwarteten Effekte besser einschätzen zu können. So lassen sich pauschale Annahmen vermeiden und realistischere Maßnahmen in die Stadtplanung integrieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die topografische Lage Wiens und die vorherrschenden Winde einen bedeutenden Vorteil bieten, der unbedingt genutzt werden sollte. Durch eine gezielte Optimierung der städtischen Luftzirkulation und die bessere Vernetzung von Freiräumen können diese natürlichen Gegebenheiten ideal integriert werden. Zwar erweist sich diese Maßnahme als grundsätzlich wirkungsvoll, sie allein reicht jedoch nicht

aus. Ungünstige städtische Strukturen, bürokratische Hürden und schwankende Windverhältnisse schränken ihre Wirksamkeit ein. Eine nachhaltige Reduktion urbaner Hitzeinseln in Wien erfordert daher eine Kombination mehrerer kleinräumiger Maßnahmen, um urbane Hitzeinseln gezielt zu minimieren.

Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen

Eine weitere äußerst effektive Maßnahme zur Minderung des Urban Heat Island-Effekts, wie sie im Strategieplan der Stadt Wien beschrieben wird, ist die Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiflächen. Obwohl Wien über zahlreiche dieser Flächen verfügt, sind sie durch die heterogene Bebauungsdichte und städtische Strukturen stark fragmentiert. Die klimatischen Effekte dieser Maßnahme hängen maßgeblich von der Vegetationsausstattung, der Größe und der Verteilung der Grünflächen und das sowohl innerhalb dieser Areale als auch in angrenzenden Bereichen. Das Hauptziel dieser Maßnahme besteht darin, trotz des hohen Nutzungsdrucks, andere Interessen zu berücksichtigen und gleichzeitig bestehende Grün- und Freiflächen langfristig zu sichern. Darüber hinaus sollen land- und forstwirtschaftliche Flächen erhalten, deutliche Abkühlungseffekte erzielt und die Luftqualität verbessert werden. Diese positiven Effekte gehen über die direkten Grünräume hinaus und wirken sich auch auf das städtische Umfeld aus. Zusätzlich trägt die Maßnahme zur Förderung der Biodiversität sowie zur Unterstützung der Wasserrückhaltung bei. (MA 22, 2015)

Ein konkreter Ansatz, den die Stadt Wien mithilfe der „Spiderweb“-Grafik analysiert und bewertet hat (Abb. 10), ist die Errichtung neuer Parks. Insbesondere großflächige Parks mit einer Ausdehnung von mehr als 50 Hektar zeigen maximale Wirksamkeit in den Bereichen Mikro- und Mesoklima, Biodiversität und Lebensqualität und erweisen sich somit als äußerst effektive Maßnahme zur Verbesserung des Stadtklimas. (MA 22, 2015)

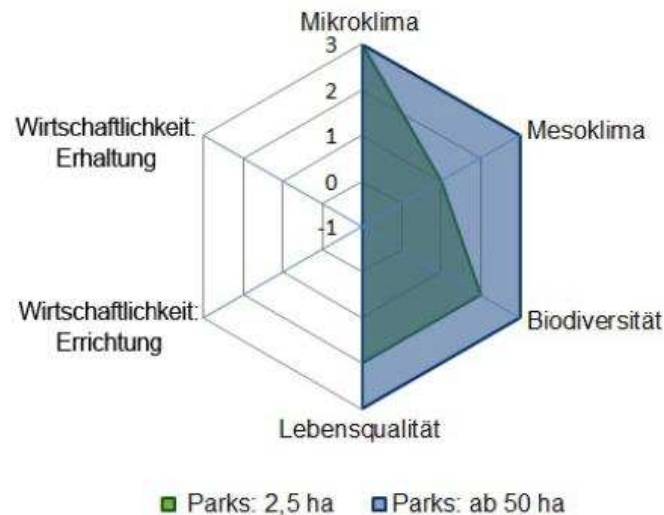


Abb. 10 Spiderweb- Grafik - Errichtung von Parks (Quelle: MA 22, 2015: 40)

Bei ausreichender Bewässerung weisen Parks eine hohe Verdunstungsrate auf und heizen sich deutlich langsamer auf als versiegelte Flächen. Studien zeigen, dass Grünflächen ab einer Größe von 10 Hektar etwa die doppelte Umgebung positiv beeinflussen können. (MA 22, 2015) Laut Mathey et al. (2011) sind größere Parkanlagen noch wirkungsvoller. Parks mit einer Fläche von mindestens 50 Hektar weisen eine besonders positive klimatische Wirkung, sowohl auf das direkte Umfeld als auch auf angrenzende Gebiete, auf und haben dadurch einen erheblichen Einfluss auf das Mikro- und Mesoklima Wiens. Zudem haben die Untersuchungen gezeigt, dass größere Parkanlagen stärkere Abkühlungseffekte erzielen als mehrere kleinere Grünflächen mit der gleichen Gesamtfläche. Kleinere, gleichmäßig über die Stadt verteilte Freiflächen bieten hingegen den Vorteil, dass sie schneller erreichbar sind und kurzfristig Erholung bei Hitzewellen ermöglichen.

Zudem beeinflussen sie ihre direkte Umgebung positiv, indem sie angrenzende Stadträume klimatisch aufwerten. Daher ist eine umfassende Durchgrünung der Stadt besonders wichtig und sowohl großflächige als auch kleinteilige Maßnahmen zu kombinieren sinnvoll. Wien verfolgt bereits seit Längerem den Ansatz, großflächige Parks sowohl in der Planung als auch in der Umsetzung zu integrieren. Die größten Herausforderungen bei der Schaffung großflächiger Parks ist der zunehmende Mangel an verfügbaren Flächen für den Bau leistbaren Wohnraums und die hohen Kosten für die Errichtung und den Erhalt, was zu einem Zielkonflikt führt. (MA 22, 2015)

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei solch einer Erhöhung der Vegetation ist, dass die Wahl der Baumarten zur jeweiligen Stadtmorphologie passen muss, wie bereits in Kapitel 4.6.1 erläutert.

Zudem sollte darauf geachtet werden, dass Parks nicht in einer Luftschneise angelegt werden, da dies die Luftzirkulation beeinträchtigen könnte. (Morakinyo, 2020)

Sicherung und Anlage bestehender und zusätzlicher Waldflächen

Wälder spielen eine zentrale Rolle in der urbanen Klimaanpassung, da sie nicht nur eine effektive Kaltluftproduktion ermöglichen, sondern durch den verzögerten Kaltluftabfluss auch tagsüber zur Abkühlung beitragen. Zudem spenden die Baumkronen großflächigen, natürlichen Schatten, wodurch eine Überhitzung innerhalb dieser Waldgebiete selten und schwer möglich ist. Neben ihren positiven Effekten auf das Stadtklima verbessern Bäume und weitläufige Wälder durch ihre Sauerstoffproduktion und die Fähigkeit CO₂ zu speichern, spürbar die Luftqualität. In Wien erstrecken sich rund 8.000 Hektar Wald (Stand 2015), und diese Fläche wächst jährlich um etwa 50.000 bis 100.000 Quadratmeter. Um diesen wertvollen Waldbestand langfristig zu sichern, bedarf es einer nachhaltigen Pflege und Aufforstung. Dabei spielt eine ausgewogene Baumartenzusammensetzung sowie eine gezielte Mischwuchsregelung eine entscheidende Rolle, um die Stabilität und Widerstandsfähigkeit der Wälder zu fördern. Darüber hinaus ist die natürliche Verjüngung zu unterstützen, während gleichzeitig klimaresiliente Waldbestände entwickelt werden, um nachhaltige und zukunftsorientierte Vorteile zu gewährleisten. Neben der kühlenden Wirkung dieser Maßnahme stehen vor allem die Schaffung neuer Erholungsgebiete sowie die Entlastung naturschutzfachlich bedeutender Gebiete, wie etwa der Lobau in Wien, im Mittelpunkt. Zudem soll ein Rückzugsraum für Tiere entstehen und die Biodiversität gezielt gefördert werden. (MA 22, 2015).

Wie bereits in der vorherigen Maßnahme beschrieben, stellen sich auch hier ähnliche Herausforderungen. Besonders die Flächenkonkurrenz mit verschiedenen stadtplanerischen Zielen der wachsenden Stadt sowie mögliche Nutzungskonflikte mit den Eigentümer:innen unterschiedlicher Liegenschaften sind zentrale Aspekte, die eine nachhaltige Sicherung und Schaffung neuer Waldflächen erschweren. Zudem muss bei der Anlage solcher Waldflächen darauf geachtet werden, städtische Kaltluftschneisen nicht zu blockieren, da dies die natürliche Luftzirkulation innerhalb der Stadt erheblich beeinträchtigen könnte. (MA 22, 2015)

5.2 Singapur

5.2.1 Klimatische Bedingungen

Singapur liegt in der tropisch- feuchten Klimazone und ist durch ein ganzjährig feuchtes und ausgesprochen konstantes Klima geprägt. Aufgrund der Nähe zum Äquator bleiben die Temperaturen das ganze Jahr über hoch, mit nur minimalen monatlichen Schwankungen. Der durchschnittliche Jahresmittelwert beträgt etwa 27,5 °C, während die täglichen Temperaturschwankungen mit rund 7 °C ebenfalls relativ gering ausfallen. Die hohe Niederschlagsmenge von etwa 2.190 mm pro Jahr wird durch regionale Klimadynamiken beeinflusst, insbesondere durch den Monsun und schwache mittlere Oberflächenwinde. In Kombination mit den hohen Temperaturen führt dies zu einer ausgeprägten Luftfeuchtigkeit, die das tropische Klima Singapurs kennzeichnet. Singapur erlebt zwei ausgeprägte, jedoch ähnliche „Jahreszeiten“, die durch die Monsune bestimmt werden. Der Nordostmonsun, der von November bis März andauert, bringt meist mäßiges, trockenes und sonniges Wetter. Im Gegensatz dazu ist der Südwestmonsun, der zwischen Juni und September auftritt, durch heißes, feuchtes Klima mit gelegentlichen Schauern geprägt. (Aflaki et al., 2016)

Das äquatornahe Klima Singapurs stellt die Bevölkerung häufig vor Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Lebensqualität. Die Kombination aus hohen Temperaturen, intensiver Luftfeuchtigkeit und geringen Windgeschwindigkeiten erschwert die thermische Behaglichkeit erheblich. (Roth & Chow, 2012) Die umliegende Meeresluft erzeugt jedoch lokale bis regionale Windzirkulationen, die kühlere Luft in die Stadt transportieren und dadurch den thermischen Komfort spürbar verbessern können. Diese natürliche Luftzirkulation stellt eine wertvolle Ressource dar und sollte in Singapur gezielt genutzt werden. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Singapur verzeichnet eine äußerst rasante Wachstumsrate in der Bevölkerung, die es zu einem außergewöhnlichen Beispiel für Urbanisierung in Südostasien macht und damit auch zum Land mit der dritthöchsten Bevölkerungsdichte der Welt (Gatzmaga, 2019). Dieser Urbanisierungsprozess hat zu einem drastischen Rückgang der Walddichte geführt, wodurch Singapur im Vergleich zu seinen südostasiatischen Nachbarn den geringsten Anteil an ursprünglicher Waldfläche aufweist. Dieser Verlust hat das lokale Klima erheblich verändert und könnte in Zukunft die Auswirkungen des städtischen Wärmeinseleffekts weiter verstärken sowie zusätzliche Umweltprobleme mit sich bringen. (Aflaki et al., 2016) Acero und Zozaya (2020) unterstreichen die Dringlichkeit des Themas durch folgende markante Aussage: „The city is warmer than its surrounding – by up to 7°C – due to the Urban Heat Island effect“ (S. 3).

5.2.2 Hauptverursacher urbaner Hitzeinseln in Singapur

In Singapur stammen anthropogene Wärmequellen aus verschiedenen Sektoren, darunter Kraftwerke, Industrie, Gebäude, Verkehr und andere vereinzelnden Quellen. Diese Wärmequellen tragen erheblich zur urbanen Erwärmung und dem Wärmeinseleffekt der Stadt bei. In der Analyse von Kayanan et al. (2019), die im Rahmen des Projekts „Cooling Singapore“ entstanden ist, werden die anthropogenen Wärmequellen in direkte und indirekte Wärmequellen unterteilt. Direkte Wärmequellen sind jene bei denen die Wärme unmittelbar an dem Ort freigesetzt wird, an dem die Aktivität stattfindet. Indirekte Wärmequellen entstehen durch vorgelagerte Prozesse, bei denen Energie für eine bestimmte Nutzung bereitgestellt wird, die Wärme aber an einem anderen Ort freigesetzt wird. (Kayanan et al., 2019)

Die untenstehende Tabelle (Tabelle 1) zeigt eine Zusammenfassung der anthropogenen Wärme in Singapur im Jahr 2016, aufgeteilt in verschiedene Sektoren. Sie besteht aus drei Hauptspalten: Direkte anthropogene Wärme, Indirekte anthropogene Wärme und die gesamte anthropogene Wärme. Man kann erkennen, dass die direkte anthropogene Wärme, die durch Kraftwerke freigesetzt wird, 15,3 % der gesamten direkten anthropogenen Wärme in Singapur ausmacht. Die Industrie ist der größte Energieverbraucher in Singapur und macht rund 58,5 % der direkten anthropogenen Wärme und rund 64,9% der gesamten anthropogenen Wärme aus. Vor allem petrochemische Raffinerien und chemische Industrien sind für einen erheblichen Anteil der Wärmeerzeugung verantwortlich. Gebäude tragen aufgrund der direkten und indirekten Wärmeerzeugung zu einer erheblichen urbanen Wärmebelastung bei. Besonders der hohe Stromverbrauch und die damit verbundene Wärmeabgabe von Klimaanlage, Beleuchtung und technischen Geräten machen Gebäude zu einem relevanten Faktor. Der Verkehrssektor in Singapur verursacht die viert höchste direkte anthropogene Wärmequelle. Die Hauptwärmequellen sind Motorenabwärme, Abgase, Reifenreibung und Bremsenergie.

Neben den Hauptsektoren gibt es kleinere Wärmequellen wie Kohlekraftwerke, Abfallverbrennungsanlagen und Biomassenutzung, die zusammen etwa 5 % der gesamten anthropogenen Wärme ausmachen. Der menschliche Stoffwechsel trägt ebenfalls zur Wärmebelastung bei, jedoch in geringerem Maße als die anderen Sektoren. (Kayanan et al., 2019)

Tabelle 1 Zusammenfassung der anthropogenen Wärme in Singapur im Jahr 2016

Source	Direct AH [ktoe]		Indirect AH from electricity [ktoe]	Direct + Indirect AH [ktoe]	
Power plants and grid	3118	15.3%	-	-	
Industry	11906	58.5%	1317	13223	64.9%
Buildings	2430	11.9%	1631	4062	19.9%
Transport	2328	11.4%	179	2498	12.3%
Metabolism	579	2.8%	-	579	2.8%
Total	20362		3118	20362	

Quelle: Kayanan et al., 2019, 26

Weitere Studien, wie die von Jusuf et al. (2007), zitiert nach Aflaki et al. (2014), untersuchen in ihrer Studie die Auswirkungen verschiedener Landnutzungsarten auf den Temperaturanstieg in Singapur. Mittels Fernerkundungsdaten und geografischen Informationssystemen bringen sie eine Makroperspektive auf Singapur und führen eine eingehende Analyse durch. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die städtische Landnutzung in Singapur die städtischen Temperaturen wesentlich beeinflussen kann und belegen, dass eine gezielte und strategische Flächennutzungsplanung deutlich zur Minderung der UHI-Effekte beitragen kann. Priyadarsini und Wong (2007), zitiert nach Aflaki et al. (2014), stellten in einer ähnlichen Untersuchung fest, dass die Lufttemperaturen in einigen dicht bebauten Hochhausgebieten nachts um bis zu 2 °C anstiegen. Dies deutet auf eine unzureichende Wärmeabstrahlung und eine verstärkte Speicherung von Wärme in der bebauten Umgebung hin. Eine weitere Untersuchung von Priyadarsini et al., (2008) zeigt auf wie hoch der Einfluss die Geometrie von Gebäuden und die Fassadenmaterialien auf die Außenlufttemperatur in Singapur ist. Es wurde beobachtet, dass bei niedrigen Windgeschwindigkeiten die Fassadenmaterialien und deren Farben (Albedo) einen erheblichen Einfluss auf die Temperatur hatten. In engen Hochhausschluchten stieg die Temperatur um bis zu 2,5 °C, wenn das Fassadenmaterial eine niedrigere Albedo aufwies. Zudem konnte in einer Simulation gezeigt werden, dass die gezielte Platzierung von Hochhäusern und eine veränderte geometrische Form einzelner Gebäude die Luftzirkulation innerhalb der Schlucht förderte und die Temperatur senkte. Ein optimales Verhältnis von Höhe zu Breite der Gebäude führte zusätzlich zu einer Steigerung der Luftgeschwindigkeit um bis zu 35 %, was die Temperatur um maximal 0,7 °C reduzierte.

Ein weiteres bedeutendes Problem in Singapur stellt das „städtische Treibhaus“ dar, das durch die erhöhte Rückstrahlung langwelliger Wärme aus der verschmutzten und wärmeren Stadtatmosphäre zusätzlich zur Erwärmung beiträgt (Rajagopalan & Wong, 2009).

Die Analyse zeigt, dass Industrie, Gebäude und Verkehr die Hauptquellen anthropogener Wärme in Singapur sind und maßgeblich zum Wärmeinseleffekt beitragen. Zusätzlich verstärkt die dichte Bebauung und hohe Energienutzung die urbane Erwärmung. Studien belegen, dass gezielte Stadtplanungsmaßnahmen, wie optimierte Gebäudestrukturen und andere energieeffiziente Technologien zur Temperaturreduktion beitragen können und langfristig zu einem verbesserten Stadtklima führen können.

5.2.3 „Cooling Singapore“

Das Projekt „Cooling Singapore“, das 2017 ins Leben gerufen wurde, verfolgt das Ziel, handlungsrelevantes Wissen für politische Entscheidungsträger:innen bereitzustellen und Strategien zur Minderung des Urban Heat Island- Effekts zu entwickeln. Es ist Teil des NRF-CREATE-Programms (National Research Foundation - Campus for Research Excellence and Technological Enterprise) und vereint Forschungsteams renommierter Institutionen, darunter die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich), das Massachusetts Institute of Technology (MIT), die Technische Universität München (TU München) und die National University of Singapore (NUS). Um den Austausch zwischen Wissenschaft und Politik zu fördern, wurde die „UHI Task Force“ eingerichtet, die sicherstellen soll, dass politische Maßnahmen wissenschaftlich fundiert und praxisnah gestaltet werden. Seit der Einführung des Projekts wurden mehrere aufeinander aufbauende Programme entwickelt. „Cooling Singapore 1.0“, das 2017 startete, konzentrierte sich auf die Entwicklung von Metriken und Instrumenten zur Bewertung urbaner Hitzeinseln sowie des thermischen Komforts im Außenbereich (OTC). Zudem wurde ein Katalog mit 86 Maßnahmen zur Hitzereduktion erstellt und bestehende Wissens- und Technologielücken identifiziert. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Darauf aufbauend wurde 2019 bis 2020 „Cooling Singapore 1.5“ entwickelt, um potenzielle Kühlstrategien systematisch zu bewerten. Ein zentrales Ziel dieses Programms war die Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems, das verschiedene Maßnahmen analysiert und klimaangepasste städtische Gestaltungsrichtlinien für Singapur erarbeitet. Diese Forschung wurde mit „Cooling Singapore 2.0“ weiter vertieft, das auf den Erkenntnissen der vorherigen Phasen aufbaut und die Forschung zur UHI-Minderung in Singapur weiterführt. Das Projekt

bildet somit eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die nachhaltige Stadtplanung und unterstützt politische Entscheidungsträger:innen bei der Entwicklung und Umsetzung effektiver Maßnahmen gegen urbane Hitzeinseln. (SEC, o. D.)

5.2.4 Methode der Maßnahmenbewertung

Die Bewertung der Maßnahmen in Singapur unterscheidet sich deutlich von der des UHI-STRAT in Wien. In der aktuellen Projektphase von „Cooling Singapore“ wird der sogenannte „Digital Urban Climate Twin“ (DUCT) entwickelt – ein digitales Modell des städtischen Klimas. Dieses Modell soll umfassende Berechnungen zu Umweltfaktoren, Landoberfläche, Industrie, Verkehr und Gebäudeenergie ermöglichen sowie regionale und mikroskalige Klimamodelle integrieren. Das Projekt baut auf vorherige Phasen wie „Cooling Singapore 1.0, 1.5 und 2.0“ auf und arbeitet eng mit Regierungsstellen zusammen, um die Wärmeauswirkungen von Gebäuden, Industrie und Verkehr besser zu verstehen. Es soll nicht nur die Geometrie und die Texturen für eine reine Visualisierung darbieten, sondern auch das dynamische Verhalten von städtischen Sachverhalten für die Simulation von Ursachen und Wirkung darstellen. Ein besonders relevanter Aspekt des digitalen Modells für diese Arbeit ist die Möglichkeit, Simulationsexperimente durchzuführen und „Was-wäre-wenn“-Szenarien zu erforschen. (Acero & Zozaya, 2020)

Die „Was-wäre-wenn“-Szenarien betrachten dabei stets zwei Perspektiven. Einerseits wird im digitalen Stadtklimamodell die sogenannte „Business as Usual“ (BAU)-Variante dargestellt, in der bestehende Methoden, beispielsweise die herkömmliche Gebäudekühlung durch Klimaanlage berücksichtigt werden. Andererseits wird ein alternatives Szenario entwickelt, das von einer vollständigen Umsetzung neuer Maßnahmen zur Reduzierung der urbanen Hitze ausgeht. Anschließend wird untersucht, inwiefern sich diese Veränderungen sowohl aus ökologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht auswirken. Das „Digital Urban Climate Twin“-Modell untersucht zentrale Fragen, die auch für diese Arbeit von hoher Bedeutung sind. Zum einen wird analysiert, wie sich die zukünftige Stadtentwicklung auf das Stadtklima auswirkt, zum anderen wird erforscht, welche Maßnahmen zur wirksamen Minderung der städtischen Hitze in Singapur beitragen können. (Riegelbauer et al., 2020)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich „Cooling Singapore“ im Gegensatz zum UHI STRAT Wien zunächst stark auf direkte anthropogene Wärmequellen konzentriert. Nach einer detaillierten Analyse der Hauptverursacher von Wärmeemissionen werden gezielt jene

Bereiche identifiziert, die für die Reduzierung urbaner Hitzeinseln und die Verbesserung des thermischen Komforts im Außenraum entscheidend sind. Anschließend werden mithilfe des DUCT-Modells verschiedene Szenarien entwickelt, die darauf abzielen, die größten Wärmequellen möglichst effektiv zu reduzieren und so die urbane Hitze Problematik nachhaltig zu entschärfen.

5.2.5 Wirksamste Maßnahme gegen urbane Hitzeinseln in Singapur

Das Team des Projekts „Cooling Singapore“ konzentriert sich bei der Bewertung der Maßnahmen ausschließlich auf die Bereiche Gebäude, Transport und Kraftwerke. Obwohl die Industrie insgesamt die größte Menge an Wärme erzeugt (siehe Kapitel 5.2.2), wird sie im DUCT-Modell nicht berücksichtigt, da ihr Einfluss auf die Temperatur räumlich stark begrenzt ist. Industriegebiete und Kraftwerke nehmen nur 1,2 % der Fläche Singapurs ein und sind daher für die Reduzierung urbaner Hitzeinseln sowie für die Verbesserung des thermischen Komforts der Stadtbewohner von geringer Relevanz. Somit werden in der Untersuchung die Bereiche Transport und Gebäude analysiert. Dazu wurden zwei Simulationen durchgeführt, die bereits abgeschlossen sind. Sie präsentieren „Was-wäre-wenn“-Szenarien und bewerten die Wirksamkeit zweier vielversprechender Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitze. (Acero & Zozaya, 2020)

Da Gebäude fast 12 % der direkten anthropogenen Wärme verursachen und auf etwa 25 % der Fläche Singapurs eine maximale Temperaturerhöhung von bis zu 3,7 °C bewirken können, setzt das erste Szenario auf die Einführung eines „District Cooling- Systems“ (Fernkälte) (Riegelbauer et al., 2020). Der Transportsektor, der zu einer Temperaturerhöhung von bis zu 0,9 °C beiträgt und mehr als 4,6 % der Stadtfläche beeinflusst, wird im zweiten Szenario betrachtet. Hierbei wurde ein Modell entwickelt, das die vollständige Elektrifizierung des gesamten Verkehrs in Singapur simuliert.

District Cooling - Fernkälte

Gebäude sind in vielen Stadtvierteln eine der Hauptquellen für Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen, insbesondere in dicht besiedelten urbanen Gebieten mit hohen Klimatisierungsanforderungen. In Singapur sind kommerzielle Gebäude für 31 % des gesamten Stromverbrauchs verantwortlich, wobei 60 % davon allein auf die Klimatisierung entfallen. Auch im Wohnbereich wird ein erheblicher Anteil des Stroms für Klimaanlage

verwendet, sodass insgesamt 25 % des nationalen Stromverbrauchs für Kühlung benötigt werden. Ein wesentlicher Faktor dabei ist die Abwärme von Klimaanlage. Es wird gezeigt, dass die Nutzung von Klimaanlage in Singapur die urbane Wärmeinsel signifikant beeinflusst, mit Temperaturanstiegen von bis zu 2 °C in besonders betroffenen Gebieten. Daher sind alternative Kühltechnologien wie das sogenannte „district cooling“ (Fernkälte) erforderlich, um sowohl die Energieeffizienz zu verbessern als auch die urbane Hitzeinseln zu reduzieren. Daher wurde mit Hilfe des „Digital Urban Climate Twin“ ein hypothetisches Szenario erstellt, in dem sämtliche Gebäude an ein Fernkältenetzwerk angeschlossen werden. Dabei wird die gesamte Kühlenergie zentral erzeugt und über ein Netzwerk von gekühltem Wasser an die angeschlossenen Gebäude verteilt. In der folgenden Abbildung (Abb. 12) lässt sich die technische Umsetzung solch einer Fernkühlung ablesen. Das District Cooling Plant (DCP), ein Kraftwerk welches Kaltwasser erzeugt, pumpt die dieses über ein Fernkältenetz (DCN) und sogenannte Energy Transfer Stations (ETS) in die Gebäude, welche die Kühlenergie erhalten sollen. ETS dienen für die Verbindung zwischen dem DCN und dem Endverbrauchergebäude. (Riegelbauer et al., 2020)

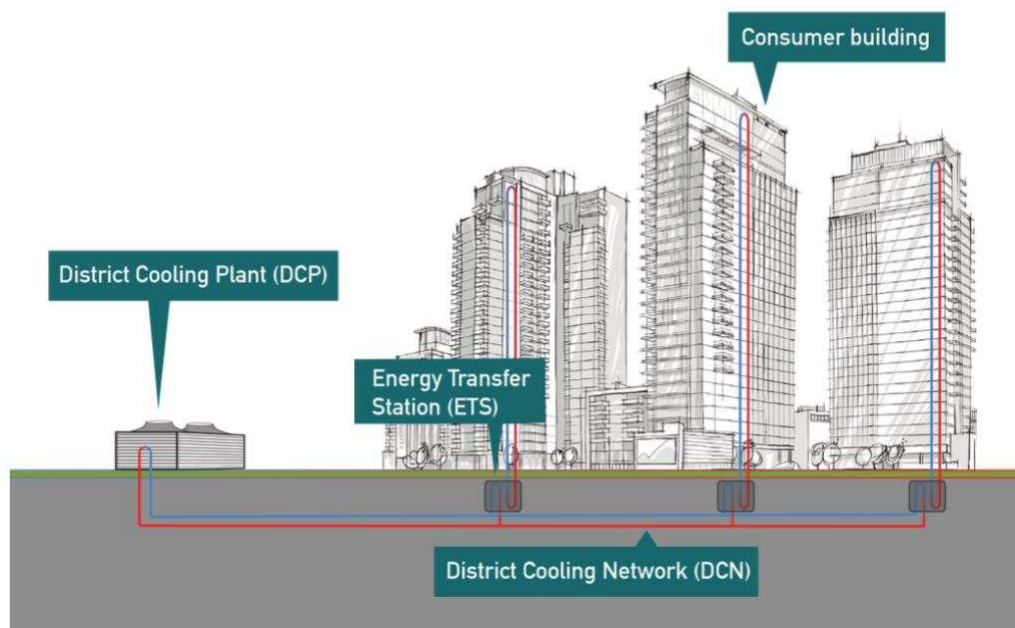


Abb. 11 Komponenten der Fernkälte (District Cooling) Singapurs (Quelle: Riegelbauer et al., 2020: 6)

Die Ergebnisse des Modelles zeigen, dass die Fernkälte eine bedeutende Rolle bei der Reduzierung der städtischen Wärmebelastung spielen könnte. Eine umfassende Implementierung dieser Technologie würde dazu beitragen, die durchschnittliche Temperatur

in urbanen Gebieten um 0,5 °C zu senken. Allerdings zeigen Simulationen, dass die maximale städtische Hitzeinsel-Temperatur in manchen Bereichen lokal um bis zu 2 °C ansteigen könnte, insbesondere in der unmittelbaren Umgebung der Kühlanlagen (DCP). Diese Kühlanlagen müssen daher an strategisch günstigen Standorten platziert werden, um ihre Auswirkungen auf die lokale Lufttemperatur zu vermeiden (Rüfenacht & Acero, 2017). Neben der Verringerung der Wärmebelastung hätte die Fernkälte auch einen positiven Einfluss auf die Treibhausgasemissionen. Der Modellrechnung zufolge könnte durch eine großflächige Umstellung auf dieses System eine jährliche Reduktion von 1,7 Millionen Tonnen CO₂ erreicht werden, was etwa 3 % der nationalen Emissionen Singapurs entspricht. Ein weiterer zentraler Vorteil liegt in der gesteigerten Energieeffizienz, wobei die Höhe der Einsparungen stark vom Gebäudetyp abhängt. Während kommerzielle Gebäude im Schnitt eine Reduktion des Kühlenergiebedarfs um 6 % verzeichnen, profitieren öffentliche Wohngebäude mit Einsparungen von bis zu 26 %. In privaten Wohngebäuden liegt die Reduktion bei durchschnittlich 13 %. Diese Werte verdeutlichen das Potenzial der Fernkälte, sowohl den Energieverbrauch als auch die klimatischen Belastungen in urbanen Gebieten nachhaltig zu senken. (Riegelbauer et al., 2020)

Trotz der Vorteile birgt die Fernkühlung einige Herausforderungen. Die hohen Investitionskosten für die notwendige Infrastruktur machen das System besonders in Wohngebieten oft unwirtschaftlich. Zudem kann ein Rebound-Effekt auftreten, da niedrigere Betriebskosten zu einem erhöhten Kühlbedarf führen können, wodurch die erwarteten Energieeinsparungen teilweise wieder aufgehoben werden. Auch die Kostenstruktur spielt eine Rolle. Wird die Abrechnung über fixe Gebühren oder pro Fläche statt nach tatsächlichem Verbrauch geregelt, könnte dies für Endnutzer als Nachteil empfunden werden. Schließlich ist eine sorgfältige Planung wichtig, um einen erfolgreichen Einsatz dieser Strategie zu gewährleisten. (Riegelbauer et al., 2020) Neben den hohen Investitionskosten ist außerdem eine vorausschauende und nachhaltige Stadtplanung notwendig. Die Politik muss durch gezielte Vorschriften und Gesetze, wie es Singapur bereits vorgemacht hat, die Einführung von Fernkälte erleichtern und Anreize schaffen, etwa durch Subventionen für Gebäude, die dieses System nutzen (Rüfenacht & Acero, 2017).

Die beschriebenen Nachteile der Fernkälte sind für diese Arbeit nicht von Relevanz, da sich die aufgestellte Hypothese sowie die daraus abgeleitete Forschungsfrage ausschließlich auf die Bewertungsmethode und die Wirksamkeit der Maßnahme konzentrieren und keine wirtschaftlichen Faktoren berücksichtigt.

Elektrifizierung von Fahrzeugen

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind aufgrund ihrer Abgase bedeutende Wärmeemittenten. Zusätzlich tragen CO₂ und andere Emissionen zur Wärmespeicherung bei und verstärken somit die Effekte urbaner Hitzeinseln. Während die Betriebstemperatur eines Verbrennungsmotors durchschnittlich zwischen 90 und 100 °C liegt, beträgt die Temperatur der Batterie eines Elektrofahrzeugs nur etwa 30 bis 40 °C. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung ist dabei deutlich geringer, insbesondere in Regionen wie Singapur, wo die durchschnittliche Lufttemperatur oft in einem ähnlichen Bereich liegt. Zudem erzeugen Elektrofahrzeuge insgesamt weniger Abwärme, da Mechanismen wie regeneratives Bremsen und ein gleichmäßigeres Beschleunigungs- und Bremsverhalten, beispielsweise im Stau, den Energieverbrauch reduzieren und somit auch die Wärmeentwicklung verringern. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Die Studie von Borzino et al. (2020), die auch zu dem Projekt „Cooling Singapore“ gehört, untersucht die potenziellen Auswirkungen der vollständigen Elektrifizierung der Fahrzeuge in einem bestimmten Untersuchungsgebiet in Singapur. Dabei wird das Szenario eines vollständigen Umstiegs auf Elektrofahrzeuge betrachtet, in dem sowohl Busse als auch private Pkw ausschließlich elektrisch betrieben werden. Alternativ werden Szenarien mit teilweiser Elektrifizierung der Flotte (33 % oder 66 %) sowie separate Elektrifizierung von Bussen oder Pkw betrachtet. Das Hauptziel dieser Analyse ist es, die Auswirkungen auf das Stadtklima, insbesondere die Reduktion der gefühlten Außentemperatur, sowie weitere ökologische und ökonomische Effekte zu bewerten.

Die Studie zeigt, dass die vollständige Elektrifizierung der Fahrzeugflotte eine Temperaturreduktion um 0,91 °C im Vergleich zum „business-as-usual“-Szenario bewirken kann. Geht man nur von einer 100% Elektrifizierung von Bussen aus, erreicht man eine Temperaturreduktion von 0,71 °C. Betrachtet man das Szenario, in dem lediglich die Pkw zu 100% elektrifiziert werden, würde man eine Temperaturreduktion von 0,81 °C erreichen.

Zusätzlich reduziert die Elektrifizierung den Energieverbrauch erheblich. Im 100 %-Elektrifizierungs-Szenario alle Fahrzeuge sinkt der Energieverbrauch um 66,91 % im Vergleich zum BAU-Szenario. Auch die Emissionen von Treibhausgasen nehmen stark ab. Im vollständigen Elektrifizierungs-Szenario beträgt die Reduktion 44,96 %, während bei ausschließlicher Elektrifizierung der Busse bzw. der Pkw die Emissionen um 20,35 % bzw. 25,02 % sinken. Die Umstellung auf Elektrofahrzeuge bringt jedoch auch erhebliche Kosten mit sich. Die jährlichen äquivalenten Gesamtkosten steigen mit zunehmender Elektrifizierung. Während das BAU-Szenario jährliche Kosten von circa 44,2 Millionen Singapur- Dollar (SGD)

aufweist, steigen diese im vollständigen Elektrifizierungs-Szenario auf 49,3 Millionen SGD. Die Kostensteigerung beträgt somit etwa 11,48 % im Vergleich zum BAU-Szenario. Besonders hohe Investitionen sind für die Ladeinfrastruktur erforderlich. Die Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge sind ebenfalls höher als für konventionelle Verbrennerfahrzeuge, auch wenn man durch niedrigere Wartungs- und Energiekosten langfristige Einsparungen erzielen würde. (Borzino et al., 2020)

Neben den Anschaffungskosten solcher Fahrzeuge und dem Ausbau der Ladeinfrastruktur spielt auch die Schaffung von Anreizen eine entscheidende Rolle, um die Bevölkerung von den Vorteilen der Elektromobilität zu überzeugen. Elektrofahrzeuge tragen nicht nur zur Reduzierung der Wärmeentwicklung bei, sondern bieten auch zahlreiche weitere positive Auswirkungen. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Cool Roofs - Kühle Dächer

Eine weitere Maßnahme, die in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht und auch im Projekt „Cooling Singapore“ vorgestellt wird ist, ist der Einsatz sogenannter „Cool Roofs“. Diese kühlen Dächer bestehen aus weißen oder hell gefärbten Materialien mit hoher Reflektivität (hoher Albedo), wodurch die Oberflächentemperatur gesenkt und die Wärmeabgabe in die darunterliegenden Gebäude reduziert wird. Dadurch lässt sich der Energiebedarf für die Kühlung senken, was wiederum zu geringeren Energiekosten führt. Bei einer flächendeckenden Umsetzung könnte diese Maßnahme die Albedo der städtischen Umgebung erheblich erhöhen und somit ein großes Potenzial zur Eindämmung urbaner Hitzeinseln bieten. Laut „Cooling Singapore“ gilt die Installation kühler Dächer als eine technisch leicht umsetzbare und kosteneffiziente Lösung, um die Effekte urbaner Hitzeinseln zu reduzieren und gleichzeitig die Energieeffizienz von Gebäuden zu steigern. Diese Maßnahme kann sowohl auf Flach- als auch auf Schrägdächern angewendet werden, wobei verschiedene Materialien zum Einsatz kommen. Darunter zählen Kies, kühle Membranen (einlagig oder als flüssige Beschichtung), Ziegel und weitere reflektierende Baustoffe. Angesichts der Nähe Singapurs zum Äquator und der damit verbundenen intensiven Sonneneinstrahlung über viele Stunden am Tag bietet diese Strategie großes Potenzial, um das Stadtklima positiv zu beeinflussen und die Kühllast von Wohn- und Gewerbegebäuden zu minimieren. (Rüfenacht & Acero, 2017) Zudem bedecken Dächer etwa 20–25 % der Stadtfläche Singapurs, wodurch eine flächendeckende Umsetzung dieser Maßnahme das urbane Klima erheblich beeinflussen könnte (Li & Norford, 2016).

Die Bewertung dieser Maßnahme wurde nicht im Rahmen des Projekts „Cooling Singapore“ durchgeführt, sondern bereits zuvor von Li und Norford (2016) untersucht. Ihre Methodik weist starke Ähnlichkeit zur moderneren Untersuchung von „Cooling Singapore“ auf, sowohl in der Vorgehensweise als auch in der Beteiligung der mitwirkenden Institutionen. Die Studie basiert, ähnlich wie das neuere DUCT-Modell, auf einer numerischen Simulation mit dem Weather Research and Forecasting (WRF) Modell. Dabei wurden zwei unterschiedliche Szenarien analysiert: eine Kontrollsimulation, die die aktuellen Bedingungen der Stadtstruktur widerspiegelt und mit dem BUS-Szenario vergleichbar ist, sowie ein Szenario mit einer 100%igen Umsetzung kühler Dächer, um deren maximale Wirkung zu untersuchen. Ziel der Studie war es, die Auswirkungen dieser Maßnahme auf die Luft- und Oberflächentemperaturen herauszufinden. Die Ergebnisse waren eindeutig: Tagsüber konnte die Oberflächentemperatur um bis zu 5 °C gesenkt werden, während die nächtliche Abkühlung lediglich 0,5 °C betrug. Auch die Lufttemperatur sank zur Mittagszeit um 1,8 °C, während nachts mit einer Reduktion von lediglich 0,2 bis 0,3 °C kaum ein Einfluss messbar war. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass kühle Dächer vor allem tagsüber wirksam sind, indem sie weniger Sonnenstrahlung absorbieren, ihr Effekt in der Nacht jedoch nur minimal ausfällt. Eine ähnliche Untersuchung von Mughal et al. (2020) bestätigte diese Erkenntnisse. Auch hier wurde tagsüber eine Reduktion der Lufttemperatur um 1,3 °C gemessen, während die nächtliche Abkühlung mit ~0,1 °C kaum ins Gewicht fiel. Eine weitere Studie von Chen und Zhang (2018) untersucht Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln in der Metropolregion Suzhou–Wuxi–Changzhou in China. Neben begrünten Dächern werden kühle Dächer als eine der effektivsten Strategien zur Minderung des städtischen Wärmeinseleffekts bewertet. Das dortige Klima weist Ähnlichkeiten mit dem von Singapur auf.

6 Bewertung und Vergleich

Die Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln variiert je nach Methode zur Erfassung ihrer Wirksamkeit, was die Annahme der Alternativhypothese (H1) unterstützt. Der Vergleich zwischen dem Wiener Strategieplan „UHI-STRAT“ und dem Singapur Projekt „Cooling Singapore“ zeigt deutliche methodische Unterschiede in der Bewertung der Maßnahmen. Wien setzt auf eine qualitative Bewertungsmethode mit der „Spiderweb“-Grafik, die verschiedene Kategorien wie Mikro- und Mesoklima, Biodiversität, Lebensqualität sowie

Errichtungs- und Erhaltungskosten berücksichtigt. Diese wurde unter der Koordination der Wiener Umweltschutzabteilung erstellt und durch die Einbindung von Fachkräften aus verschiedenen Magistratsabteilungen sowie Expert:innen unterschiedlicher Fachrichtungen, wissenschaftlich fundiert bewertet. Gestützt hat man sich dabei auf eine umfassende Analyse internationaler und nationaler wissenschaftlicher Arbeiten. Zusätzlich hat man „Good-Practice-Beispiele“ herangezogen und diese mit geplanten und bereits abgeschlossenen Projekten zur Minderung urbaner Hitzeinseln in Wien verglichen (MA 22, 2015). Singapur hingegen arbeitet mit einem Modellierungsansatz, dem Digital Urban Climate Twin (DUCT). Nach einer detaillierten Identifizierung der größten Wärmeemittenten in Singapur werden im Rahmen einer Simulation gezielt jene Maßnahmen untersucht und bewertet, die strategisch die höchste Wirkung zur Reduzierung dieser zuvor bestimmten Wärmeemittenten entfalten können. Diese Modellierung ermöglicht detaillierte Simulationen von „Was-wäre-wenn“-Szenarien, die eine quantitativ fundierte Bewertung der Maßnahmen ermöglichen. Diese Szenarien betrachten dabei stets zwei Perspektiven. Einerseits wird im digitalen Stadtklimamodell die sogenannte „Business as Usual“ (BAU)-Variante dargestellt, in der bestehende Methoden berücksichtigt werden. Andererseits wird ein alternatives Szenario entwickelt, das von einer vollständigen Umsetzung neuer Maßnahmen zur Reduzierung der urbanen Hitze ausgeht. Anschließend wird untersucht, inwiefern sich diese Veränderungen sowohl aus ökologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht auswirken. (Riegelbauer et al., 2020)

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen der Bewertung in Singapur und Wien liegt darin, dass Singapur seine Maßnahmen anhand der tatsächlichen Temperaturreduktion beurteilt. In Wien hingegen fehlen derzeit Analysen und Studien, die diesen Aspekt als zentrales Bewertungskriterium berücksichtigen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bewertungsmethoden beider Städte deutlich voneinander abweichen.

Die spezifischen Maßnahmen, die als am wirksamsten bewertet werden, unterscheiden sich je nach methodischer Herangehensweise und städtischem Kontext. In Wien liegt der Fokus auf der Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und der Vernetzung von Freiräumen, da die natürlichen Windkanäle eine entscheidende Rolle bei der Abfuhr von Wärme spielen. Diese Maßnahme wird als besonders effektiv bewertet, da sie nicht nur das Mikro- und Mesoklima verbessert, sondern auch positive Effekte auf die Biodiversität und Lebensqualität hat. Kombiniert man diese Maßnahme mit weiteren Strategien, wie der Erhaltung und Sicherung des Waldbestandes im Umland, der optimierten Oberflächenstrukturen sowie der Verwendung

geeigneter Materialien, um den Luftstrom in den Ventilationsbahnen nicht zu bremsen, kann die Wirksamkeit erheblich gesteigert werden. Ebenso spielt die Stadtgeometrie eine entscheidende Rolle, da sie die Windzirkulation innerhalb der Stadt maßgeblich beeinflussen und somit zur besseren Durchlüftung und Abkühlung urbaner Räume beitragen kann.

Die Sicherung und Erweiterung von Grünflächen wird als weitere zentrale Strategie zur Minderung urbaner Hitzeinseln als am besten bewertet. Besonders großflächige Parks ab 50 Hektar spielen dabei eine entscheidende Rolle, da sie durch ihre hohe Verdunstungsrate die Umgebungstemperaturen spürbar senken können. Allerdings stellen neben den hohen Kosten auch konkurrierende stadtplanerische Ziele eine Herausforderung dar, und die Wahl der Baumarten muss sorgfältig an die jeweiligen städtischen Bedingungen angepasst werden. Eine weitere Maßnahme die im Wiener UHI-Strategieplan als die Effektivste bewertet wurde ist die Erhaltung und Ausweitung der Waldflächen in und um die Stadt, die als Kaltluftproduktionsgebiete zur Abkühlung beitragen. Auch hier wurden Herausforderungen erkannt, insbesondere Nutzungskonflikte sowie die optimale Platzierung der Waldflächen, um ihre kühlende Wirkung bestmöglich zu nutzen und gleichzeitig die natürliche Luftzirkulation nicht zu beeinträchtigen. (MA 22, 2015)

Um die Forschungsfrage zu beantworten, welche spezifischen Maßnahmen zur Minderung städtischer Wärmeinseln in Wien unter Berücksichtigung verschiedener Bewertungsmethoden als am wirksamsten bewertet werden, lassen sich die drei zuvor beschriebenen Strategien hervorheben. Entscheidend ist dabei, dass jede Maßnahme nur bei optimaler Umsetzung und Anpassung an die lokalen Gegebenheiten ihre volle Wirkung entfalten kann. Der Strategieplan hebt insbesondere die Kombination einzelner Maßnahmen hervor und betont, dass dadurch eine noch größere Effektivität erzielt werden kann. Durch die gegenseitige Verstärkung der verschiedenen Ansätze wird eine umfassendere Reduktion urbaner Hitzeinseln ermöglicht.

In Singapur liegt der Fokus verstärkt auf Maßnahmen zur Reduktion direkter anthropogener Wärmequellen. Angesichts der hohen Durchschnittstemperaturen und der konstant hohen Luftfeuchtigkeit spielt die Gebäudekühlung eine zentrale Rolle (Aflaki et al., 2016). Allerdings trägt die Abwärme von Klimaanlage erheblich zur Bildung urbaner Wärmeinseln bei, wobei in einigen Teilen der Stadt Temperaturanstiege von bis zu 2 °C gemessen wurden. Besonders hervorgehoben wird daher die Einführung des „District Cooling“ (Fernkälte), das den Energieverbrauch für Klimatisierung erheblich senken und durchschnittlich eine Temperaturreduktion von bis zu 0,5 °C bewirken könnte. Neben ihrer kühlenden Wirkung trägt diese Maßnahme auch zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bei. Laut dem DUCT-

Modell könnte jährlich eine Einsparung von 1,7 Millionen Tonnen CO₂ erzielt werden, was etwa 3 % der nationalen Emissionen Singapurs entspricht. Trotz der zahlreichen Vorteile bringt diese Maßnahme auch große Herausforderungen mit sich. Der Ausbau eines Fernkältesystems erfordert hohe Investitionskosten und erweist sich insbesondere in Wohngebieten als wirtschaftlich wenig rentabel. Neben der finanziellen Belastung ist zudem eine vorausschauende und nachhaltige Stadtplanung essenziell. Die Politik muss durch gezielte Vorschriften und gesetzliche Rahmenbedingungen, wie es Singapur bereits vormacht, die Einführung von Fernkälte erleichtern und Anreize schaffen. (Riegelbauer et al., 2020)

Eine weitere effektive Maßnahme ist die vollständige Elektrifizierung des Verkehrs, die die Lufttemperatur um bis zu 0,91 °C reduzieren könnte (Borzino et al., 2020). Im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor arbeiten die Batterien eines Elektrofahrzeugs bei einer deutlich niedrigeren Betriebstemperatur von etwa 30 bis 40 °C. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung ist dabei deutlich geringer, insbesondere in Regionen wie Singapur, wo die durchschnittliche Lufttemperatur oft in einem ähnlichen Bereich liegt. Neben den Anschaffungskosten neuer Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs und dem Ausbau der Ladeinfrastruktur spielt auch die Schaffung von Anreizen eine entscheidende Rolle, um die Bevölkerung von den Vorteilen der Elektromobilität zu überzeugen. (Rüfenacht & Acero, 2017)

Eine weitere Maßnahme die sich in vielen Studien als sehr wirksam erweist bzw. hohe Temperaturreduzierung bewirken kann, aber nicht Teil der DUCT- Modellierung ist, ist die Implementierung von „Cool Roofs“. Sie ist als technisch leicht umsetzbare und kosteneffiziente Strategie angesehen (Rüfenacht & Acero, 2017). Diese Maßnahme reduziert die Oberflächentemperaturen tagsüber um bis zu 5 °C, während die Lufttemperatur mittags um 1,8 °C sinkt, wobei der Effekt in der Nacht mit 0,2 bis 0,3 °C eher gering ausfällt. Diese kühlen Dächer bestehen aus weißen oder hell gefärbten Materialien mit hoher Reflektivität (hoher Albedo), wodurch die Oberflächentemperatur gesenkt und die Wärmeabgabe in die darunterliegenden Gebäude reduziert wird. Dadurch lässt sich der Energiebedarf für die Kühlung senken, was wiederum zu geringeren Energiekosten führt. Bei einer flächendeckenden Umsetzung könnte diese Maßnahme die Albedo der städtischen Umgebung erheblich erhöhen und somit ein großes Potenzial zur Eindämmung urbaner Hitzeinseln bieten. Da etwa 20–25 % der Stadtfläche Singapurs von Dächern eingenommen werden, könnte eine umfassende Umsetzung dieser Maßnahme erhebliche Auswirkungen auf das urbane Klima haben (Li & Norford, 2016).

Bisher wurden im Bewertungsmodell DUCT lediglich zwei Maßnahmen simuliert: die Fernkälte und die Elektrifizierung von Fahrzeugen. Insgesamt stellt Singapur in seinem Forschungsprojekt 86 Strategien und Maßnahmen vor, die teilweise großes Potenzial aufweisen (Rüfenacht & Acero, 2017). Würde das DUCT-Modell um weitere Maßnahmen ergänzt und analysiert, wie zum Beispiel die Implementierung kühler Dächer, die sich in unabhängigen Studien bereits als äußerst vorteilhaft erwiesen haben und sogar größere Temperaturreduzierungen erreichen konnte, könnte Singapur seinen Fortschritt gegen urbane Hitzeinseln noch weiter optimieren.

Der Vergleich der Maßnahmen zeigt, dass der Wiener UHI-STRAT natürliche Kühlmechanismen wie Luftzirkulation und die Erhöhung der Vegetation als wirksam bewertet, während Singapur auf technologische Anpassungen und die Reduktion von anthropogener Wärme fokussiert ist. Die Methoden zur Bewertung der Maßnahmen führen dabei zu unterschiedlichen Priorisierungen. Während Wien durch qualitative Expert:innenbewertung die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen in einem übergeordneten Stadtplanungsprozess bewertet, verwendet Singapur computergestützte Klimasimulationen zur quantitativen Messung der Temperaturreduktion. Daraus kann man annehmen, dass die Auswahl der effektivsten Maßnahmen stark davon abhängt, welche methodischen Ansätze zur Bewertung verwendet werden und welchen stadtklimatischen Herausforderungen sich eine Stadt gegenüberstellt. Die unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen in den Strategieplänen „UHI-STRAT“ und „Cooling Singapore“ haben somit einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung und Priorisierung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln.

6.1 Handlungsempfehlung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass sowohl Wien als auch Singapur vielfältige Strategien zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln verfolgen und auf unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Dennoch könnte es Maßnahmen geben, die in beiden Städten übertragbar sind und deren Umsetzung oder Intensivierung einen nachhaltigen Beitrag zur Hitzeminderung leisten könnten.

Wien verfügt über ein gemäßigtes Klima, in dem natürliche Kühlmechanismen wie Luftzirkulation und Vegetation eine zentrale Rolle spielen. Dennoch könnte die Stadt von einigen technologiebasierten Maßnahmen aus Singapur profitieren. Einerseits lässt sich die Luftzirkulation durch eine gezielte Anpassung der Gebäudegeometrie erheblich verbessern

(ein Beispiel dafür ist das in Kapitel 4.6.2 dargestellte Gebäude), dessen offene Architektur eine optimale Luftströmung ermöglicht. Singapur setzt schon seit längerem auf eine offene Bauweise (Rüfenacht & Acero, 2017), die in Wien vor allem in der Stadtplanung verstärkt implementiert werden könnte. Der Einsatz eines Fernkältesystems hat sich in den Studien aus Singapur als vielversprechende Strategie erwiesen, die sogar in Wien bereits erfolgreich implementiert wurde. Besonders in der Kühlung unterirdischer Verkehrsanlagen nimmt Wien eine Vorreiterrolle ein und zeigt, wie diese Technologie zur effizienten Reduktion urbaner Wärmeinseln beitragen kann (MA 22, 2015). Also auch wenn der Bedarf an Klimaanlage in Singapur viel höher ist als in Wien (Riegelbauer et al., 2020), ist der Ausbau eines Fernkältenetzwerkes in beiden Städten mit vielen Vorteilen verbunden, wenn es darum geht die Wärmeemissionen von Gebäuden zu reduzieren und die Abhängigkeit von konventionellen Klimaanlage zu verringern.

Die anthropogene Wärme aus Fahrzeugen ist in Wien als auch in Singapur ein Problem, welches urbane Hitzeinseln verstärken kann. Die Studien Singapurs zeigen, dass eine verstärkte Elektrifizierung des Verkehrs zur Reduktion anthropogener Wärme beitragen kann. (Borzino et al., 2020) Neben der Förderung von E-Fahrzeugen wäre eine gezielte Integration emissionsfreier öffentlicher Verkehrsmittel daher auch in Wien sinnvoll.

Generell lässt sich festhalten, dass im Projekt „Cooling Singapore“ einige Maßnahmen vorgestellt und beschrieben werden, die im Wiener Strategieplan nicht berücksichtigt wurden und einen hohen technologischen Anspruch aufweisen. Ein Beispiel dazu wäre der Einsatz thermochromer und selektiver Materialien. Das sind reflektierende Materialien, die auf nanotechnologischen Zusätzen basieren. Diese reagieren auf ihre thermische Umgebung und ändern je nach Temperaturanstieg ihre Farbe. (Rüfenacht & Acero, 2017) Dies verdeutlicht, dass Singapur in bestimmten Bereichen verstärkt auf innovative Technologien setzt, um urbane Hitzeinseln gezielt zu minimieren. Ein Ansatz, den Wien möglicherweise stärker in seine Strategien integrieren könnte.

Singapur als tropische Stadt mit hoher Luftfeuchtigkeit setzt bereits stark auf technische Lösungen, jedoch könnte es von Wiens Fokus auf natürliche Kühlmechanismen profitieren. Obwohl das tropische Klima in Singapur nur geringe Windbewegungen bietet, sorgt die umliegende Meeresluft für eine kontinuierliche lokale bis regionale Windzirkulation, die kühlere Luft in die Stadt leitet und somit den thermischen Komfort spürbar verbessern kann (Rüfenacht & Acero, 2017). Diese natürliche Ressource kann ähnlich wie in Wien gezielt genutzt werden, indem strategisch platzierte Luftschneisen und Luftkorridore geschaffen werden, um die städtische Luftzirkulation zu erhalten und die Vernetzung von Freiräumen zu optimieren. Es

gibt auch Maßnahmen, die sich in Wien als besonders wirksam erwiesen haben, in Singapur jedoch eher nachteilige Effekte mit sich bringen würden. Der Bau und die Erhaltung weitläufiger Parks und Waldflächen, wie sie in Wien bereits erfolgreich umgesetzt werden, sind in Singapur aufgrund des ohnehin stark begrenzten Platzangebots vermutlich nur schwer realisierbar. Außerdem wäre eine Erhöhung des urbanen Wasseranteils im Gegensatz zu Wien in Singapur als Maßnahme zur Minderung urbaner Hitzeinseln nicht empfehlenswert. Durch die verstärkte Verdunstung würde der zusätzliche Wasseranteil die bereits hohe Luftfeuchtigkeit weiter erhöhen und damit das schwüle Klima zusätzlich verstärken (Rüfenacht & Acero, 2017).

Obwohl Wien und Singapur unterschiedliche klimatische Herausforderungen bewältigen müssen, zeigt die Analyse, dass ein gegenseitiger Austausch bewährter Maßnahmen Vorteile bringen könnten. Während Wien durch technologische Lösungen aus Singapur zusätzliche wirksame Maßnahmen erzielen könnte, würde eine stärkere Integration natürlicher Kühlmechanismen Singapur helfen, die Hitzebelastung weiter zu reduzieren. Wie bereits öfter beschrieben wäre ein Ansatz, der mehrere sowohl technische als auch natürliche Strategien kombiniert, könnte für beide Städte langfristig eine nachhaltige und wirkungsvolle Lösung zur Minderung urbaner Hitzeinseln darstellen.

7 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der Problematik urbaner Hitzeinseln und den entsprechenden Maßnahmen zu deren Minderung befasst. Im Rahmen der Untersuchung wurde überprüft, ob urbane Hitzeinseln einen signifikanten negativen Einfluss auf die städtische Bevölkerung haben, welche Strategien und Maßnahmen zur Bewältigung dieses Phänomens existieren und inwiefern unterschiedliche Bewertungsmethoden die Einschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen beeinflussen. Zudem wurde die Übertragbarkeit bewährter Strategien zwischen Wien und Singapur untersucht.

Die erste Hypothese (H1) konnte bestätigt werden, da die Analyse gezeigt hat, dass urbane Hitzeinseln erhebliche gesundheitliche, wirtschaftliche und ökologische Folgen für die städtische Bevölkerung mit sich bringen. Extreme Hitze in Städten kann die Sterblichkeit erhöhen, insbesondere bei vulnerablen Gruppen, wie ältere Menschen, Kinder, chronisch Kranke, sozial isolierte Menschen, Obdachlose, Personen, die im Freien arbeiten sowie Menschen mit körperlichen oder geistigen Einschränkungen. Zudem wirkt sich die steigende Temperaturbelastung negativ auf die Lebensqualität aus, indem sie den thermischen Komfort

in urbanen Räumen verschlechtert und den Energieverbrauch durch Klimatisierung erhöht. Die Untersuchung internationaler und nationaler Strategien hat gezeigt, dass zahlreiche Maßnahmen existieren, die zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln beitragen. Dazu zählen insbesondere die verstärkte Begrünung urbaner Räume, die vermehrte Integration von Wasserflächen, eine optimierte Stadt- und Gebäudegeometrie, der gezielte Einsatz innovativer Baumaterialien, durchdachte Beschattungskonzepte sowie technologische Lösungen im Transport- und Energiesektor, wie die Nutzung von Fernkälte und die Elektrifizierung des Verkehrs.

Die zweite Hypothese (H1) wurde ebenfalls bestätigt, da die Bewertung der Maßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln signifikant von den angewendeten Methoden zur Erfassung der Wirksamkeit abhängt. Während der Wiener Strategieplan „UHI-STRAT“ qualitative Bewertungen durch Expert:innen verwendet, basiert „Cooling Singapore“ auf quantitativen, computergestützten Klimasimulationen. Das führt zu unterschiedlichen Priorisierungen.

Wien bewertet insbesondere natürliche Kühlmechanismen, wie die Erhaltung der städtischen Luftzirkulation und Vernetzung der Freiräume, Sicherung und Erweiterung von Grün- und Freiräumen sowie Sicherung und Anlage bestehender und zusätzlicher Waldflächen, als besonders wirksam gegen urbane Hitzeinseln. Singapur hingegen konzentriert sich auf die gezielte Reduktion identifizierter anthropogener Wärmequellen. Basierend auf umfassenden Analysen prüft das Projekt „Cooling Singapore“ den verstärkten Einsatz technologischer Maßnahmen wie Fernkälte und die Elektrifizierung des Verkehrs, um die Wärmebelastung in urbanen Räumen effektiv zu minimieren. Im Gegensatz zum „UHI-STRAT“-Ansatz erfolgt jedoch kein direkter Vergleich verschiedener Maßnahmen innerhalb des Projekts „Cooling Singapore“. Daher lässt sich lediglich vermuten, dass die zwei detailliert untersuchten Maßnahmen als die wirksamsten angesehen werden. Die methodischen Unterschiede beeinflussen somit die Auswahl und Gewichtung der als effektiv geltenden Strategien.

Schließlich konnte auch die dritte Hypothese (H1) bestätigt werden. Die Analyse zeigt, dass Wien und Singapur durch den Austausch und die Umsetzung bewährter Strategien der jeweils anderen Stadt urbanen Hitzeinseln effektiv entgegenwirken können. Trotz der klimatischen Unterschiede gibt es übertragbare Maßnahmen, die in beiden Städten Potenzial zur Hitzereduktion bieten. So könnte Wien von den technologiebasierten Ansätzen Singapurs profitieren. Umgekehrt könnte Singapur vermehrt auf Maßnahmen zur besseren Luftzirkulation und städtischen Begrünung setzen, wie sie in Wien erfolgreich umgesetzt wurden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass urbane Hitzeinseln eine ernstzunehmende Herausforderung für Städte darstellen, die mit einer Kombination aus natürlichen und technologischen Maßnahmen entgegengewirkt werden muss. Der methodische Vergleich der Strategien zeigt, dass die Wahl der Bewertungsmethode einen entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung der vermeintlich wirksamsten Maßnahmen hat. Schließlich zeigt die Untersuchung, dass ein interdisziplinärer und internationaler Austausch von bewährten Praktiken die Effektivität der Maßnahmen erhöhen kann.

8 Perspektiven

Während der Erstellung dieser Arbeit sind immer wieder Themen und Studien aufgetaucht, die wertvolle und interessante Einblicke in weiterführende Aspekte urbaner Hitzeinseln bieten. Da diese Themen oft sehr umfassend sind und nicht direkt zur Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit beitragen, wird in diesem Kapitel ein Überblick über potenzielle Forschungsfelder gegeben, die für zukünftige Untersuchungen relevant sein könnten. Eine vollständige Integration dieser Themen hätte den Rahmen der Arbeit überschritten, dennoch sind sie von großer Bedeutung und bieten wertvolles Potenzial für neue wissenschaftliche Erkenntnisse.

- Eine Studie von Khan et al. (2020) untersucht die Unterschiede und Wechselwirkungen zwischen urbanen Hitzeinseln und Hitzewellen. Dabei wird betont, dass urbane Hitzeinseln ein permanentes Phänomen sind, das durch städtische Bebauung und Materialeigenschaften entsteht, während Hitzewellen kurzfristige extreme Wetterereignisse sind, die durch großräumige meteorologische Bedingungen verursacht werden. Die Studie hebt hervor, dass Hitzewellen eine Verstärkung des UHI-Effekts bewirken, was in Städten zu noch extremeren Temperaturen führen kann.
- Die Studie „The Urban Fix“ beschäftigt sich mit den Herausforderungen des Klimawandels, urbanen Hitzeinseln und der wachsenden Überbevölkerung in Städten. Kelbaugh (2019) argumentiert darin, dass Städte sowohl eine Hauptursache für den Klimawandel als auch eine mögliche Lösung sind. Er betont, dass durch intelligente Stadtplanung, nachhaltige Architektur und politische Maßnahmen extreme Hitze sowie Umweltbelastungen reduziert werden können. Politisch und gesellschaftlich wird das Thema urbaner Hitzeinseln oft schneller aufgenommen als der allgemeine

Klimawandel. Das liegt daran, dass extreme Hitze in Städten direkt spürbar ist, während der Klimawandel oft als langfristiges Problem wahrgenommen wird. Außerdem können urbane Hitzeinseln durch einfache Maßnahmen wie mehr Stadtbegrünung oder reflektierende Oberflächen gemildert werden, was schnelle Erfolge spürbar macht. Zusätzlich können politische Entscheidungsträger dabei konkretere lokale Lösungen präsentieren, die sichtbare Verbesserungen bringen. Die Studie hebt hervor, dass Hitzewellen in Städten zunehmend gefährlicher werden, da der UHI-Effekt die Temperaturen zusätzlich anhebt. Deshalb wird das Thema auch in der Politik laut dem Autor stärker adressiert als die allgemeineren Klimawandel-Themen, die oft mit langfristigen und komplexen Veränderungen verbunden sind. Kurzfristige Maßnahmen gegen UHI sind einfacher umsetzbar und bieten eine sichtbare Erfolgsgeschichte für politische Akteure. (Kelbaugh, 2019)

- Hupfer (2008) bietet in seinem Buch einen spannenden Einblick in die Welt der Pflanzenphänologie. Er beschreibt, wie Veränderungen in der städtischen Pflanzenwelt genutzt werden können, um anhand der Blatt- und Blütenentwicklung verschiedener Pflanzenarten ihre Reaktion auf Umweltfaktoren, wie eben urbane Hitzeinseln, zu analysieren und als Indikator für klimatische Einflüsse heranzuziehen.
- Der Strategieplan Wiens (UHI-STRAT) stellt neben den Maßnahmen und deren Bewertung noch weitere Handlungsfelder in den Fokus die für zukünftige Forschungen interessant wären. Dabei wurden Themen beschrieben wie zum Beispiel die öffentliche Bewusstseinsbildung und Beteiligung sowie Regulierungen und Anreizstrukturen, welche eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Maßnahmen spielen. Ein Kernpunkt dabei ist die Sensibilisierung der Bevölkerung sowie die Einbindung von Fachkräften in die Stadtplanung. Dies geschieht durch gezielte Informationskampagnen, um das Bewusstsein für die Auswirkungen urbaner Hitzeinseln zu schärfen. Gleichzeitig wird auf Regulierungen und Anreizsysteme gesetzt, um nachhaltige Bauweisen und klimaangepasste Maßnahmen attraktiver zu machen. Hierzu gehören zum Beispiel Förderprogramme für Gebäudebegrünung sowie Vorschriften zur Integration von klimafitten Bauweisen in Neubauprojekte. Ein weiterer Ansatz, der das Projekt nebenbei beschreibt, ist die geothermische Kühlstrategie. Diese nutzt die natürlichen Temperaturunterschiede des Erdreichs zur Kühlung von Gebäuden und anderen urbanen Flächen. Geothermische Ansätze sind nicht nur energieeffizient, sondern

reduzieren auch die Abhängigkeit klassischer Klimaanlage, die zur Erhitzung der Städte beitragen. Besonders interessant ist die bereits großflächige Umsetzung geothermischer Systeme in modernen U-Bahn-Stationen wie „Taborstraße“, „Praterstern“ und „Messe“. Diese Stationen nutzen Erdwärmeanlagen, um im Winter effizient zu heizen und im Sommer zu kühlen. Damit nimmt Wien eine Vorreiterrolle in der nachhaltigen Klimatisierung des öffentlichen Verkehrs ein.

- Ein weiterer interessanter Aspekt der von Damyanovic et al. (2016) zusammengefasst wurde ist die im August 2013 durchgeführte Umfrage unter Wiener Haushalten, um die Wahrnehmung und Einstellung der Menschen gegenüber Hitze in der Stadt zu untersuchen. Diese Umfrage würde gut in das Kapitel 4.5.1 (gesundheitliche Auswirkungen) passen. Insgesamt wurden 3.792 Haushalte angeschrieben, wovon rund 10 % (385 Antworten) an der Befragung teilnahmen. Dabei wurden Wohnhäuser aus verschiedenen Stadtteilen zufällig ausgewählt, um ein möglichst repräsentatives Bild zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass fast alle Befragten bereits mindestens eine Hitzewelle erlebt haben, wobei drei Viertel diese als negative Erfahrung empfinden. Besonders belastend wird die Hitze auf den Straßen und in den Wohnungen wahrgenommen. Um sich zu schützen, setzen die meisten Haushalte auf einfache Anpassungsmaßnahmen: 88 % lüften nachts, 86 % trinken mehr Flüssigkeit und 80 % halten Jalousien und Vorhänge geschlossen. Nur 6 % nutzen eine Klimaanlage, während etwa die Hälfte der Befragten Ventilatoren einsetzt. Unter den öffentlichen Maßnahmen werden Klimaanlagen in öffentlichen Verkehrsmitteln (64 %), Trinkbrunnen (59 %) und Straßenbäume (51 %) am häufigsten wahrgenommen. Maßnahmen wie das Aufhellen von Straßenbelägen oder das Begrünen von Bahntrassen wurden dagegen kaum registriert. Besonders deutlich wird die positive Einstellung gegenüber Stadtbäumen: 86 % der Befragten halten sie für eine geeignete Maßnahme zur Hitzereduktion, und eine noch größere Mehrheit ist überzeugt, dass Bäume das Stadtbild aufwerten. 70 % wünschen sich mehr Bäume in ihrer Nachbarschaft, 87 % in der gesamten Stadt. Sogar die Forderung nach „mehr Bäumen und weniger Parkplätzen“ in ihrem Bezirk unterstützen 54 %, während nur 24 % dagegen sind. (Damyanovic et al., 2016)

Kombiniert man die Ergebnisse dieser Umfrage mit den Erkenntnissen des UHI-STRAT, wird deutlich, wie wichtig Sensibilisierung und gezielte Informationskampagnen sind. Sie helfen, das Bewusstsein für die Auswirkungen

urbaner Hitzeinseln zu schärfen und gleichzeitig das Potenzial verschiedener Maßnahmen zur Hitzeminderung aufzuzeigen.

- Auch Gerhard Schmitt, Direktor des Singapore-ETH Centers und Professor für Informationsarchitektur an der ETH Zürich, hebt die Bedeutung der Bürgerbeteiligung im Kampf gegen urbane Hitzeinseln hervor. In einem Online-Artikel von Gatzmaga (2019) betont er, dass durch Umfragen, Workshops und digitale Tools wie Virtual Reality wertvolle Einblicke in die Wahrnehmung der Bevölkerung zu Themen wie städtischer Raum, Luftqualität und Gestaltung gewonnen werden können. Schmitt unterstreicht die Relevanz der Mitgestaltung und Mitentscheidung der Stadtbewohner bei Maßnahmen zur Hitzeminderung. So zeigen Umfragen in Singapur, dass die Menschen grüne Straßenlandschaften und Fassaden gegenüber kühlenden Bushaltestellen bevorzugen. Diese zeigt große Ähnlichkeit mit den Umfrageergebnissen Wiens. Schmitt (2019) verdeutlicht die Bedeutung der Sensibilisierung der Bevölkerung mit den Worten: *„Sobald die Bürger Zusammenhänge zwischen wissenschaftlichen Entdeckungen und ihrem eigenen Lebensumfeld erkennen, können sie zur zukünftigen Entwicklung ihrer Stadt beitragen.“* (Gatzmaga, 2019)
- Giuguere (2009) schlagen in ihrer Studie eine Maßnahme zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln vor, die in dieser Arbeit nicht näher behandelt wird: die Senkung der anthropogenen Wärme aus Fahrzeugen durch eine gezielte Reduzierung des Individualverkehrs. Dazu gehört die Kontrolle des Verkehrsaufkommens an heißen Tagen durch gezielte Verkehrsbeschränkungen sowie die Erhöhung der Parkgebühren, um die Nutzung des Autos weniger attraktiv zu machen. Ergänzend könnte die Einführung oder Anhebung einer Mautgebühr in besonders belasteten Stadtteilen in Kombination mit einer schrittweisen Reduzierung der Parkmöglichkeiten den Autoverkehr weiter verringern. Ein weiterer Ansatz ist der Ausbau von Parkplätzen an großen Stationen öffentlicher Verkehrsmittel am Stadtrand, um das Pendeln mit öffentlichen Verkehrsmitteln zu erleichtern. Durch attraktive Alternativen zum Auto, wie günstige oder sogar kostenlose Fahrten im öffentlichen Verkehr während Hitzewellen, könnte die Zahl der Fahrgäste steigen und somit die durch den Verkehr verursachte Wärmebelastung in Städten erheblich reduziert werden.

- Die Studie von Mughal (2020), die bereits im Kapitel „Cool Roofs - Kühle Dächer“ behandelt wurde, beschreibt eine weitere interessante Maßnahme, die insbesondere in tropischen Regionen mit hoher Klimaanlageennutzung relevant ist und im Projekt „Cooling Singapore“ nicht erwähnt wird. Sie schlägt vor, die Thermostate in Bürogebäuden Singapurs von 21°C auf 25°C anzuheben. Klimaanlageen entziehen zwar Innenräumen Wärme, geben jedoch eine noch größere Menge davon an die Außenluft ab, was die Außentemperaturen erhöht und den Stromverbrauch steigen lässt. Die Simulationen der Studie zeigen, dass durch diese Anpassung nicht nur der Energieverbrauch erheblich gesenkt, sondern auch eine Temperaturreduktion von bis zu 1,5 °C während des Tages erreicht werden kann. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine höhere Thermostateinstellung eine effektive Strategie zur Reduktion der urbanen Wärmebelastung und des Energieverbrauchs darstellt.

9 Literatur

- Acero J.A. & Zozaya A. (2020): Cooling Singapore – Digital Urban Climate Twin (DUCT). Singapore-MIT Alliance for Research and Technology. – In: Singapore ETH Centre; <https://sec.ethz.ch/research/cs.html> (01.04.2025).
- Aflaki A., Mirnezhad M., Ghaffarianhosein A., Omrany H., Wang Z.H. & Akbari H. (2017): Urban heat island mitigation strategies. A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. – In: *Cities – The international journal of urban policy and planning* 62, 131-145.
- Balzer A.S. (2024): Albedo-Effekt. – In: *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 16(1), 14-17
- Böhm R. (1998): Urban bias in temperature time series. A case study for the city Vienna, Austria. – In: *Climatic Change*, 38(1), 113-128.
- Chen Y. & Zhang N. (2018): Urban heat island mitigation effectiveness under extreme heat conditions in the Suzhou–Wuxi–Changzhou metropolitan area, China. – In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(2), 235-252.
- Damyanovic D., Reinwald F., Brandenburg C., Alex B., Gantner B., Morawetz U. & Preiss J. (2016): Pilot Action City of Vienna – UHI-STRAT. – In: F. Musco (Hrsg.), *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*, 257-280.
- Doulos L., Santamouris M. & Livada I. (2004): Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. – In: *Solar Energy* 77(2), 231-249.
- Aram F., Solgi E., Higuera García E., Mosavi A. & Várkonyi-Kóczy A. R. (2019): The cooling effect of large-scale urban parks on surrounding area thermal comfort. – In: *Energies*, 12(20), 37-58.
- Gatzmaga C. (2019): Einen kühlen Kopf bewahren. – In: *Forbes Austria*; <https://www.forbes.at/artikel/einen-kuehlen-kopf-bewahren> (01.03.2025).
- GeoSphere Austria. (Hrsg.) (2024): Monatlicher Klimabericht Österreich für das Jahr 2024. – Wien.
- Giguère M. (2009): Literature review of urban heat island mitigation strategies. *Canadian Electronic Library – Quebec*, 3-41; auch online unter: <https://policycommons-net.uaccess.univie.ac.at/artifacts/1203385/literature-review-of-urban-heat-island-mitigation-strategies/1756495/view/> (04.04.2025).

- Grewe H. A. (2016): Prävention von Gesundheitsrisiken in städtischen Wärmeinseln.
In: Public Health Forum, 24(4), 298-300.
- Henninger, S. (Hrsg.) (2011): Stadtökologie: Bausteine des Ökosystems Stadt – Paderborn
- ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) (Hrsg.) (2012): Hitzetage werden immer häufiger; <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/hitzetage-werden-immer-haeufiger> (12.01.2025).
- Hoeckner H., Stecking M. & Singer-Posern S. (2020): KLIMPRAX Stadtklima: Ansätze für eine hitzeangepasste Stadtplanung. In: Public Health Forum, 28 (1), 50-53
- Hupfer P. (2006): Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie (12., überarb. Aufl.) - Stuttgart u.a.
- Kayanan D.R., Resende Santos L. G., Ivanchev J., Fonseca J. A. & Norford L. (2019): Anthropogenic heat sources in Singapore (Technical Report, Version 1). - ETH Zurich.
- Kelbaugh D. (2019): The Urban Fix. Resilient Cities in the War Against Climate Change, Heat Islands and Overpopulation – New York.
- Khan H.S., Paolini R., Santamouris M. & Caccetta P. (2020): Exploring the Synergies between Urban Overheating and Heatwaves (HWs) in Western Sydney. – In: Energies, 13 (2), 19-36.
- Kuttler W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. – In: Environmental Sciences Europe, 23 (21).
- Kuttler W. (2004). Stadtklima. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. In: Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 16(4), 263-274.
- Lai J., Zhan W., Voogt J., Quan J., Huang F., Zho J., Bechtel, B., Hu L., Wang K., Cao C. & Lee X. (2020): Meteorological controls on daily variations of nighttime surface urban heat islands. – In: Remote Sensing Of Environment, 253, 112198.
- Lee S.H., Yoon S.J., Kim Y.G., Choi Y.C., Kim J.H. & Lee J.G. (2006): Development of building materials by using micro-encapsulated phase change material. – In: Korean Journal Of Chemical Engineering, 24 (2), 332-335.
- Li X.X. & Norford L.K. (2016): Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. – In: Urban Climate 16, 59-74.
- MA 22 (Magistratsabteilung 22 - Wiener Umweltschutzabteilung Wiener Umweltschutzabteilung) (Hrsg.) (2015): Urban Heat Islands Strategieplan Wien. – Wien; auch online unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/uhi-strategieplan-druck.pdf> (12.03.2025).

- Mathey J., Rößler S., Lehmann I., Bräuter A., Goldberg V., Kurbjuhn C., Westbeld A. (2012): Noch wärmer, noch trockener? Stadtnatur und Freiraumstrukturen im Klimawandel. – In: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Naturschutz und biologische Vielfalt – Bad Godesberg.
- Matzarakis A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. – In: Berichte des Meteorologischen Institut der Albert- Ludwigs- Universität – Freiburg.
- Morakinyo T.E., Ouyang W., Lau K.K., Ren C. & Ng E. (2020): Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. – In: The Science Of The Total Environment, 719, 137461.
- Mughal M.O., Li X.X. & Norford L.K. (2020): Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones. – In: Urban Climate, 34, 100714.
- Pfadenhauer J.S. & Klötzli F.A. (2014): Die warm-gemäßigte (subtropische) Zone. – In: Vegetation der Erde, 257-345.
- Priyadarsini R., Hien W.N. & David C.K.W. (2008): Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. – In: Solar Energy, 82(8), 727-745.
- Rajagopalan P. & Wong N.H. (2009): Causes of Urban Heat Island in Singapore. An Investigation Using Computational Fluid Dynamics (CFD). – In: PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24; auch online unter: <https://coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/UHI-Singapore.pdf> (17.01.2025).
- Riegelbauer E., Santos L.G.R., Singh V.K. & Nevat I. (2020): Potential of district cooling in Singapore: From micro to mesoscale (Technical Report, Version 01). – In: Cooling Singapore 1.5 – Virtual Singapore Urban Climate Design.
- Roth M. & Chow W.T.L. (2012): A historical review and assessment of urban heat island research in Singapore. – In: Singapore Journal of Tropical Geography, 33(3), 381-397.
- Rüfenacht L.A. & Acero J.A. (Hrsg.) (2017): Strategies for Cooling Singapore: A catalogue of 80+ measures to mitigate urban heat island and improve outdoor thermal comfort. – Singapur.

- Santamouris M. (2013): Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. – In: Renewable And Sustainable Energy Reviews, 26, 224-240.
- Santamouris M. (2014): Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. – In: Solar Energy, 103, 682-703.
- Santos L.G.R., Singh V.K., Mughal M.O., Riegelbauer E., Fonseca J.A., Norford L.K. & Nevat I. (2020): Building anthropogenic heat flux in Singapore – In: Singapore-ETH Centre (SEC), Cooling Singapore (CS) (Hrsg): Technical Report – Singapur.
- Schaumberger A., Eitzinger J. & Formayer H. (2008): Räumliche Modellierung der potenziellen Evapotranspiration. – Salzburg, 626-628; auch online unter: https://raumberg-gumpenstein.at/downloads/Forschungsberichte/Umweltressourcen_im_Gruenland/Klimafolgen/2_2008_Raumliche%20Modellierung_Evapotranspiration.pdf (10.11.2024).
- Schönwiese C. (2024): Klimatologie (6. Aufl.) – Stuttgart.
- Schwab U. & Steinicke W. (2003): Stadtklimauntersuchung Wien. Im Auftrag der MA 22. - Wien.
- SEC (Singapore-ETH Centre) (Hrsg.) (o. J.): About Cooling Singapore; <https://sec.ethz.ch/research/cs/About.html> (25.01.2025).
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (Hrsg.) (2007). Reducing stormwater costs through low impact development (LID) strategies and practices. – Washington.
- VCÖ (Verkehrsclub Österreich) (Hrsg.) (2019): Wie Städte die Mobilitätswende voranbringen. – In: VCÖ-Schriftenreihe „Mobilität mit Zukunft“; auch online unter: <https://www.vcoe.at> (17.12.2024).
- Wang X., Dallimer M., Scott C.E., Shi W. & Gao J. (2021): Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces. – In: The Science Of The Total Environment, 770, 145211.
- Stadt Wien (Hrsg.) (2024): Wetter – Offizielle Statistik der Stadt Wien; <https://www.wien.gv.at/statistik/wetter/#jahresrueckblick> (16.11.2024).
- Wien Energie GmbH. (Hrsg.) (2024): Fernkälte für Wien. Wie funktioniert Fernkälte?; <https://www.wienenergie.at/ueber-uns/unternehmen/energie-klimaschutz/energieerzeugung/fernkaelte/> (13.02.2025)

Yang J., Wang Z. & Kaloush K. (2015): Environmental impacts of reflective materials: Is High Albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island? – In: Elsevier, 47, 830-843.