



**Huiwen Zhang, Xiaoli Chi, Felix Müller, Ines Langer und
Sahar Sodoudi**

Wie wirkt sich der Tiergarten Berlin auf das Wohlbefinden der Menschen aus?

Eine Studie über den Kühlungseffekt von Grünflächen und den thermischen
Komfort der Fußgänger

In:

Reinhard F. Hüttl / Karen David / Bernd Uwe Schneider (Hrsg.): Historische Gärten und
Klimawandel : eine Aufgabe für Gartendenkmalpflege, Wissenschaft und Gesellschaft
ISBN: 978-3-11-060748-2. – Berlin/Boston: De Gruyter Akademie Forschung, 2019
(Forschungsberichte / Interdisziplinäre Arbeitsgruppen der Berlin-Brandenburgischen
Akademie der Wissenschaften ; 42)
S. 167-179

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-34871](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-34871)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer
Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (cc by-nc-sa 4.0) Licence
zur Verfügung gestellt.



Huiwen Zhang, Xiaoli Chi, Felix Müller, Ines Langer und Sahar Sodoudi

WIE WIRKT SICH DER TIERGARTEN BERLIN AUF DAS WOHLBEFINDEN DER MENSCHEN AUS?

Eine Studie über den Kühlungseffekt von Grünflächen
und den thermischen Komfort der Fußgänger

Abstract

Untersucht werden in dieser Studie die Gehwege des Tiergartens. Anhand von Feldmessungen auf neun verschiedenen Wegen mit unterschiedlichen Konfigurationen von Breite, Vegetation und Beschattung und einer ENVI-met-Simulationsreihe von fünfzehn entsprechenden Szenarien untersucht diese Studie, wie sich der Vegetationstyp entlang des Weges, der Überdachungszustand und die Gehwegbreite auf den menschlich-thermischen Komfort auswirken.

This study looks at footpaths in the Tiergarten. Based on field measurements of nine different paths with differing configurations of width, vegetation and shade and an ENVI-met simulation series with 15 corresponding scenarios, this study examines how the type of vegetation along the paths, the condition of the canopy and the width of the paths impact human thermal comfort.

1. Einleitung

Aufgrund der Urbanisierung und des Klimawandels ist Berlin eine ausgeprägte Städtische Wärmeinsel (UHI – Urban Heat Island) und infolgedessen einem erhöhten Hitzebelastungsrisiko ausgesetzt. An heißen Sommertagen leiden die Menschen in der Berliner Innenstadt zunehmend unter Hitzestress, der zu gesundheitlichen Problemen führt. Für eine Stadt wie Berlin, in der viele Einwohner Freizeitaktivitäten nachgehen, sind Anpassungsstrategien für den Klimawandel sehr wichtig, um dem Hitzestress entgegenzuwirken.

Der Tiergarten ist aufgrund seiner zentralen Lage sowie seiner Größe hier besonders bedeutend. Als historischer Park und einstmaliges fürstliches Jagdrevier lassen sich seine

Im Text werden Maskulinum und Femininum verwendet, wenn es um Personen geht. Gemeint sind grundsätzlich alle Menschen, gleich welcher Geschlechtsidentität sie sich zugehörig fühlen.

Anfänge bis ins 16. Jahrhundert zurückverfolgen. Heute ist der Tiergarten mit seinem dichten Wald und weiträumigen Wiesen zu einem der wichtigsten natürlichen Naherholungs-orte für die Bewohner der Berliner Innenstadt geworden. Die großen Freiflächen sind von einem Geflecht aus Wegen durchzogen, die von den Berlinern für zahlreiche Freizeitakti-vitäten wie Joggen, Spaziergehen, Radfahren usw. genutzt werden.

Basierend auf diesen Voraussetzungen, wird es sowohl für die Fußgänger als auch für die Radfahrer interessant sein zu wissen, welche Wege im Tiergarten an heißen Sommer-tagen am kühlest sind. Wie können sich die Menschen bei Hitzestress für den thermisch komfortabelsten Weg entscheiden? Darüber hinaus wird es auch für Landschaftsarchitekten sinnvoll sein zu wissen, warum manche Wege im Park kühler sind als andere und welche Erkenntnisse sie für die Gestaltung zukünftiger, an den Klimawandel angepasster Park-wege gewinnen können.

Um diese Fragen zu beantworten, wurden im Rahmen dieser Studie die Gehwege im Tiergarten eingehend untersucht und folgende Forschungsarbeiten durchgeführt:

- 1) Messkampagne im Tiergarten Berlin – Beobachtung der meteorologischen Bedingun-gen an neun verschiedenen Gehwegtypen, die sich im Hinblick auf Wegbreiten und die sie umgebenden Vegetationstypen unterscheiden.
- 2) Numerische Simulation idealisierter Szenarien von Parkwegen zur Ergründung von kühlenden Faktoren, um Vorschläge für die zukünftige Gestaltung von Parkwegen zu liefern.
- 3) Zusammenführung der Ergebnisse in einer Karte mit Parkwegen, die den Bürgern für ihre Aktivitäten bei Hitzestress empfohlen werden.

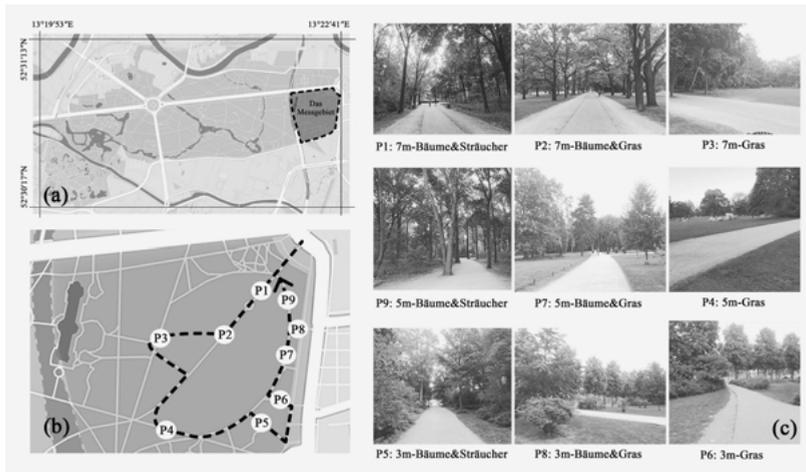
2. Methodik

2.1 Messungen

2.1.1 Gestaltung der Messungen

Der Tiergarten erstreckt sich über eine Fläche von ca. 210 ha und besitzt Parkwege mit einer Länge von insgesamt 18,31 km. Nach einer gründlichen Untersuchung aller Wege wurde fest-gestellt, dass sie anhand zweier Eigenschaften klassifiziert werden können: zum einen durch die Breite der Wege und zum anderen durch die sie umgebenden Vegetationstypen.

Daher wurden im Tiergarten neun Messpunkte ausgewählt, die die drei Wegbreiten (3 m, 5 m, 7 m) und die drei umgebenden Vegetationstypen (*Gras, Bäume und Gras, Bäume und Sträucher*) repräsentieren (Abb. 1c). Als Messareal wurde der südöstliche Teil des Tier-gartens (Abb. 1a) gewählt, da sich dort alle untersuchten Gehwegs-Konfigurationen wie-derfinden. Die neun Messpunkte befanden sich entlang einer Kreisbahn, sodass ein Mess-zyklus innerhalb von 30 Minuten zu Fuß bewältigt werden konnte (Abb. 1b). Gemessen wurde jeweils auf der Gehwegmitte.



1 Übersicht über die Messpunkte (a), Untersuchungsgebiet (b) und Messroute und -punkte (c).

Die Messung wurde vom 30. bis zum 31. August 2017 durchgeführt. Während des Mess-tages überschritt die maximale Lufttemperatur 30°C , was einem typischen heißen Tag entspricht. Die Messdauer betrug 24 Stunden, von 9:00 Uhr morgens am 30. August bis 9:00 Uhr morgens am 31. August, mit einem Messintervall von einer Stunde. Die gemessenen meteorologischen Parameter umfassten Lufttemperatur (T_a), relative Feuchtigkeit (RH), Windgeschwindigkeit (v) und den Sky View Factor (SVF). Der SVF beschreibt eine Horizontüberhöhung von einem Punkt des Himmels. Alle Messungen wurden auf einer Höhe von 1,1 m durchgeführt, die der allgemein definierten Mitte des menschlichen Körpers entspricht.

2.1.2 Messdatenanalyse

Hauptkriterien bei den Messversuchen waren die Breite des Gehweges und der Vegetationstyp entlang des Weges. Daher wurde die Analyse der Messdaten basierend auf diesen beiden Eigenschaften durchgeführt. Verglichen wurden gleichbleibende Gehwegbreite bei verschiedenen Vegetationstypen und verschiedene Gehwegbreiten bei gleichbleibenden Vegetationstypen. Die verglichenen Daten enthalten den Sky View Faktor (SVF), die Lufttemperatur (T_a) und die Windgeschwindigkeit (v).

2.2 Simulation

2.2.1 ENVI-met Modell

Diese Simulationen wurden mit dem Modell ENVI-met V4.3.2 durchgeführt. ENVI-met ist ein dreidimensionales gekoppeltes Strömungs-Energiebilanzmodell (Bruse/Fleer 1998).

Das Modell ist ein nicht hydrostatisches Modell, das ein einfaches eindimensionales Bodenmodell, ein Strahlungstransfermodell und ein Vegetationsmodell enthält (Huttner et al. 2008). Mit diesem Mikroklimamodelle lassen sich empirische Stadtklimaanalysen durchführen.

2.2.2 Entwurf idealisierter Szenarien von Gehwegen

Nach der Auswertung der gemessenen Daten wurde eine Hypothese formuliert. Der menschlich-thermische Komfort auf Gehwegen wird von drei Eigenschaften beeinflusst: der natürlichen Beschattung über dem Gehweg, der Breite des Weges und dem Vegetationstyp entlang des Weges. Daher wurde, basierend auf diesen drei Eigenschaften, eine Matrix von Szenarien für die Simulation entworfen. Tabelle 1 zeigt die Matrix der Simulation der drei Eigenschaften: drei Wegbreiten (3 m, 5 m, 7 m), drei umgebende Vegetationstypen (*Gras*, *Bäume und Gras*, *Bäume und Sträucher*) und zwei natürlichen Überdachungszuständen (mit/ohne Baumkronen über dem Gehweg).

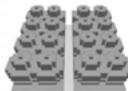
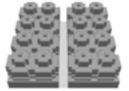
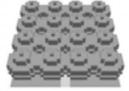
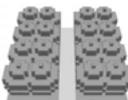
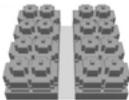
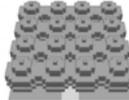
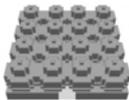
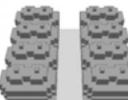
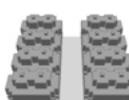
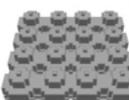
	ohne Baumkronen auf dem Gehweg		mit Baumkronen auf dem Gehweg		
	Gras	Bäume & Gras	Bäume & Sträucher	Bäume & Gras	Bäume & Sträucher
3 m					
5 m					
7 m					

Tabelle 1 Die idealisierten Simulationsszenarien

2.2.3 Konfiguration der Simulationen

Wie Tabelle 2 zeigt, wurde die Simulation für Berlin (52.52° N, 13.38° E) von 3:00 Uhr (30.08.2017) bis 10:00 Uhr (31.08.2017) (4 Stunden Spin-up-Zeit im Voraus) in einem Intervall von 60 Minuten durchgeführt. Die anfänglichen Forcing-Daten der Simulation ergaben sich aus der mittleren Lufttemperatur (T_s) und der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit (RH) der neun Messpunkte.

City	Berlin
Longitude, Latitude	52.52, 13.38
Elevation (m)	34
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY)	30.08.2017
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):	03:00:00
Total Simulation Time in Hours	31
Output interval main files (min)	60
Wind Speed in 10 m ab. Ground (m/s)	1.1
Wind Direction (0: N 90: E 180:S 270:W)	180 (South)
Roughness length (m)	0.01
Initial temperature atmosphere (K)	291.15
Relative Humidity in 2m (%)	75

Tabelle 2 Die Konfiguration der Simulation nach ENVI-Met-Modell

2.2.4 Auswertung der Simulationen

Um die Ausführung der Simulation zu bewerten, wurden die simulierte Daten mit den entsprechenden Messdaten verglichen. Die Tagesgänge der Lufttemperatur für die drei unterschiedlichen Vegetationstypen bei gleichbleibender Wegbreite (7 m) und die drei unterschiedlichen Wegbreiten des gleichen Vegetationstyps (*Bäume und Gras*) wurden mit ihren entsprechenden Simulationsszenarien verglichen. Die simulierte Ergebnisse stimmen gut mit den gemessenen Daten überein, woraus folgt, dass die Simulationen im Vergleich zwischen den Vegetationstypen und Gehwegbreiten zuverlässig sind.

Um das Simulationsmodell konkret zu verifizieren, wurde die tägliche mittlere Lufttemperatur der oben genannten sechs Messpunkte und der sechs Simulationspunkte mittels Regression verglichen. Der Regressionskoeffizient liegt bei $R=0,92$ ($P<0,05$, $n=24$) und zeigt eine hohe Korrelation zwischen simulierten und gemessenen Daten auf. Der mittlere quadratische Fehler (RMSE) beträgt 1,26 K mit einem mittleren Bias von 0,22. Aufgrund des hohen Korrelationskoeffizienten und des niedrigeren Bias kann das für diese Studie gewählte Simulationsmodell ENVI-met als genau und zuverlässig angesehen werden.

2.2.5 Analyse der Simulationsdaten

a. Bewertung des menschlich-thermischen Komforts durch die Berechnung der PET

Der menschliche Wärmekomfort ergibt sich aus der Kombination subjektiver Empfindungen und objektiver Interaktionen mit der Umwelt (Wärme- und Stoffübertragungsraten), die vom Gehirn reguliert werden. Er berücksichtigt personenbezogene Größen (Körperkerntemperatur, Alter, Geschlecht, Aktivität) und umweltbezogene Parameter (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und die mittlere Strahlungstemperatur) (Martinez o. J.). Ein häufig verwendeter Indikator für den menschlich-thermischen

Komfort, unter Berücksichtigung umweltbedingter Parameter, ist die physiologische Äquivalenttemperatur (PET) (Höppe 1999; Matzarakis et al. 1999).

Die PET ist definiert als die Lufttemperatur, bei der in einer typischen Innenumgebung (ohne Wind- und Sonneneinstrahlung) das Wärmebudget des menschlichen Körpers mit der gleichen Kern- und Hauttemperatur wie unter Außenbedingungen ausgeglichen wird (Höppe 1999). Der PET-Wert jedes Szenarios wurde berechnet, um den meteorologischen Zustand im Hinblick auf den menschlich-thermischen Komfort zu bewerten.

Der Punkt, der für die Berechnung der PET ausgewählt wurde, befand sich bei jedem Szenario in der Mitte des Gehweges, an der gleichen Stelle analog dem Messpunkt im Tiergarten. Die Berechnung der PET wurde mit der simulierten Windgeschwindigkeit (v), Lufttemperatur (T_a), relativen Feuchtigkeit (RH) und der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) durchgeführt. Dies geschah mit Hilfe des Mikroklimamodells RayMan Pro Version 2.1 (Matzarakis 2010; Lee et al. 2016).

b. Überblick über den simulierten menschlich-thermischen Komfort

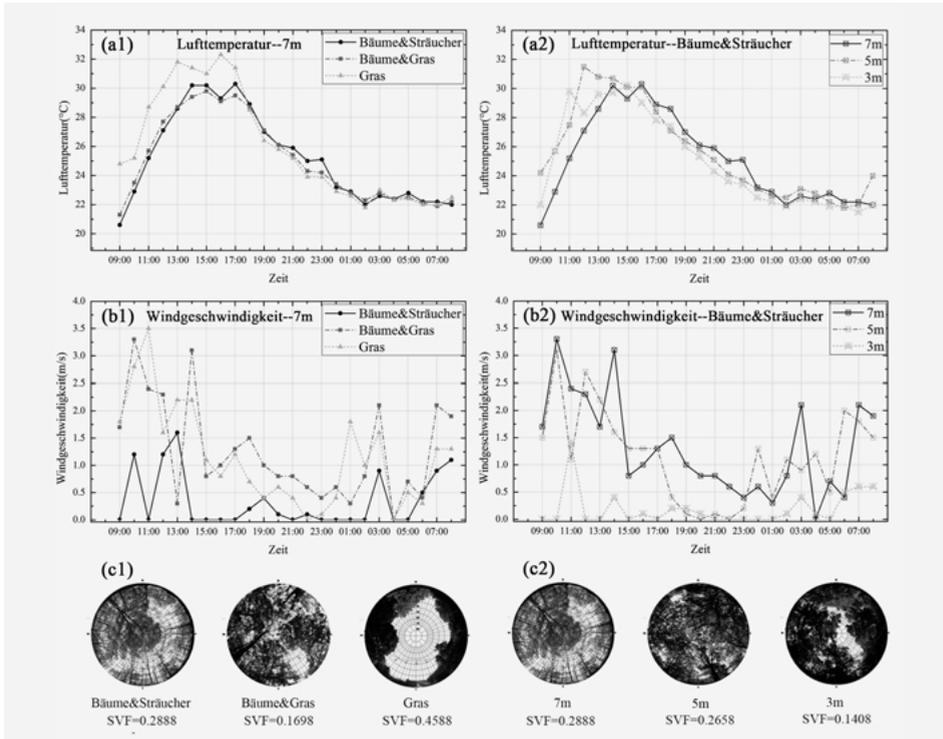
Um den simulierten menschlich-thermischen Komfort in allen Szenarien zu überblicken, wurden Karten der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) auf 1,1 m Höhe für jedes Szenario extrahiert und miteinander verglichen. Es wurden Karten für die Zeitschritte 14:00 Uhr und 22:00 Uhr erzeugt, um die Tages- und Nachtbedingungen wiederzugeben (Lehmann et al. 2014; Mathey et al. 2015).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnisse der Messungen

Der Tagesgang der Lufttemperatur (T_a) in 1,1 m Höhe (Abb. 2a1) zeigt, dass der Verlauf tagsüber auf dem von *Gras* umgebenen Gehweg höher liegt als auf den von *Bäumen und Gras* (bis 2,9 K) und *Bäumen und Sträuchern* (bis 3,2 K) umgebenen Wegen. Dieser Unterschied ist nachts nicht mehr festzustellen. Die Differenz der Lufttemperatur (T_a) des Tagesgangs unter den Vegetationstypen am Tag verhält sich analog zur Differenz des Sky View Faktors (SVF). Wie Abb. 2c1 zeigt, ist der SVF des von *Gras* umgebenen Gehweges (SVF=0,46) auch viel höher als der der anderen, während die SVFs von *Bäumen und Gras* (SVF=0,17) und *Bäumen und Sträuchern* (SVF=0,29) nah beieinanderliegen. Die Temperaturdifferenz bei Tag resultiert hauptsächlich aus den unterschiedlichen SVFs und der damit einhergehenden unterschiedlichen Intensität der kurzwelligen Strahlung. Folglich verschwindet die Diskrepanz der Lufttemperatur (T_a) bei Nacht aufgrund der Abwesenheit kurzwelliger Strahlung.

Abb. 2b1 zeigt den Tagesgang der Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Vegetationstypen. Die Windgeschwindigkeit auf dem von *Bäumen und Sträuchern* umgebenen Gehweg (max: 1,6 m/s) ist niedriger als die auf den von *Gras* (max: 3,5 m/s) und *Bäumen und Gras* (max: 3,3 m/s) umgebenen Wegen. Das zeigt, dass die Ventilation auf dem Gehweg



2 (a1) Tagesgang der Lufttemperatur (T_a) auf dem 7m breiten Gehweg, umgeben von drei Vegetationstypen (Gras, Bäume & Gras, Bäume & Sträucher), und (a2) Tagesgang der T_a auf 7m, 5m und 3m breiten Gehwegen, umgeben von Bäume & Gras von 9:00 Uhr am 30. August 2017 bis 8:00 Uhr am 31. August 2017; (b1) Tagesgang der Windgeschwindigkeit an den drei Messpunkten auf dem 7m breiten Gehweg und (b2) umgeben von Bäume & Gras; (c1) Sky View Factor (SVF) an den drei Messpunkten auf dem 7m breiten Gehweg und (c2) SVF an den drei Messpunkten umgeben von Bäume & Gras.

durch die seitlichen Sträucher und die Baumkronen blockiert wurde. Der hohe Sky View Faktor (SVF) kann auch die Ventilation auf dem Gehweg erhöhen. Darüber hinaus zeigt der von *Bäumen und Gras* umgebene Gehweg trotz der dichten Baumkronen immer noch die ähnlich gute Ventilation wie der mit *Gras* umgebene Weg. Dies zeigt, dass die Abwesenheit von Sträuchern die Ventilation verbessern kann.

Wenn die SVFs sich ähneln, ist ebenfalls die tägliche Variation der Lufttemperaturen ähnlich (Abb. 2a2). Daraus folgt, dass der Einfluss der Gehwegbreite auf die Lufttemperatur nicht so stark ist wie der Einfluss des SVF. Aus Abb. 2b2 geht hervor, dass die Windgeschwindigkeit auf dem 7m breiten Gehweg höher ist (max: 3,4 m/s) als auf dem 3m (max: 1,5 m/s) bzw. 5m (max: 3,2 m/s) breiten Weg. Demnach hat die Gehwegbreite Einfluss auf die Ventilation.

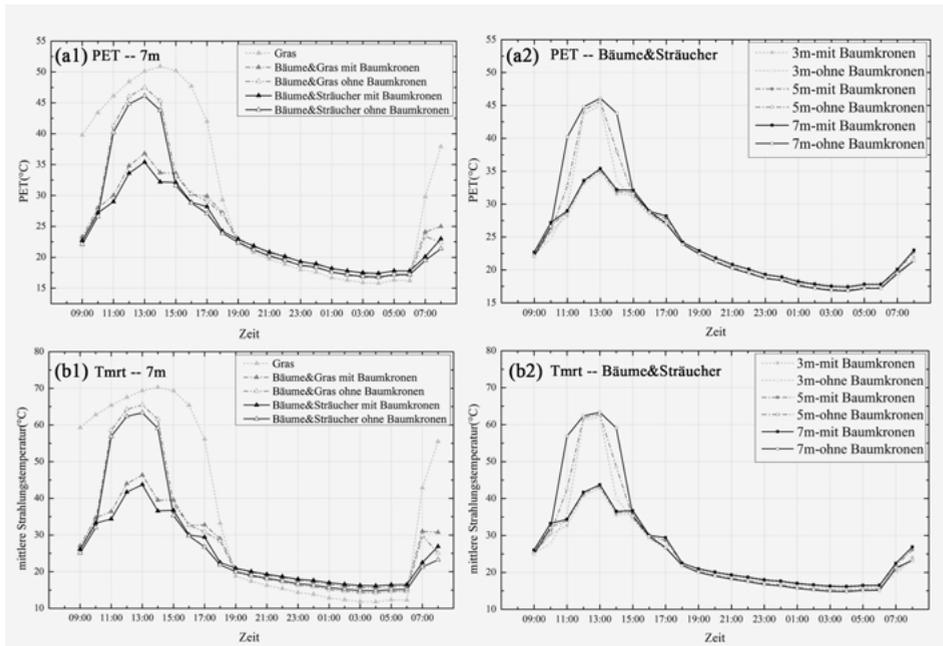
3.2 Ergebnisse der Simulationen

3.2.1 Analyse des menschlich-thermischen Komforts

Abb. 3a1 zeigt den Tagesgang der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) der Szenarien mit gleicher Gehwegbreite und den verschiedenen Vegetationstypen und den Baumkronen. Es konnte festgestellt werden, dass bei Tag das Baumkronendach den dominierenden Faktor für den menschlich-thermischen Komfort darstellt. Durch das Fehlen von natürlicher Beschattung ist die PET beim Vegetationstyp *Gras* am größten (bis 51,2°C), demnach 17,5 K höher als das Minimum beim Vegetationstyp *Bäume und Sträucher*. Des Weiteren ist die PET bei Szenarien mit natürlicher Gehwegüberdachung kleiner als in den entsprechenden Szenarios ohne Blätterdach (mit einem Unterschied von 10 K). Bei gleicher Gehwegbeschattung ist die PET im Szenario *Bäume und Sträucher* niedriger als die des Szenarios *Bäume und Gras*. Allerdings ist der Unterschied (max: 2 K) nicht so offensichtlich wie der, der durch das Baumkronendach verursacht wird. Nachts kehrt sich dieses Verhalten ins Gegenteil um. Das Szenario *Gras* hat die niedrigste PET, während das Szenario *Bäume und Sträucher* mit natürlicher Gehwegbeschattung die höchste PET aufweist. Der Unterschied der PET zwischen den verschiedenen Szenarien (max: 2,5 K) ist nachts jedoch nicht so stark ausgeprägt wie zur Tagzeit.

In der Nacht blockieren die Baumkronen und Sträucher die langwellige Rückstrahlung und fangen die Hitze auf dem Gehweg ein. Das kann durch den Tagesgang der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) der Szenarien belegt werden (Abb. 3b1). Von allen simulierten Daten, die für die Berechnung der PET verwendet wurden, wies die T_{mrt} die höchste Korrelation auf, ähnlich den PET-Ergebnissen. Die Übereinstimmung von T_{mrt} und PET, die in Abb. 3a1, 3b1 gezeigt wird, beweist, dass der menschlich-thermische Komfort der Simulationsszenarien durch die T_{mrt} dargestellt werden kann.

Abb. 3a2 zeigt den Tagesgang der PET der Szenarien mit gleichem Vegetationstyp (*Bäume und Sträucher*) und unterschiedlichen Gehwegbreiten (3 m, 5 m, 7 m) und unter Baumkronen gelegen. Tagsüber ist das Baumkronendach der dominierende Faktor bei der Berechnung der PET. Bei gleicher natürlicher Gehwegbeschattung und breiter werdendem Gehweg erhöht sich die PET. Die PET auf dem 7 m breiten Gehweg ist tagsüber etwas höher als auf den 5 m und 3 m breiten Wegen. Der PET-Unterschied, der durch unterschiedliche Gehwegbreiten entsteht, beträgt nur 1 K, jedoch sehr klein im Vergleich zu dem, der durch die natürliche Gehwegbeschattung entsteht (max: 10 K). Nachts kehrt sich das Verhalten der PET um. Die PET auf dem 7 m breiten Gehweg nimmt den niedrigsten und analog die PET auf dem 3 m breiten Weg den höchsten Wert an. Der Unterschied zwischen den Szenarien bei Nacht ist jedoch geringer als am Tag (nur 2 K). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der breitere Weg tagsüber mehr kurzwellige Strahlung auf einer größeren Fläche aufnehmen und nachts weniger langwellige Strahlung an seine Umgebung abgeben kann. Diese Erklärung kann auch durch den Tagesgang der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}) der Szenarien belegt werden (Abb. 3b2).

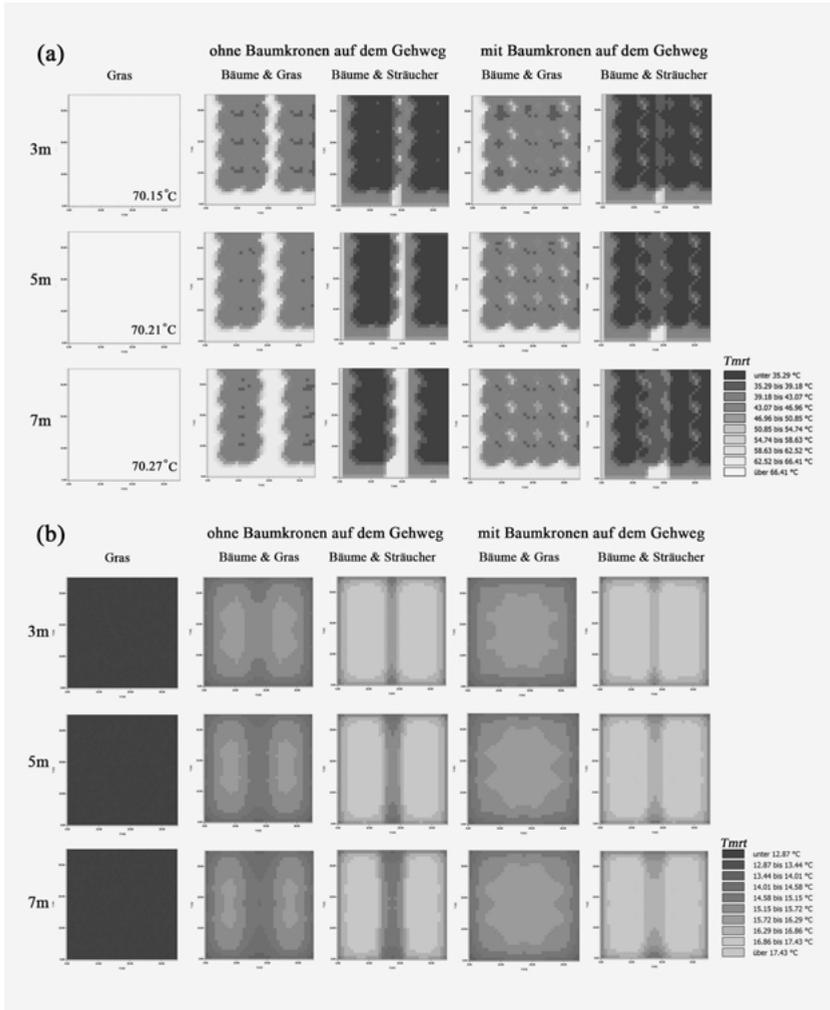


3 (a1) Die aus den simulierten Daten berechnete physiologische Äquivalenztemperatur (PET) und (b1) die simulierte mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) der Szenarien bei gleicher Gehwegbreite (7 m), verschiedenen Vegetationstypen (Gras, Bäume & Gras, Bäume & Sträucher) und verschiedenen natürlichen Gehwegüberdachungen (mit und ohne Baumkronen über dem Weg); (a2) Die aus den simulierten Daten berechnete physiologische Äquivalenztemperatur (PET) und (b2) die simulierte T_{mrt} der Szenarien bei gleichem Vegetationstyp (Bäume & Sträucher), verschiedenen Gehwegbreiten (3 m, 5 m, 7 m) und verschiedenen natürlichen Gehwegüberdachungen (mit und ohne Baumkronen über dem Weg).

3.2.2 Überblick über den simulierten menschlich-thermischen Komfort

Wie bereits in Abb. 3 gezeigt wurde, kann die simulierte mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) näherungsweise den menschlich-thermischen Komfort darstellen. Um die Bedingungen des menschlich-thermischen Komforts in allen Simulationsszenarien zu überblicken, wurden Karten der T_{mrt} bei 1,1 m für jedes Szenario extrahiert und zu Tages- (14:00 Uhr) und Nachtzeiten (22:00 Uhr) verglichen.

Abb. 4a veranschaulicht den Vergleich der T_{mrt} -Karten um 14:00 Uhr. Es zeigt sich, dass der dominierende Faktor des menschlich-thermischen Komforts auf dem Gartenpfad tagsüber die natürliche Gehwegüberdachung ist. Alle T_{mrt} -Werte auf dem überschatteten Weg sind geringer als die auf den nicht-beschatteten Wegen, mit einem Unterschied von 12,1 K. In den Szenarien mit *Gras*, die der kurzwelligen Strahlung vollständig ausgesetzt sind, tritt die höchste T_{mrt} auf (max: 70,27°C). Der zweitwichtigste Faktor hinsichtlich des menschlich-thermischen Komforts am Tag ist der Vegetationstyp. Bei gleicher Gehwegbeschattung sind alle T_{mrt} -Werte auf den Wegen, die vom Vegetationstyp *Bäume und Sträucher* umge-



4 (a) Die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) in 1,1 m Höhe um 14:00 und (b) um 22:00 Uhr für jedes Simulationsszenario (ENVI-met).

ben sind, niedriger als bei den von *Bäumen und Gras* umgebenen (mit einem Unterschied von 2,6 K bis 3,5 K). Der dritt wichtigste Faktor am Tag ist die Breite des Weges. Wenn die Gehwegbeschattung und der Vegetationstyp gleich sind, steigt die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) auf dem Gehweg mit seiner Breite.

Abb. 4b zeigt den Vergleich von T_{mrt} -Karten um 22:00 Uhr. Bäume, die einen Weg überschatten, geben eine natürliche Gehwegbeschattung. Diese ist auch nachts der dominierende Faktor für den menschlich-thermischen Komfort auf den Gehwegen. Der zweitwichtigste Faktor in der Nacht ist die natürliche Gehwegbeschattung. Bei gleichem Vegetationstyp

haben alle Wege, die unter Baumkronen liegen, eine höhere T_{mrt} (mit einem Unterschied von 1,2 K). Der zweitwichtigste Faktor in der Nacht ist der Vegetationstyp. Auf den von *Bäumen und Sträuchern* umgebenen Wegen ist die mittlere Strahlungstemperatur höher als bei den von *Bäumen und Gras* umgebenen (mit einem Unterschied von 0,5 K). Am niedrigsten ist die mittlere Strahlungstemperatur auf den von *Gras* umgebenen Gehwegen. Der dritt wichtigste Faktor hinsichtlich des menschlich-thermischen Komforts in der Nacht ist die Breite des Gehweges. Bei gleichem Vegetationstyp und gleicher Gehwegbeschattung nimmt die mittlere Strahlungstemperatur mit zunehmender Wegbreite ab.

Beim Vergleich von Abb. 4a und Abb. 4b zeigt sich, dass sich die Bedingungen für den menschlich-thermischen Komfort nachts in ihr Gegenteil umkehren. Das kälteste Szenario am Tag (3 m Gartenweg, Gehwegüberschattung, umgeben von *Bäumen und Sträuchern*) ist in der Nacht das wärmste. Entsprechend ist das wärmste Szenario tagsüber (7 m Gartenweg, umgeben von *Gras*) das kühlsste in der Nacht.

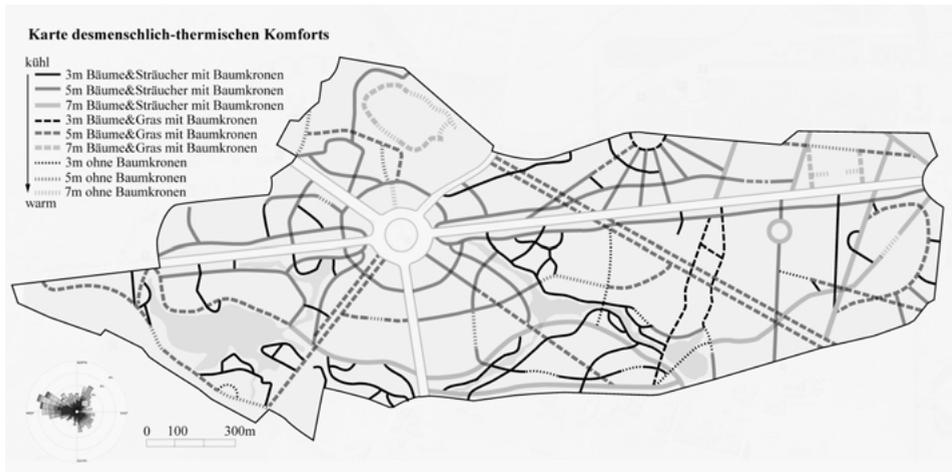
3.3 Eine Karte des menschlich-thermischen Komforts des Tiergartens

Anhand der in dieser Studie gezogenen Schlussfolgerungen wurde eine Karte des Tiergartens erstellt, die die Gehwege und ihren jeweiligen menschlich-thermischen Komfort abbildet. Auf der Karte wurden alle Gehwege des Tiergartens nach ihrer Breite, ihrer natürlichen Beschattung und ihrer Vegetationsumgebung klassifiziert. Es erfolgt eine Einstufung der Klassen nach ihrer theoretischen Leistung hinsichtlich des menschlich-thermischen Komforts.

Abb. 5 zeigt die menschliche Wärme komfortkarte des Tiergartens für Sommertage. Die Ergebnisse zeigen, dass die Blätter den stärksten Einfluss auf den menschlich-thermischen Komfort tags- und nachtsüber haben. Alle von Baumkronen beschatteten Wege sind kühler als jene ohne Beschattung. Nach der Beschattung ist der Vegetationstyp der zweiteinflussreichste Faktor. Wege der Klasse »Bäume und Sträucher« zeigen sich kühler als Wege der Klasse »Bäume und Gras«. Am wenigsten Einfluss hat die Gehwegbreite, obwohl sich engere Wege kühler zeigen.

Dieser Klassifikation folgt eine Einteilung, die den menschlich-thermischen Komfort an heißen Tagen anzeigt. Diese Karte kann den Fußgängern und Radfahrern im Tiergarten helfen, bei hoher Hitzebelastung einen komfortablen Weg zu wählen. Darüber hinaus kann sie ein Wegweiser für das Grünflächenamt des Tiergartens sein, um diesen historischen Garten an die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels anzupassen.

Die Karte, die wir erstellt haben, ist eine grobe Projektion gemäß den Forschungsergebnissen. Die Glaubwürdigkeit der Karte belegt ihre Bewertung in Kapitel 2.2. Das aktuelle Umfeld im Tiergarten ist komplizierter und die Dichte der Bäume ist inhomogen. Dies kann zu einer gewissen Verzerrung der Projektion führen. In Zukunft müssen im Tiergarten mehr Feldmessungen durchgeführt werden, um den thermischen Komfort des Menschen zu überprüfen.



5 Karte des menschlich-thermischen Komforts auf den Gehwegen im Tiergarten an heißen Tagen.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der menschlich-thermische Komfort auf den Gehwegen wird von der Überdachung, dem Vegetationstyp entlang des Weges und seiner Breite beeinflusst sowie durch die Horizontüberhöhung. Die Überdachung ist der bestimmende Faktor, der den menschlich-thermischen Komfort beeinflusst. Der Vegetationstyp und die Breite des Wegs sind die zweit- und drittichtigsten Faktoren.

An heißen Sommertagen können Gehwege mit geringer Breite, die von dichten Baumkronen überschattet werden und von dichter Vegetation umgeben sind, einen besseren menschlich-thermischen Komfort bei Hitzestress bieten. Gegenteiliges zeigt sich nachts. Breite Gehwege, umgeben von wenig Vegetation und wenig natürlicher Beschattung, sind kühler. Die Ursache hierfür sind Baumkronen und Sträucher, die kurzweilige Strahlung blockieren und langwellige Strahlung einfangen. Das Blockieren der kurzweiligen Strahlung stellt tagsüber den dominierenden Faktor für den menschlich-thermischen Komfort dar. Analog übernimmt nachts die eingefangene langwellige Strahlung diese Rolle.

Vorangegangene Forschungen (Shashua-Bar et al. 2011; de Abreu-Harbach et al. 2015) zum menschlich-thermischen Komfort bei Fußgängern konzentrierten sich hauptsächlich auf die Verschattung. In dieser Studie wird nicht nur die Überdachungsdichte, sondern auch die Vertikaldichte (Vegetationstypen) und der Öffnungsgrad des Raumes (Gehwegbreite) untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie stehen im Einklang mit früheren Forschungen zur Überdachungsdichte. Darüber hinaus verdeutlichen sie zusätzlich, wie der menschlich-thermische Komfort bei Fußgängern von allen drei Eigenschaften beeinflusst wird. Da alle Wege im Tiergarten durch diese drei Eigenschaften beschrieben werden können, wurde anhand der Ergebnisse dieser Studie eine Karte für den menschlich-thermi-

schen Komfort auf den Gehwegen des Tiergartens erstellt. Diese Karte kann als Fortschritt in der praktischen Anwendung der Ergebnisse der Klimaforschung angesehen werden. Ziel dieser Studie ist die Untersuchung des menschlichen Wärmekomforts an heißen Sommertagen und die Vermeidung von Hitzestress. In den nächsten Schritten sollten auch winterliche Bedingungen, speziell Kältestress, in Bezug auf den Einfluss der Grünflächen untersucht werden. Diese weiteren Ergebnisse sollen auch Eingang in die Karte zum menschlich-thermischen Komfort finden.

Literaturverzeichnis

- Bruse, Michael; Fler, Heribert (1998): Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. In: *Environmental modelling & software* 13.3–4, 373–384.
- de Abreu-Harbach Loyde, Vieira; Chebel Labaki, Lucila; Matzarakis, Andreas (2015): Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. In: *Landscape and Urban Planning* 138, 99–109.
- Höppe, Peter (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. In: *International journal of Biometeorology* 43.2, 71–75.
- Huttner, Sebastian; Bruse, Michael; Dostal, Paul (2008): Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities. In: *5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology* 18.18, 307–312.
- Lee, Hyunjung; Mayer, Helmut; Chen, Liang (2016): Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. In: *Landscape and urban planning* 148, 37–50.
- Lehmann, Iris; Mathey, Juliane; Rößler, Stefanie; Bräuer, Anne; Goldberg, Valeri (2014): Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services – Application to the analysis of micro-climatic effects. In: *Ecological Indicators* 42, 58–72.
- Martinez, Isidoro (n.d.): Human thermal comfort. *Webserver of the Department of Motopropulsion and Thermal fluid dynamics, Technical University of Madrid*. <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/Env/Human%20thermal%20comfort.pdf> (30.11.2018).
- Mathey, Juliane; Rößler, Stefanie; Banse, Juliane; Lehmann, Iris; Bräuer, Anne (2015): Brownfields as an element of green infrastructure for implementing ecosystem services into urban areas. In: *Journal of Urban Planning and Development* 141.3, A4015001.
- Matzarakis, Andreas; Mayer, Helmut; Iziomon, Moses G. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. In: *International journal of biometeorology* 43.2, 76–84.
- Matzarakis, Andreas; Rutz, Frank; Mayer, Helmut (2010): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. In: *International journal of biometeorology* 54.2, 131–139.
- Shashua-Bar, Limor; Pearlmutter, David; Erell, Evyatar (2011): The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International journal of climatology* 31.10, 1498–1506.

Bildnachweis

1–5 Huiwen Zhang, Xiaoli Chi, Felix Müller, Ines Langer, Sahar Sodoudi.