

Berichte	Bd. 89, H. 3, 2015, S. 237–256	Leipzig
----------	--------------------------------	---------

Annike SCHIRMANN, Salzburg  
Angela HOF, Salzburg

## **Gezielte urbane Freiraumgestaltung wider den Hitzestress – prospektiv-modellierende mikroklimatische Analysen zur innerstädtischen Freiraumgestaltung**

### **Summary**

Urban development under climate change is one of the biggest societal challenges. Given the demonstrated positive effect of green infrastructure on urban climate regulation, it is not surprising that planning-oriented amendments and suggestions for urban planning measures often follow the motto ‘more green is always good’. Yet, how do decision makers in urban and environmental planning find scientific recommendations that take into account climate change, that examine weak points of planned constructions in terms of thermal comfort and that provide applicable planning recommendations? The micro-climatic and air-hygienic effect of planted urban vegetation can be proactively analyzed before final designs are implemented. The paper examines thermal comfort in advance of the redevelopment of an inner-city square using a micro-climatic numerical simulation of urban landscape design scenarios. From this modelling, the paper derives insights and practical recommendations on how the open space design can be optimized in terms of thermal comfort.

### **1 Einleitung**

Klimawandel ist für die Stadtentwicklung ein zentrales Zukunftsthema, weil das Stadtklima die Gesundheit der Stadtbewohner beeinflusst und insbesondere lokale Klimabedingungen für das subjektive Wohlbefinden relevant sind (PAULEIT et al. 2014). Dabei ist das Stadtklima nach LESER (2008) im weitesten Sinne auch Bioklima, weil es auf den Menschen einwirkt und zu physiologischen Reaktionen führt. Die Überwärmung von Stadtgebieten im Vergleich zu ihrem Umland ist ein gut dokumentiertes Phänomen, das den anthropogenen Einfluss auf das Mikroklima widerspiegelt (OKE 1973). Die Intensität der städtischen Wärmeinsel wird durch die Baustruktur und den Durchgrünungsgrad bestimmt (KUTTLER 2011). Diese Stadtstruktur und insbesondere das Verhältnis von Grün- und Freiräumen zu versiegelter Fläche sind entscheidend für die Ausprägungen der Strahlungs- und Windverhältnisse und dem daraus resultierenden thermischen Wirkungskomplex, der den menschlichen Organismus beeinflusst. Den Nexus zwischen den Herausforderungen,

die sich den Städten stellen und dem Handlungsbedarf hat Kuttler (2011, 7) eindringlich beschreiben: „In Stadtquartieren, die bereits unter den gegebenen klimatischen Bedingungen Wärmeinseln aufweisen, dürften die sommerliche Anzahl, Intensität und Andauer der Uberwarmungsepisoden durch den Klimawandel zunehmen, falls diesen nicht durch Maßnahmen der Stadt- und Umweltplanung im Laufe der Zeit entgegengewirkt wird.“ Insbesondere das Stadtgrün besitzt klimatisches Ausgleichpotenzial und eine positive bioklimatische Wirkung (FRYD et al. 2011; MATHEY et al. 2012), was in verschiedenen empirischen Untersuchungen dargestellt wurde (DUTEMEYER et al. 2014; LEHMANN et al. 2014; ZHOU et al. 2011).

Vor dem Hintergrund des für Deutschland prognostizierten Anstiegs der mittleren Jahrestemperatur sowie der Häufigkeit, Dauer und Intensität thermischer Extremereignisse (KUTTLER 2011), des anhaltenden Trends der Urbanisierung durch Zunahme der Bevölkerungsanteile, die in Städten und ihrem Umland leben (WURM u. TAUBENBÖCK 2015) und der anhaltenden Flächenversiegelung mit ihren positiven Rückkopplungseffekten auf die städtische Warmeinselintensitat (HELDENS u. ESCH 2015) und einer alternden, zunehmend sozial segregierten Stadtbevölkerung kommt einer vorausschauenden Ausgestaltung des städtischen Freiraums höchste planerische Relevanz zu (KETTERER u. MATZARAKIS 2014). Zugespitzt formuliert könnte ein urbanes Leitmotto lauten, dass das Auftreten von Extremtemperaturen durch gezielte Planung von Stadt- und Freiraumstrukturen zu vermeiden ist. Diesem Gedankengang folgend werden nachstehende Zielsetzungen für die prospektiv-modellierenden mikroklimatischen Analysen zur innerstädtischen Freiraumgestaltung formuliert:

- Überprüfung eines städtischen Bauvorhabens auf mögliche Schwachpunkte hinsichtlich des thermischen Komforts.
- Entwicklung anwendbarer Planungsempfehlungen zur Verbesserung des thermischen Komforts der Nutzer eines innerstädtischen Platzes.
- Untersuchung der Eignung der Simulationssoftware ENVI-met (Bruse 1999; Bruse 2015) für den Berufsalltag von Stadt- oder Grunraumplanern.
- Eine zentrale Fragestellung ist, wie die Freiraumgestaltung des untersuchten Platzes in Bezug auf den thermischen Komfort optimiert werden kann.

## **2 Die Planungen für das Bahnhofsareal Rosenheim und mikroklimatische Modellierung der Aufenthaltsqualität**

Die hier untersuchte Stadt Rosenheim in der Metropolregion München ist insbesondere aus zwei Gründen ein geeignetes Fallbeispiel für eine prospektiv-modellierende mikroklimatische Analyse zur innerstädtischen Freiraumgestaltung. Zum einen zählt die Stadt Rosenheim unter den 96 Landkreisen und kreisfreien Städten in Bayern zu den Gemeinden, die gemessen an der versiegelten Fläche pro Einwohner auf Gemeindeebene die höchste Effizienz der Nutzung der Flächenressourcen haben. Gemessen an diesem Versiegelungsma liegt Rosenheim bayernweit auf dem vierten Rang (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2007). Nur die Großstädte Nürnberg, Augsburg und München sind

stärker verdichtet und somit erreicht die kreisfreie Stadt Rosenheim mit 60.000 Einwohnern zwar nicht die Flächen- und Einwohnerzahl bayerischer oder anderer deutscher Großstädte, dennoch spiegelt ihre aktuelle klimatische Situation die Problematik der städtischen Wärmeinsel idealtypisch wider. Eigene Recherchen und Berechnungen nach Kennzahlen zum Stadtklima Rosenheims zeigen, dass es zwischen 1981 und 2010 in Rosenheim im Schnitt 49,1 Sommertage pro Jahr gab (DEUTSCHER WETTERDIENST [im Folgenden immer: DWD] 2015a, o.S.), d. h. Tage, an denen das Maximum der Lufttemperatur mindestens 25 °C betrug (DWD 2015b, o.S.). Davon waren im Schnitt 9,2 Tage sog. „Heiße Tage“ (DWD 2015c, o.S.), d. h. Tage mit maximalen Lufttemperaturen von mindestens 30 °C (DWD 2015d, o.S.). Zum Vergleich: Zwischen 1981 und 2010 traten in Gesamtdeutschland durchschnittlich nur 34,3 Sommertage und 6,5 Heiße Tage pro Jahr auf (DWD 2015a, c, o.S.). Das Stadtklima Rosenheims wird also von der in der regionalen Klimaprojektion „Inn“ prognostizierten Zunahme der Häufigkeit von Sommertagen und Heißen Tagen besonders betroffen sein (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2012).

Zum anderen befindet sich mit dem Bahnhofsareal Süd in Rosenheim eine 40 Hektar große innerstädtische Brachfläche, für die ein „Städtebaulicher Rahmenplan für Neuordnung und Entwicklung“ von einem Architekturbüro in Zusammenarbeit mit der Stadtverwaltung erstellt wurde (STADT ROSENHEIM 2011a, 41). Dieser umfasst Grundsätze und Zielvorstellungen zur Umgestaltung des Bahnhofsareals und bildet die Grundlage für das weitere Planungsverfahren (PESCH et al. 2011, 7).

Im Zuge der Stadtumbaumaßnahme soll eine zügige Neuordnung und die zukunftsorientierte, qualitätsvolle und nachhaltige Entwicklung des Rosenheimer Bahnhofsareals erfolgen (STADT ROSENHEIM 2011a, 4f., 36). Es soll ein innerstädtisches Areal mit bedarfsgerechter und gemischter sowie städtebaulich und wirtschaftlich sinnvoller Nutzung unter Beachtung gesamtstädtischer Erfordernisse entstehen (STADT ROSENHEIM 2011a, 5, 7). Zu den stadtoökologischen Zielen zählt in erster Linie die Anbindung des Bahnhofsareals an die wichtigsten innerstädtischen Grünanlagen und zur offenen Landschaft, da sich in direkter Umgebung vielfältige innerstädtische Freizeit- und Aufenthaltsflächen anschließen, wie z. B. der Freiraum entlang der Mangfall und das Gelände der Landesgartenschau 2010. Die Anbindung an die vorhandenen Grünflächen würde auch die Aufenthaltsqualität des Bahnhofsareals steigern. Die Begrünung des zentralen Platzes wird vom Architekturbüro und der Stadtverwaltung nicht als ökologisches Kernelement der Planung wahrgenommen, sondern soll vor allem dem optischen Gesamtgefüge aller Grünflächen dienen und zu diesen hinleiten. Außer Acht gelassen wurden jedoch bislang nicht nur die ästhetischen, sondern auch die vielfältigen weiteren Wirkfaktoren der Vegetation, wie z. B. das Bewahren eines Biotopverbunds und die klimatischen Auswirkungen. Die vorliegende Untersuchung zeigt auf, wie prospektiv-modellierende mikroklimatische Analysen die Planung der Freiraumgestaltung ergänzen und entscheidungsunterstützend bereichern kann. Untersuchungsgegenstand ist der zentrale Quartiersplatz, da er eine hohe Nutzung erwarten lässt.

### *2.1 Rahmenplanung Bahnhofsareal in Rosenheim*

Der Rosenheimer Bahnhof wurde im Jahr 1876 auf das bis dato weitgehend unbebaute Gelände südwestlich des damaligen Stadtgefüges verlegt. Das Areal beherbergte neben dem Personenbahnhof zunächst auch einen Güter- und Rangierbahnhof sowie weitere eisenbahnbezogene Nutzungen. Die über den Passagierbetrieb hinausgehenden Nutzungen wurden von der Deutschen Bahn inzwischen größtenteils aufgegeben, sodass aktuell große Flächen brach liegen, wodurch die grundsätzliche Umgestaltung des Geländes ermöglicht wird. Dies ist wünschenswert, denn die vormaligen flächenintensiven Bahnnutzungen haben inhomogene Strukturen beachtlicher Größe hinterlassen, die eine Barrierewirkung im zwischenzeitlich gewachsenen Stadtgefüge erzeugen. Diese wird durch einen Mangel an Querungsmöglichkeiten und durch die Existenz der Brachflächen verstärkt und so sind trotz Innenstadtnähe weite Flächen des Bahnhofsareals mindergenutzt (PESCH et al. 2011, 5, 15; STADT ROSENHEIM 2011a, 3, 15, 54). Infolge der ungenutzten Bahnflächen, inadäquater kleinteiliger Folgenutzungen, stadtgestalterischer Mängel, inhomogener Eigentumsverhältnisse sowie unterschiedlicher Verwertungsinteressen bestehen erhebliche städtebauliche Funktionsverluste, die Anpassungen zur Herstellung nachhaltiger städtebaulicher Strukturen erfordern. Bei Nichtdurchführung der Stadtumbaumaßnahme wird eine arrondierende Nutzungserweiterung auf kleinteiligen Flächen und auf Basis von Angebotsplanungen realisiert. Aus städtebaulicher Sicht wäre dies fatal, denn die Trennwirkung des Areals bliebe bestehen und ein Großteil der ehemaligen Bahnflächen (insbesondere im Südwesten, d. h. der Lage des Untersuchungsgebiets) würde langfristig einer baulichen Nutzung entzogen. Die weitere Herausbildung des Leitbildes als Einkaufsstadt und Bildungszentrum würde erschwert und die Bedeutung Rosenheims als Partnerstadt Münchens abnehmen (STADT ROSENHEIM 2011a, 4f., 19).

### *2.2 Planungsvorgaben für das erweiterte Untersuchungsgebiet*

Die Überplanung des Areals wurde durch das Architekturbüro „Pesch Partner Architekten Stadtplaner“ durchgeführt (STADT ROSENHEIM 2011a, 3, 41). Der städtebauliche Rahmenplan (Abb. 1) dient neben der Beantragung von Fördermitteln vor allem als Grundlage zur Ausarbeitung der nachfolgenden Planungsverfahren (STADT ROSENHEIM 2011a, 41). Es handelt sich noch nicht um eine verbindliche Planung oder einen konkreten Architektenentwurf, sondern lediglich um eine veränderbare Planungsgrundlage, die nun fachlich ausgearbeitet wird (STADT ROSENHEIM 2011a, 41).

In der Planungsvariante „Urbane Plätze“ nimmt ein zentraler Quartiersplatz (Abb. 2) eine lenkende Funktion ein und ist Ausgangspunkt eines Brückenschlags über die Bahngleise sowie gleichzeitig Eingang in ein neues Stadtquartier. Das Gebiet ist in sich geschlossen und wird dank einer umlaufenden Erschließung von störendem Durchgangsverkehr freigehalten. Die Zufahrt erfolgt über eine Haupterschließung, die sich am Verlauf der Bahngleise orientiert. Große zusammenhängende Bauflächen und urbane Plätze mit hoher Aufenthaltsqualität werden entwickelt. Der Kernbereich bleibt Fußgängern und Radfahrern vorbehalten und

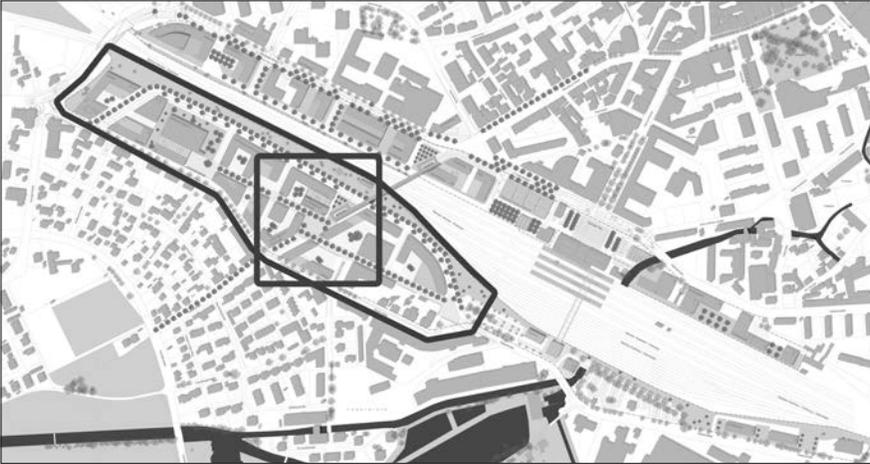


Abb. 1: Rahmenplan „Rosenheim – Bahnhofsareal“ (PESCH et al. 2011, 10), die graue Umrahmung entspricht dem Bahnhofsareal Süd, das Quadrat zeigt das Simulationsgebiet mit dem Quartiersplatz<sup>1</sup>.



Abb. 2: Visualisierung der geplanten Baufelder und erwünschter Baumassen für Investoren (STADT ROSENHEIM 2011b, 1). Die Markierung zeigt die Lage des Bahnhofsareals Süd und der Pfeil die Lage des zentralen Quartiersplatzes.

<sup>1</sup> Farbversionen aller Abbildungen dieses Beitrags sind über den Zugang <http://www.deutscheskund.de/publikationen/> erreichbar.

ermöglicht so die Entstehung eines Campus-Platzes. Die Potenzialflächen werden möglichst hoch mit offener Block- oder Zeilenbebauung ausgenutzt, um einen Beitrag zur Innenentwicklung Rosenheims zu leisten. Eine klare Raumkante entlang der Gleise wird definiert, die die Lärmbelastung durch den fortbestehenden Bahnbetrieb minimieren soll (PESCH et al. 2011, 13, 22, 24 f.).

### *2.3 Eignung des Untersuchungsgebietes für eine prospektiv-modellierende mikroklimatische Analyse zur innerstädtischen Freiraumgestaltung*

Der Quartiersplatz wird als zentraler Freiraum des Bildungs- und Forschungscampus täglich von vielen Menschen genutzt und soll ansprechend gestaltet werden, da er eine Verteilerfunktion besitzt und den Knotenpunkt des Fußwegesystems der Nachbarschaft bildet. Die an den Platz angrenzende neue Brückenverbindung über die Gleisanlagen soll Fußgängern und Radfahrern eine barrierefreie und funktionelle Querungsmöglichkeit bieten und z. B. Bewohnern eines südlich angrenzenden Wohngebiets den Anschluss an die Innenstadt ermöglichen.

Das gewählte Untersuchungsgebiet eignet sich, weil es inmitten der Wärmeinsel der Rosenheimer Innenstadt liegt und hier zudem noch reale Möglichkeiten zur Anpassung der Planung bestehen. Es wird erwartet, dass sich die lokalklimatische Situation durch die Zunahme der Bebauung und der versiegelten Flächen verschlechtern wird, und somit sind für die Schutzgüter Klima und Luft erhebliche negative Auswirkungen zu befürchten (SCHWARZMANN 2007, 5). Versiegelung bei gleichzeitigem Fehlen von Vegetation kann insbesondere auf Plätzen höchstes thermisches Unbehagen bei den Nutzern hervorrufen (MARAS et al. 2014, 300; SRIVANIT u. HOKAO 2013, 158). Daher ist die Optimierung des thermischen Komforts als städteplanerisches Ziel anzusehen.

Der Rosenheimer Kernstadt mangelt es aktuell an Grünflächen, und das Untersuchungsgebiet wird als Anbindung an die wichtigsten innerstädtischen Grünanlagen und an die offene Landschaft gesehen. Diese Anbindung würde zudem die Attraktivität des Bahnhofsbereichs unter dem Gesichtspunkt der Naherholung erhöhen, denn die Begrünung des Platzes soll vor allem dem optischen Gesamtgefüge aller Grünflächen dienen. Dabei wurden jedoch bislang die regulierenden Ökosystemdienstleistungen und die mikroklimatischen Auswirkungen außer Acht gelassen. Mit der vorliegenden Untersuchung soll die zukünftige stadtklimatische Funktion des Platzes in den planerischen Fokus gerückt werden.

Aufgrund der Bedeutung und anvisierten Nutzung des Platzes bildet dieser den Hauptgegenstand der Modellierung. Die den Platz umgebende Anordnung von teilweise sehr hohen Gebäuden (30 m) bietet einen interessanten Untersuchungsraum. Hier sind starke Effekte durch Windabschirmung oder auch Bildung von störenden Windströmungen, Schattenwurf, Reflexionen, Wärmespeicherung in Materialien oder fehlende Verdunstungskühlung denkbar, deren Gesamtwirkung in ihrer Komplexität ohne numerische Modellierung nur schwer vorhersagbar ist.

Für das Untersuchungsdesign und die Auswertung der Ergebnisse der prospektiv-modellierenden mikroklimatischen Analysen wurden folgende Hypothesen formuliert:

*Hypothese 1:*

Die aktuell geplante Gestaltung des Platzes auf der Südseite des Bahnhofsareals in der Stadt Rosenheim wird die Nutzer insbesondere an heißen Tagen im Hochsommer einem erhöhten Hitzestress aussetzen.

*Hypothese 2:*

Die thermische und lufthygienische Aufenthaltsqualität des Platzes lässt sich durch Maßnahmen der Freiraumgestaltung zur Optimierung der Aufenthaltsqualität verbessern.

#### *2.4 Operationalisierung der Aufenthaltsqualität*

Aufenthaltsqualität ist eine multidimensionale Eigenschaft von Freiräumen, die gleichermaßen von Faktoren wie physikalischen und physiologischen Bedingungen sowie menschlichen Verhaltensweisen und subjektiven Bewertungen abhängt (NIKOLOPOULOU u. STEEMERS 2003). Im Rahmen dieser Untersuchung wird die thermische Aufenthaltsqualität untersucht. Zur Beschreibung des Wärmeaustauschs zwischen menschlichem Körper und seiner Umgebung existieren mehr als 100 verschiedene Indizes (JOHANSSON et al. 2014, 352). Der sog. PMV-Wert (Predicted Mean Vote) ist ein von FANGER (1982) entwickeltes komplexes Bewertungsverfahren zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit, das seit den 1990er Jahren zur Bewertung des thermalen Komforts herangezogen wird, während in den letzten Jahren vermehrt die Indizes PET (Physiologically Equivalent Temperature) und SET (Standard Effective Temperature) genutzt wurden (Johansson et al. 2014, 362). Wie die meisten der Indizes sind der PMV und PET stationäre Modelle. Sie basieren auf der Annahme, dass die Menschen ihrem Umgebungsklima so lange ausgesetzt sind, bis sich ein thermisches Gleichgewicht eingestellt hat. Dynamische Aspekte menschlicher Anpassung (wie z.B. das Ansteigen von Hauttemperaturen bei längerer Sonnenexposition) werden nicht berücksichtigt (Chen u. Ng 2012, 119).

Das PMV-Modell verknüpft die Energiebilanz des menschlichen Körpers mit dem Empfinden von Personen, die einem bestimmten Klima ausgesetzt sind (BRUSE 1999). Es dient heute v. a. als Basis für Richtlinien zum Klimakomfort in geschlossenen Räumen wie z.B. ISO 7730–1984 und ASHRAE 55–1992 (TALEGHANI et al. 2014a, 66). Nach BRUSE (1999) wurde das PMV-Modell ursprünglich für Innenräume entwickelt, dann aber durch Berücksichtigung von Solar- und langwelliger Strahlung sowie Windgeschwindigkeiten an das Freiraumklima angepasst. Mit Einschränkungen kann das PMV-Modell für die Bewertung von Hitze- oder Kältestress in Freiräumen herangezogen werden (BRUSE 2015, o.S.). Der PMV-Index wurde z.B. von CHENG et al. (2010), NIKOLOPOULOU et al. (2001) oder THORSSON et al. (2004) erfolgreich für die Beschreibung thermischen Komforts in Freiräumen angewandt (CHEN u. NG 2012, 119).

Der PMV berücksichtigt meteorologische Variablen (Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit) und Aspekte des menschlichen Körpers (Isolierung durch Bekleidung, mechanische Energieproduktion des Körpers, mechanischer Arbeitsfaktor) (BRUSE 2015, o.S.).

Die resultierenden Werte drücken Hitze- oder Kältestress aus und können laut TALEB und TALEB (2014, 255) und BRUSE (2009) folgendermaßen interpretiert werden:

-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Sehr kalt	Kalt	Kühl	Etwas zu kühl	Behaglich	Etwas zu warm	warm	heiß	Sehr heiß

Nach BRUSE (2015, o.S.) werden in den meisten Anwendungen im Außenbereich numerisch korrekte Werte erreicht, die deutlich kleiner oder größer als [-4] bzw. [+4] ausfallen (bis [+8] und darüber), obwohl diese von der ursprünglichen, für Innenräume experimentell ermittelten Skala abweichen.

Da es sich um einen stationären Wert handelt, gilt der PMV nur für Personen, die einige Zeit (bis zu 20 min) an gleichbleibender Stelle unter konstanten klimatischen Bedingungen verweilen (BRUSE 2009).

Von diesen Einschränkungen abgesehen eignet sich PMV in seiner Freiraum-Version, die Effekte der Lufttemperatur, Strahlung, Feuchtigkeit und Wind auf die persönliche Energiebilanz darzustellen (BRUSE 2015, o.S.) und somit Vergleiche zwischen verschiedenen Raum- und Klimasituationen zu ermöglichen. MARAS et al. (2014, 297) bewerteten in ihrer Studie die Übereinstimmung von mit ENVI-met simulierten und gemessenen PMV-Werten als gut.

### 3 Mikroklimatische numerische Modellierung

Der jeweilige atmosphärische Zustand des untersuchten Areals wird in drei verschiedenen Varianten mit der von BRUSE (2009) entwickelten Software ENVI-met 3.1 für einen typischen Tag im Hochsommer simuliert: Zunächst erfolgen der Modellaufbau sowie die Simulation des von PESCH et al. (2011) vorgegebenen Planungsstadiums (P). Anschließend werden mögliche Maßnahmen der Freiraumgestaltung zur Optimierung der Regulationsleistungen und der thermischen Aufenthaltsqualität auf dem Platz entwickelt und in den ersten Modellaufbau des Untersuchungsgebiets integriert. Danach folgt die Simulation des Mikroklimas des modifizierten Zustands (M). Zur Quantifizierung der Maßnahmenwirksamkeit, zur Einschätzung der Relationen der Ergebnisse zueinander und um theoretisch erreichbare Extremwerte abzuschätzen, wird die Referenzfläche in einem hypothetischen, völlig vegetationslosen Zustand (VR) simuliert.

Die Simulationssoftware ENVI-met 3.1 (inkl. AddOn 2014 Package, ENVI-Met GmbH o.J.) diente bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen der Analyse des Einflusses von Stadt- und Freiraumstrukturen auf das Mikroklima (CARFAN et al. 2012; KETTERER u. MATZARAKIS 2014; LEHMANN et al. 2014; MAGGIOTTO et al. 2014; MARAS et al. 2014; MIDDEL et al. 2014a, b; PERINI u. MAGLIOCCO 2014; TALEGHANI et al. 2014a, b). ENVI-met simuliert Interaktionen zwischen der Oberfläche, Vegetation und Luft im urbanen Umfeld (MIDDEL et al. 2014b, 17) und berechnet in einem prognostischen meteorologischen Modell die Hauptwindströmung, Temperatur, Feuchtigkeit und Turbulenzen (BRUSE 1999). Gesetze der Strömungsmechanik (Windfeld), Thermodynamik (Temperaturberechnungen) und

der allgemeinen Atmosphärenphysik (z. B. Turbulenzprognose) bilden die physikalischen Grundlagen der numerischen Strömungssimulation (BRUSE 2003, 69).

Dazu werden Gebäude, Vegetation und Oberflächen des Untersuchungsgebiets in einem 3D-Raster abgebildet. Die Auflösung des Rasters liegt typischerweise zwischen 0,5–10 m (MIDDEL et al. 2014b, 17). In der vorliegenden Untersuchung wird eine Rastergröße von 2 m verwendet. Dieses kleinskalige Stadtmodell wird numerisch vom Wind durchströmt und von der Sonne beschienen. Der Wechsel von Sonne und Schatten in Kombination mit den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Oberflächenmaterialien resultiert in unterschiedlichen Oberflächentemperaturen, die Oberflächen geben die Wärme je nach Windfeld mehr oder weniger stark an die Luft ab (BRUSE 2003, 69 f.).

Ein eindimensionales Modell, welches bis in eine Höhe von 2.500 m reicht, simuliert Prozesse der Grenzschicht. Zudem ist ein einfaches, eindimensionales Bodenmodell integriert, welches den Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Untergrund, Bodentemperatur und Bodenwassergehalt bis in eine Tiefe von 2 m berechnet. Eine Simulation umfasst in der Regel 24 bis 48 Stunden, startet an einem bestimmten Modelltag und resultiert in einem atmosphärischen Output für jede einzelne Rasterzelle im 3D-Raster sowie Ausprägungen von Oberflächen- und Bodenvariablen der simulierten Umgebung. Outputvariablen umfassen lang- und kurzweilige Strahlung, Luft-, Oberflächen- und Wandtemperaturen, latente und sensible Wärmeflüsse und den Indikator PMV für thermischen Komfort (MIDDEL et al. 2014b, 17).

Um die Wechselwirkungen der Vegetation mit der Atmosphäre realitätsnah simulieren zu können, wird das physiologische Verhalten der Pflanzen nachgebildet. Durch Integration des Photosynthesezyklus und der CO<sub>2</sub>-Atmung kann das Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen für den Gasaustausch, die Änderung von Blatttemperaturen im Tagesgang und die Aufnahme von Schadgasen simuliert werden (BRUSE 2003, 70).

ENVI-met benötigt zur Simulation verschiedene Inputparameter, die Auskunft über den klimatischen, baulichen und grünplanerischen Ausgangszustand des Untersuchungsgebietes geben.

### *3.1 Eingabedaten und Modellkonfiguration*

Als Modelltag wurde der 15.07.2015 für die Simulationen gewählt, da der Juli mit einem langjährigen Mittelwert von 18,9°C der statistisch gesehen wärmste Monat in Rosenheim ist und die meisten heißen Tage (Maximum der Lufttemperatur  $\geq 30^\circ\text{C}$ ) aufweist. Der in der Software implementierte Initialisierungsprozess bedingt, dass die Simulationsdauer mindestens 6 Stunden betragen muss, um eine Beeinflussung des Outputs durch den Initialisierungsprozess auszuschließen (BRUSE 2015). Die hier gewählte Simulationsdauer von 40 h bei einem Startzeitpunkt am 14.07.2015 um vier Uhr morgens gewährleistet dies.

Die klimatischen Inputparameter können größtenteils aus Rohdaten von verschiedenen Messstationen des Deutschen Wetterdienstes gewonnen werden (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relative Feuchte in 2 m Höhe, Wolkenbedeckung, Bodenfeuchte, stündliche Sonnenstände, Initialtemperaturen der tiefen

Bodenschicht). Daten zur Initialtemperatur der oberen und mittleren Bodenschichten werden von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) ortsnah gemessen. Angaben zur Windrichtung und Globalstrahlung stammen von einer privaten Messstation im Rosenheimer Ortsteil Pösling. Temperatur und spezifische Feuchte der Atmosphäre wurden von der „Satellite Application Facility on Climate Monitoring“ (CM SAF) bereitgestellt, einem Konsortium europäischer Wetterdienste. Diese bieten Messdaten des Fernerkundungsinstruments ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder) zum Download an, welche u. a. monatliche Durchschnittswerte der Temperatur und der spezifischen Feuchtigkeit für sechs verschiedene Druckniveaus beinhalten (CM SAF 2014, o.S.; CM SAF 2015, o.S.). Angaben zum PMV sowie der Albedo und U-Werten von Gebäuden werden der Literatur und gesetzlichen Vorgaben entnommen. Die Rohdaten werden jeweils für den Stichtag (15.07.2015) passend selektiert und ausgewertet.

Für die Schaffung grundsätzlich gleicher Rahmenbedingungen zum aussagekräftigen Vergleich der mikroklimatischen Bedingungen werden für alle Varianten, neben gleichen klimatischen Rahmenbedingungen, die gleichen weiteren optionalen Einstellungen (z. B. Gebäudebeschaffenheit, Bodenbeschaffenheit, Strahlungsintensität, PMV-Basisdaten) gewählt (Tab. 1). Albedo und U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizient) von Dächern und Wänden werden aus mit Literaturangaben kombinierten Planungsvorgaben ermittelt, indem die Anteile verschiedener Fassaden- und Dachtypen mit typischen Albedo- bzw. U-Werten multipliziert und aus den aufsummierten Ergebnissen der Durchschnitt gebildet wird. Da die untersuchten Varianten verschiedene Dachbedeckungen besitzen, unterscheiden sich die betreffenden Inputwerte voneinander. Der Standardfaktor der Strahlungsintensität wird von 1.0 auf 0.8 reduziert, um die im Vergleich mit Wetterstationswerten ermittelte systematische Überschätzung der lokalen Globalstrahlung zu korrigieren (BRUSE 2015). Zur Berechnung des Predicted Mean Vote (PMV) werden Angaben zu Gehgeschwindigkeit, Energieumsatz, mechanischem Faktor und Kleidung des potentiellen Platzbesuchers benötigt. Angenommen wird hierfür eine Person, die in leichter Sommerkleidung sitzend auf einer Parkbank verweilt. Die Referenzperson ist in ENVI-met stets ein 35-jähriger Mann mit einer Größe von 1,75 m und einem Gewicht von 75 kg (BRUSE 2015, o.S.).

### 3.2 Digitalisierung des dreidimensionalen Modellraumes für die drei Varianten

Nach der Definition aller relevanten Parameter werden die Geometrien der drei verschiedenen Modellumgebungen in *Area Input Files* spezifiziert. Die maximale Ausdehnung des Simulationsraums beträgt stets  $120 \times 120 \times 30$  Zellen bei einer gewählten Zellgröße von 2,00 m in horizontaler und 2,50 m in vertikaler Richtung. Sieben zusätzliche *Nesting Grids*, deren Bodenprofile an das restliche Untersuchungsgebiet angeglichen wurden, minimieren Fehler an den Modellgrenzen.

Für alle drei Simulationen wird die gleiche Baustruktur angenommen. Vegetationsausstattung und Oberflächeneigenschaften werden variiert, um die Effekte der aktuell geplanten Gestaltung des Platzes und einer Optimierung der Begrünung auf den thermischen Komfort zu modellieren (Abb. 3) Der Rahmenplan gibt dabei die Anzahl der Stockwerke, die Gebäudehöhen (8,50 m–30 m) sowie die

Tab. 1: ENVI-met - Modellkonfiguration

ENVI-met Modellkonfiguration		Vegetationslose Referenzfläche	Planungszustand und Maßnahmenpaket
<b>Modellrandbedingungen und</b>	Beginn der Simulation Datum/Uhrzeit	[-]	14.07.2015, 04:00:00
	Simulationsdauer	[h]	40
	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	[m/s]	1,54
	Rauhigkeitslänge $z_0$ am Referenzpunkt	[m]	0,1
	Windrichtung	[°]	224
	Starttemperatur Atmosphäre	[K]	305,36
	Spezifische Feuchte in 2500 m	[g/kg]	5
	Relative Feuchte in 2 m	[%]	74,61
	<b>Gebäude</b>	Innentemperatur	[K]
Wärmeübergang Wände		[W/m <sup>2</sup> *K]	0,54
Wärmeübergang Dächer		[W/m <sup>2</sup> *K]	0,48   0,43
Albedo Dächer		[-]	0,26   0,21
Albedo Wände		[-]	0,17
<b>Boden</b>	Starttemperatur obere Schicht (0–20 cm)	[K]	292,99
	Starttemperatur mittlere Schicht (20–50 cm)	[K]	292,42
	Starttemperatur tiefere Schicht (> 50 cm)	[K]	291,09
	Relative Bodenfeuchte obere Schicht	[%]	33,83
	Relative Bodenfeuchte mittlere Schicht	[%]	37,89
	Relative Bodenfeuchte tiefere Schicht	[%]	38,54
<b>PMV</b>	Laufgeschwindigkeit	[m/s]	0
	Energieaustausch	[W/m <sup>2</sup> ]	58,00
	Mechanischer Faktor	[-]	0

Lage und Höhe von Überhängen vor. Zwar wäre die Gebäudeerhöhung aus mikroklimatischer Sicht eine weitere interessante Simulationsvariante, von der jedoch in dieser Untersuchung Abstand genommen wird, da die Stadt Rosenheim Höhenvorgaben gemacht hat.

In der Variante der vegetationslosen Referenzfläche sind sämtliche Freiflächen mit Asphalt bedeckt – einem gängigen Versiegelungsmaterial mit größtem Erwärmungspotential. Lediglich das durch das Untersuchungsgebiet verlaufende

Gleisbett besteht bei dieser Variante aus Granitschotter. Auf Vegetation, einschließlich Gründächer, wird vollständig verzichtet.

Für den Planungszustand sind die Straßen mit Asphalt und die Plätze mit einer Betonauflage als versiegelt angenommen. Die Baumscheiben bestehen aus lehmigem Boden, die Gleisanlagen sind wiederum mit Granitschotter bedeckt. Vegetationsstrukturen wurden basierend auf den Einzeichnungen im Rahmenplan nachdigitalisiert. Die dort verzeichneten, drei verschiedenen Baumgrößen werden durch folgende drei Baumtypen aus der *PLANTS-Database* repräsentiert:

MO	=	Baum, 20 m, mittlere Blattdichte, keine ausgeprägte Krone
TH	=	Baum, 15 m, hohe Blattdichte, ausgeprägte Krone
ds	=	Baum, 10 m, hohe Blattdichte, ausgeprägte Krone

Der bereits bestehenden, kleinen Baumgruppe im Süden des Untersuchungsgebiets wird der Typ „w“ (= „Forst, 20 m, hohe Blattdichte, keine ausgeprägte Krone“) zugewiesen. Zusätzlich werden jeweils 50 % der Dachflächen und einige kleinere Grünflächen mit Rasen (10 cm Höhe), sowie der an die Gleisanlagen angrenzende Grünstreifen mit Gras (50 cm Höhe) als begrünt angesetzt.

Die Oberflächen und die Vegetationsausstattung der Variante des Maßnahmenpakets entsprechen mit folgenden Abweichungen denen des Planungszustands: Rasenflächen sowie ein Wasserbecken im östlichen Platzbereich sollen die Umwandlung von sensibler in latente Wärme ermöglichen. Eine Baumreihe sowie einige Einzelbäume sollen die Schattenbereiche in der Nachmittagssonne vergrößern. Der Baumanteil wird auf dem zu untersuchenden Platz im Maßnahmenpaket im Vergleich zum Planungszustand insgesamt um 5 Prozentpunkte erhöht, der Vegetationsanteil (inkl. Bäumen) um fast 20 Prozentpunkte (Abb. 3). Vorgabenbedingt erfolgt keine weitere flächige Ausdehnung der Dachbegrünung. Die Pflanzung einer Reihe Laubbäume entlang der südöstlichen Dachkante des Gebäudes auf der Westseite des Platzes soll den Schattenwurf erhöhen und durch Evapotranspiration einen positiven Beitrag zum Stadtklima sowie zur Lufthygiene leisten.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Ergebnisse

Aus der Bandbreite der von ENVI-met simulierten Datenschichten konzentriert sich der Variantenvergleich auf den PMV-Wert. Die Simulationsergebnisse werden als Tagesverlauf und in Form von Durchschnitts-, Minimal- und Maximalwerten über den Gesamtausschnitt sowie für die aufenthaltsrelevante Platzfläche miteinander verglichen. Die rasterbasierte kartographische Abbildung der PMV-Werte lässt Bereiche besonderer Wärme- oder Kältebelastung erkennen (Abb. 4).

#### *Predicted Mean Vote (PMV, Behaglichkeitsindex)*

Bei allen drei Varianten treten ausgesprochen hohe PMV-Maximalwerte auf (>11 PMV-Einheiten, Abb. 4). Das Maximum der vegetationslosen Referenzfläche

Gezielte urbane Freiraumgestaltung wider den Hitzestress

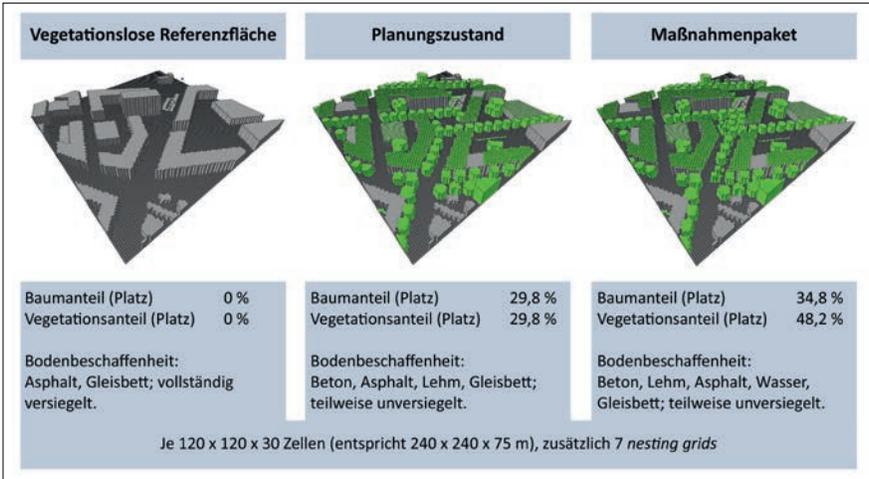


Abb. 3: Modellumgebungen der drei Varianten des Untersuchungsgebietes

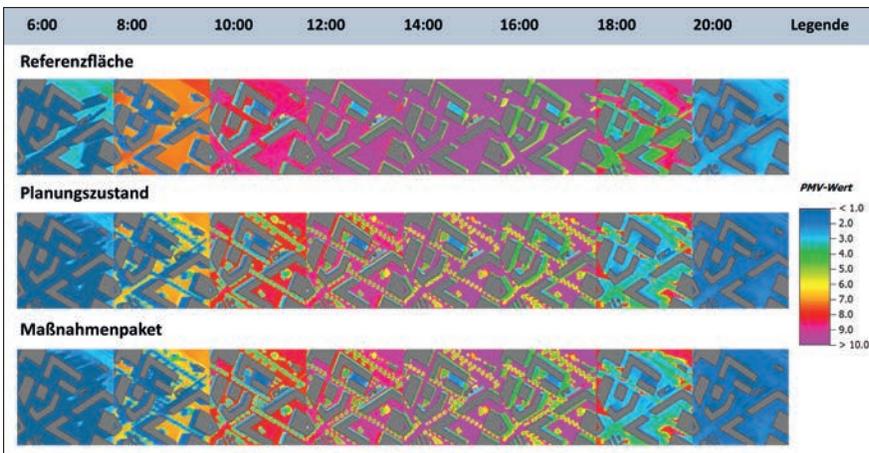


Abb. 4: PMV-Tagesverlauf der drei Simulationsvarianten in 2 h-Schritten

liegt bei 11,6 (14:00 Uhr, Untersuchungsgebiet), jenes des Planungszustands 0,4 Einheiten und jenes des Maßnahmenpakets 0,5 Einheiten darunter. Durch beide Vegetationsvarianten werden die Maximalwerte auf dem Platz tagsüber um ca. 0,4 Einheiten und nachts um bis zu 1,7 Einheiten gesenkt. Zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr, also zur Zeit des höchsten Sonnenstands, erzielt der Planungszustand die größere Senkung der Maximalwerte im Vergleich zur Referenzfläche, über den Rest des Tages ist das Maßnahmenpaket effektiver darin, die Maximalwerte zu senken.

Die simulierten Minimalwerte werden nachts deutlicher durch das Maßnahmenpaket gesenkt, als durch den Planungszustand. Ab 10:00 Uhr morgens besteht jedoch zwischen den beiden Vegetationsvarianten kein Unterschied hinsichtlich

ihrer Absenkungsleistung. Insgesamt senken die Maßnahmen den Minimalwert stärker als den Maximalwert.

Die Maßnahmen der Freiraumgestaltung zur Optimierung des thermischen Komforts erzielen zu allen Tageszeiten eine Absenkung des durchschnittlichen PMV-Wertes gegenüber der Referenzfläche, auch in der Nacht. Sowohl auf das gesamte Untersuchungsgebiet, als auch auf den Platz bezogen, kann das Maßnahmenpaket den durchschnittlichen PMV-Wert durchweg stärker senken als der Planungszustand. Daher stellt das Maßnahmenpaket die effektivste Variante zur Reduktion der PMV-Werte dar. Die höchste Reduktionsleistung des PMV-Durchschnitts wird dabei von beiden Varianten um 16:00 Uhr erbracht und beträgt mehr als 2 PMV-Einheiten.

Der Wert jeder einzelnen Rasterzelle wird gegenüber der Referenzfläche um bis zu 6,5 Einheiten (Planungszustand) bzw. 7,1 Einheiten (Maßnahmenpaket) gesenkt. Das Maßnahmenpaket erzielt gegenüber dem Planungszustand eine hauptsächlich lokale Wirkung im Bereich der Vegetation. Hier werden die PMV-Zellwerte zwar aufgrund der Vegetationsverlagerung teilweise um bis zu 5,8 Einheiten angehoben, gleichzeitig aber an den neuen Standorten der Vegetation um bis zu 6,7 Einheiten reduziert. Im restlichen Untersuchungsgebiet wird durch das Maßnahmenpaket gegenüber dem Planungszustand nur eine zu vernachlässigende Senkung in der Größenordnung von 0,03–0,04 Einheiten erzielt, die auf den indirekten Einfluss der Maßnahmen auf ihre Umgebung zurückzuführen ist.

Der Vergleich der visualisierten Tagesabläufe der PMV-Werte (Abb. 4) der drei Varianten zeigt, dass die Vegetation in den Varianten des Planungszustands und des Maßnahmenpakets in Zeiten besonderen thermischen Diskomforts (12:00–16:00 Uhr) eine Vielzahl von kleinen Zonen mit höherem thermischen Komfort schafft. Im Gegensatz zum ausschließlichen „Inselcharakter“ dieser Zonen im Planungszustand, wird mit dem Maßnahmenpaket ein zusätzlicher, größerer und zusammenhängender Bereich geschaffen, der während der Mittagshitze thermischen Komfort gewährleistet und einen Rückzugsort für von der sommerlichen Hitze belastete Menschen bietet. In diesem Bereich wird das Ziel, den thermischen Komfort der Nutzer zu steigern, deutlich erreicht. Die PMV-Werte der vegetationslosen Referenzfläche beginnen im Vergleich zu den anderen beiden Varianten morgens früher zu steigen und befinden sich um 20:00 Uhr, d.h. ohne direkte Sonneneinstrahlung, immer noch auf einem höheren Niveau. Die Tagesverläufe zeigen zudem sehr deutlich die Abhängigkeit des PMV-Wertes von der Sonneneinstrahlung und dem Schattenwurf v. a. von Gebäuden. Zwar kann das Maßnahmenpaket keine nennenswerte Optimierung des PMV-Wertes am Platzzugang um 14:00 Uhr erreichen, da hierfür die Sonne zu steil steht und die Bäume kaum Schatten werfen, dafür fällt ab 16:00 Uhr der Gebäudeschatten auf genau jenen Bereich, der im Planungszustand mit Bäumen bestanden ist und deshalb nicht zum Laufen hätte genutzt werden können; dagegen wäre die gegenüberliegende Seite der Nachmittagssonne ausgesetzt. Die Variante des Maßnahmenpakets erlaubt es, wahlweise in der Sonne östlich der Baumreihe oder im Gebäudeschatten mit niedrigen PMV-Werten zu laufen und steigert in diesem Teilraum den thermischen Komfort.

## 4.2 Diskussion

Unsere Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen mit anderen Studien. In Einklang mit PERINI und MAGLIOCCO (2014, 500) fällt das Potential von Vegetation zur Absenkung des PMV-Wertes umso geringer aus, je höher die umliegenden Gebäude sind, da im Gebäudeschatten nur noch ein geringer Einfluss der Vegetation wahrnehmbar ist. In der Studie von TRIMMEL et al. (2014, 23 f.) senkt die flächendeckende Bepflanzung eines Parkplatzes mit Bäumen den PMV-Wert um 15:00 Uhr um bis zu 3 Einheiten ab. Der durchschnittliche PMV-Wert des in dieser Arbeit untersuchten Platzes beträgt um 15:00 Uhr bei der Referenzfläche 10,2 Einheiten, beim Planungszustand 7,8 Einheiten und beim Maßnahmenpaket 7,0 Einheiten. Das entspricht einer Reduktion um 2,4 Einheiten (Planungszustand, keine flächendeckende Bepflanzung) bzw. um 3,2 Einheiten (Maßnahmenpaket, teilweise flächendeckende Bepflanzung), die gut mit dem o. g. Wert von TRIMMEL et al. (2014) übereinstimmen. Ob beim Maßnahmenpaket die Flächenentsiegelung keine erhebliche zusätzliche Senkung des PMV-Werts erzielt, wie von TRIMMEL et al. (2014, 24) in ihrer Untersuchung festgestellt, lässt sich methodisch bedingt in dieser Untersuchung aufgrund der kumulierenden Wirkung der simulierten Maßnahmen nicht überprüfen.

Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass die aktuell geplante Gestaltung des Platzes Nutzer insbesondere an heißen Tagen im Hochsommer einem erhöhten Hitzestress aussetzen wird. Am Modelltag tritt zum Zeitpunkt der höchsten Wärmebelastung auf knapp 82 % der Fläche des untersuchten Platzes im Planungszustand Hitzestress auf.

Bestätigt wird auch die Hypothese, dass hinsichtlich der thermischen Aufenthaltsqualität durch Maßnahmen der Freiraumgestaltung Optimierungen erzielbar wären: Durch die Maßnahmen würde zum Zeitpunkt der höchsten Wärmebelastung die durch Hitzestress belastete Fläche auf dem untersuchten Platz auf 76 % reduziert.

Zur Validität der Ergebnisse ist anzumerken, dass mit den Durchschnittstemperaturen der Julimonate der letzten Jahre realitätsnahe Inputparameter herangezogen wurden, während in anderen Studien oft durchschnittliche Maximaltemperaturen in die Modellierung eingehen. Der Variantenvergleich setzt Ergebnisse zueinander in Relation und die *Nesting grids* fügen einen externen Randbereich hinzu, der an den Modellrändern ein möglichst genaues Simulationsergebnis garantiert. Die Festsetzung einer ausreichend langen Simulationsdauer minimiert den Initialisierungseinfluss, welcher sich darin zeigt, dass die simulierten Werte des zweiten Simulationstages deutlich über den Werten des ersten Simulationstages liegen.

Methodenkritisch ist anzumerken, dass vielfältige „Stellschrauben“ für eine solch komplexe numerische Modellierung berücksichtigt werden müssen. In der vorliegenden Untersuchung zählen dazu Unsicherheiten bei Baumartenauswahl und Beschaffenheit von Oberflächen, Fassaden und Dächern aufgrund des frühen Planungsstands. Ein schräger Gebäudeverlauf führt in der rasterbasierten Darstellung zu Modellungenauigkeit. Die PMV-Werte sind numerisch korrekt, aber sehr hoch; so ist der „Hitzestress“ (PMV > 5) willkürlich definiert. Einige weitere denkbare Maßnahmen der Freiraumgestaltung zur Optimierung der Aufenthaltsqualität lassen sich nicht direkt mit ENVI-met 3.1 simulieren (u. a. „cool roofs“

auf ausgewählten Dachflächen, durchlässige Versiegelungsmaterialien, bewegte Wasserelemente, Fassadenbegrünung, technische Beschattungskonstruktionen) und wurden daher nicht in das Maßnahmenpaket integriert.

#### *4.3 Entwicklung von Handlungsempfehlungen*

Die Simulationsergebnisse untermauern normative Handlungsempfehlungen für die Gestaltung der Freiraumstruktur zur Vermeidung von Hitzebelastung und zur vorausschauenden, klimawandelangepassten Grünausstattung des Platzes. Freiräume sollten eine hohe Diversität von Umweltbedingungen und Grünstrukturen aufweisen (PAULEIT et al. 2014, 12; STEEMERS et al. 2004). Zur Verbesserung des thermischen Komforts sind v. a. die primären Einflussgrößen Wind und Strahlung (LAUE 2009, 76) durch geeignete Gebäude- und Vegetationsanordnung zu optimieren. Der Hitzebelastung kann durch partielles Entsiegeln, v. a. in sonnenexponierten Bereichen, entgegen gewirkt werden, da natürliche Böden eine geringere Wärmekapazität sowie die Fähigkeit zur Kühlung durch Transpiration besitzen (SCHWARZMANN 2007, 2; WITTIG et al. 2012). Bewegte Wasserelemente und Wasserflächen eignen sich zur Freiraumgestaltung, da sie der Luft Energie zur Verdunstung entziehen und so ihre Umgebung kühlen (KUTTLER et al. 2010, 179; MATHEY et al. 2011, o.S.; zit. n. PAULEIT et al. 2014, 17).

Bäume sind mikroklimatisch besonders effektiv (HAGEN et al. 2014, 2). Sie senken die Lufttemperatur ihrer Umgebung aktiv durch Evapotranspiration (PAULEIT et al. 2014, 21). Ihr Schattenwurf verringert gleichzeitig die Oberflächen- und die mittlere Strahlungstemperatur unter der Baumkrone (USEPA 2008, 3; PERINI u. MAGLIOCCO 2014, 501) und erhöht dadurch den thermischen Komfort. Im Verbund stehende Bäume verstärken sich gegenseitig in ihrem jeweiligen mikroklimatischen Effekt, d. h. Baumgruppen wirken stärker als Baumreihen und diese wiederum stärker als Einzelbäume (HAGEN et al. 2014, 2). Nach WITTIG et al. (2012, 303 f.) sind auf öffentlichen Plätzen 50 % Baumbedeckung anzustreben, um negative Auswirkungen des Klimawandels abzumildern. Auf Stadtquartiersebene können Gründächer in Summe klimaverbessernd wirken (KUTTLER 2011, 6).

Die beste Anpassungsstrategie an den Klimawandel liegt darin, möglichst viele verschiedene Ansätze und Methoden zur Klimamelioration miteinander zu kombinieren, da die Maßnahmen in Summe wirkungsvoller hinsichtlich einer Absenkung der Lufttemperatur sein können als die Effekte der Einzelmaßnahmen zusammen (GROMKE 2014, 14; FALLMANN et al. 2014, 215).

## **5 Fazit**

Die Stadtvegetation ist der Garant für vielfältige Ökosystemdienstleistungen, deren Optimierung wesentlich zur gesellschaftlichen Bewältigung aktueller Herausforderungen der Stadtentwicklung beiträgt. Diesem wissenschaftlichen Erkenntnisstand stehen umfangreiche normative Handlungsempfehlungen zur Seite, und zudem wird dieser Kenntnisstand laufend erweitert, und dennoch fehlt es häufig an Möglichkeiten, diese Expertise in reale Planungsprozesse einzubringen. Es werden Ansätze benötigt, Ökosystemdienstleistungen in Anlehnung an die Typologien

und Praktiken der Stadtplaner zu beschreiben und zu bewerten (LEHMANN et al. 2014, 58). ENVI-met könnte hierfür ein hilfreiches Tool sein. Das Programm bleibt derzeit jedoch nur einer speziellen Klientel von Fachleuten vorbehalten, da sich die Arbeitsweise aufgrund der vielen verschiedenen Programmschritte und verschiedener analoger Handlungen nur mit Vorbildung und geschulter Anleitung erschließt (LAUE 2009, 91 f.). Dann jedoch lassen sich in relativ kurzer Bearbeitungszeit die Auswirkungen von Planungsvarianten erkennen, wenn auch nur von kleinskaligen Freiraumsituationen. Hot-Spots besonderer thermischer Belastung können identifiziert werden (KETTERER u. MATZARAKIS 2014, 87). Für größere Raumeinheiten ist der Rechenaufwand derzeit noch zu hoch und nur mit einem gewissen Budget in der Planungspraxis realistisch im Vorfeld umzusetzen (LAUE 2009, 92).

Der wesentliche Vorteil von ENVI-met liegt jedoch darin, Karten zu produzieren, die in Stadtplanung und (Landschafts-)Architektur ein übliches Kommunikationsmedium darstellen.

## 6 Literatur

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) 2007: Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern. URL: [http://elib.dlr.de/59301/1/stmugv\\_app000006.pdf](http://elib.dlr.de/59301/1/stmugv_app000006.pdf) (letzter Zugriff 12.03.2016).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) 2012: Der Klimawandel in Bayern. Auswertung regionaler Klimaprojektionen. Regionalbericht Inn. URL: [http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug\\_app000024?SID=58070563&ACTIONxSESSx-SHOWPIC\(BILDxKEY:lfu\\_klima\\_00085,BILDxCLASS:Artikel,BILDx-TYPE:PDF\)=Z](http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000024?SID=58070563&ACTIONxSESSx-SHOWPIC(BILDxKEY:lfu_klima_00085,BILDxCLASS:Artikel,BILDx-TYPE:PDF)=Z) (letzter Zugriff 12.03.2016).
- BRUSE, M. 1999: Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum. URL: <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/BruseMichael/diss.pdf> (letzter Zugriff 23.06.2016).
- BRUSE, M. 2003: Stadtgrün und Stadtklima. Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. In: LÖBF-Mitteilungen, 1/03, S.66–70.
- BRUSE, M. 2009: Online Help Version 3.1. URL: <http://www.envi-met.info/documents/onlinehelpv3/helpindex.htm> (letzter Zugriff 05.02.2015).
- BRUSE, M. 2015: The Hitchhiker's Guide to ENVI-met. PMV/PPD. URL: [http://www.envi-met.info/hg2e/doku.php?id=apps:biomet\\_pmv](http://www.envi-met.info/hg2e/doku.php?id=apps:biomet_pmv) (letzter Zugriff 03.06.2015).
- CARFAN, A., E. GALVANI, u. J. TEIXEIRA NERY 2012: Study of thermal comfort in the City of São Paulo using ENVI-met model. In: *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 78, S. 34–47.
- CHEN, L. u. E. NG 2012: Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. In: *Cities*, 29, 2, S. 118–125.
- CHENG, V., E. NG, C. CHAN u. B. GIVONI 2010: Outdoor thermal comfort study in subtropical climate: A longitudinal study based in Hong Kong. In: *International Journal of Biometeorology*, 56, 1, S. 43–56.
- CM SAF (Hrsg.) 2014: CM SAF: Water Vapour & Temperature. URL: [http://www.cmsaf.eu/EN/Overview/Products/Water%20Vapour%20Temp/Water\\_Vapour\\_Temp\\_node.html](http://www.cmsaf.eu/EN/Overview/Products/Water%20Vapour%20Temp/Water_Vapour_Temp_node.html) (letzter Zugriff 10.03.2015).

- CM SAF (Hrsg.) 2015: Operational Products. HSH – Temperature and specific humidity at 6 pressure levels. Area: Global. Temporal resolution Monthly. Spatial resolution: Cylindrical equal area projection (90 × 90 km<sup>2</sup>). Data Source: HSH from ATOVS. Versions 300, 310, 320, 330. 340. URL: [https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktDetails?id=15609\\_16452\\_16489\\_19136\\_21078](https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktDetails?id=15609_16452_16489_19136_21078) (letzter Zugriff 10.03.2015).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) 2015a: Sommertage 1981–2010, fester Standort. URL: [ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations\\_germany/climate/multi\\_annual/mean\\_81-10/Sommertage\\_1981-2010\\_festerStandort.txt](ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/multi_annual/mean_81-10/Sommertage_1981-2010_festerStandort.txt) (letzter Zugriff 02.03.2015).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) 2015b: Wetterlexikon. Definition „Sommertag“. URL: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=H&DAT=Sommertag> (letzter Zugriff 02.03.2015).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) 2015c: Heiße Tage 1981–2010, fester Standort. URL: [ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations\\_germany/climate/multi\\_annual/mean\\_81-10/Heissetage\\_1981-2010\\_festerStandort.txt](ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/multi_annual/mean_81-10/Heissetage_1981-2010_festerStandort.txt) (letzter Zugriff 02.03.2015).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) 2015d: Wetterlexikon. Definition „Heißer Tag“. URL: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=H&DAT=Heisser-Tag> (letzter Zugriff 02.03.2015).
- DÜTEMAYER, D., A. BARLAG, W. KUTTLER u. U. AXT-KITTNER 2014: Measures against heat stress in the city of Gelsenkirchen, Germany. In: Die Erde. Journal of the Geographical Society of Berlin, 144, 3–4, S. 290–303.
- ENVI-MET GmbH (Hrsg.) (o.J.): ENVI-MET. URL: <http://www.envi-met.com/#section/intro> (letzter Zugriff 23.06.2016).
- FALLMANN, J., S. EMEIS u. P. SUPPAN 2014: Mitigation of urban heat stress – a modelling case study for the area of Stuttgart. In: Die Erde. Journal of the Geographical Society of Berlin, 144, 3–4, S. 202–216.
- FANGER, P. O. (1982). Thermal Comfort. Analysis and Application in Environment Engineering. New York.
- FRYD, O., S. PAULEIT u. O. BUEHLER 2011: The role of urban green space and trees in relation to climate change. In: CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 6, 53, S. 1–18.
- GROMKE, C., B. BLOCKEN, W. JANSSEN, B. MEREMA, T. VAN HOOFF u. H. TIMMERMANS 2014: CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. In: Building and Environment, 83, S. 11–26.
- HAGEN, K., H. TRIMMEL, B. GASINICA-WAWRYTKO u. R. STILES 2014: Planungsempfehlungen. In: STILES, R., B. GASINICA-WAWRYTKO, K. HAGEN, H. TRIMMEL, W. LOIBL, M. KÖSTL, T. TÖTZER, S. PAULEIT, A. SCHIRMANN u. W. FEILMAYR (Hrsg.): Urban Fabric Types and Microclimate Response – Assessment and Design Improvement. Final Report. Wien, S. 1–24.
- HELDENS, W. u. T. ESCH 2015: Versiegelung – schmaler Grat zwischen Belastung und Effizienz. In: Taubenböck, H., M. Wurm, T. Esch u. S. Dech, S. (Hrsg.): Globale Urbanisierung – Perspektive aus dem All. Oberpfaffenhofen, S. 121–126.
- JOHANSSON, E., S. THORSON, R. EMMANUEL u. E. KRÜGER 2014: Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. In: Urban Climate, 10, 2, S. 346–366.
- KETTERER, C. u. A. MATZARAKIS 2014: Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. In: Landscape and Urban Planning, 122, S. 78–88.

- KUTTLER, W. 2011: Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. In: *Environmental Sciences Europe*, 23:21, S. 1–15.
- KUTTLER, W., D. DÜTEMAYER, A. BARLAG, J. HASSE, C. RÖSSLER u. V. LORKE 2010: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Essen.
- LAUE, H. 2009: Gefühlte Landschaftsarchitektur. Möglichkeiten der thermischen Einflussnahme in städtischen Freiräumen. Dissertation, Universität Kassel.
- LEHMANN, I., J. MATHEY, S. RÖSSLER, A. BRÄUER u. V. GOLDBERG 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, S. 58–72.
- LESER, H. 2008: Stadtökologie in Stichworten. 2., völlig neu bearbeitete Aufl. Berlin, Stuttgart (= Hirts Stichwortbücher).
- MAGGIOTTO, G., R. BUCCOLIERE, M. SANTO, L. LEO u. S. SABATINO 2014: Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: the Lecce (IT) case study. In: *Environmental Modelling & Software* 60, S. 69–83.
- MARAS, I., M. BUTTSTÄDT, J. HAHMANN, H. HOFMEISTER u. C. SCHNEIDER 2014: Investigating public places and impacts of heat stress in the city of Aachen, Germany. In: *Die Erde. Journal of the Geographical Society of Berlin*, 144, 3–4, S. 290–303.
- MATHEY, J., S. RÖSSLER, I. LEHMANN u. A. BRÄUER 2012: Anpassung an den Klimawandel durch Stadtgrün – klimatische Ausgleichspotenzial städtischer Vegetationsstrukturen und planerische Aspekte. In: LFZ Raumberg-Gumpenstein (Hrsg.): Bericht zur Tagung „Nachhaltiges Flächenmanagement von Industrie- und Gewerbebrachen“ im Rahmen des Interreg IVC-Projektes B-Team Expertengruppe zur Revitalisierung von Industriebrachen. Irdning, S. 17–20.
- MIDDEL, A., N. CHHETRI u. R. QUAY 2014a: Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 14, 1, S. 178–186.
- MIDDEL, A., K. HÄB, A. BRAZEL, C. MARTIN u. S. GUHATHAKURTA 2014b: Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. In: *Landscape and Urban Planning*, 122, S. 16–28.
- NIKOLOPOULOU, M., N. BAKER u. K. STEEMERS 2001: Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the human parameter. In: *Solar Energy*, 70, 3, S. 227–235.
- NIKOLOPOULOU, M. u. K. STEEMERS 2003: Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. In: *Energy and Buildings*, 35, 1, S. 95–101.
- OKE, T.R. 1973: City size and the urban heat island. In: *Atmospheric Environment* (1967), 7, 8, S. 769–779.
- PAULEIT, S., A. SCHIRMANN, H. TRIMMEL u. K. HAGEN 2014: Grundlagen. In: STILES, R., B. GASINICA-WAWRYTKO, K. HAGEN, H. TRIMMEL, W. LOIBL, M. KÖSTL, T. TÖTZER, S. PAULEIT, A. SCHIRMANN u. W. FEILMAYR (Hrsg.): *Urban Fabric Types and Microclimate Response – Assessment and Design Improvement. Final Report*. Wien, S. 1–30.
- PERINI, K. u. A. MAGLIOCCO 2014: Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. In: *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 3, S. 495–506.
- PESCH, F., P. SCHMAL, E. SKUBOWIUS u. A. BINKELE 2011: Rahmenplanung Rosenheim. Bahnhofsareal. Ergebnisbericht Juli 2011. Im Auftrag der Stadt Rosenheim. Rosenheim/Stuttgart.

- SCHWARZMANN, S. 2007: Begründung zum Bebauungsplan Nr. 149 „Bahngelände Nord“. II. Umweltbericht. Begründung vom 19.07.2007. URL: [https://www.rosenheim.de/fileadmin/Dateien/Stadtplanungsamt/149\\_Begruendung\\_Umweltbericht\\_19-07-2007.pdf](https://www.rosenheim.de/fileadmin/Dateien/Stadtplanungsamt/149_Begruendung_Umweltbericht_19-07-2007.pdf) (letzter Zugriff 15.05.2015).
- SRIVANIT, M. u. K. HOKAO 2013: Evaluating the cooling effects of greening for improving the summer thermal environment at an institutional campus in the summer. In: *Building and Environment* 66, S. 158–172.
- STADT ROSENHEIM 2011a: Rahmenplanung Rosenheim. Bahnhofsareal. Ergebnisbericht Juli 2011, Rosenheim/Stuttgart.
- STADT ROSENHEIM 2011b: Rosenheim Bahnhofsareal Nord. Überblick Baufelder. URL: [https://www.rosenheim.de/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Baufelder\\_Uebersicht.pdf](https://www.rosenheim.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Baufelder_Uebersicht.pdf) (letzter Zugriff 15.05.2015).
- STEEMERS, K.A., M.C. RAMOS u. M. SINOU 2004: Stadtmorphologie. In: NIKOLOPOULOU, M. (Hrsg.): *Freiraumplanung unter Berücksichtigung des Bioklimas. Bericht des Projekts RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces – co-ordinated by CRES, Department of Buildings. Cambridge UK*, S. 19–23.
- TALEB, H. u. D. TALEB 2014: Enhancing the thermal comfort on urban level in a desert area: Case study of Dubai, United Arab Emirates. In: *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 2, S. 253–260.
- TALEGHANI, M., L. KLEEREKOPER, M. TENPIERIK u. A. VAN DEN DOBBELSTEEN 2014a: Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. In: *Building and Environment*, 83, S. 65–78.
- TALEGHANI, M., D. SAILOR, M. TENPIERIK u. A. VAN DEN DOBBELSTEEN 2014b: Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. In: *Building and Environment*, 73, S. 138–150.
- THORSSON, S., M. LINDQVIST u. S. LINDQVIST 2004: Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Goteborg. In: *International Journal of Biometeorology*, 48, 3, S. 149–156.
- TRIMMEL, H., K. HAGEN u. T. TÖTZER 2014: Gestaltungsmaßnahmen und Simulationen. In: STILES, R., B. GASINICA-WAWRYTKO, K. HAGEN, H. TRIMMEL, W. LOIBL, M. KÖSTL, T. TÖTZER, S. PAULEIT, A. SCHIRMANN u. W. FEILMAYR (Hrsg.): *Urban Fabric Types and Microclimate Response – Assessment and Design Improvement. Final Report. Wien*, S. 1–47.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) (Hrsg.) 2008: *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Trees and Vegetation*. URL: <http://www.epa.gov/heatiland/resources/pdf/TreesandVegCompendium.pdf> (letzter Zugriff 16.06.2015).
- WITIG, R., W. KUTTLER u. O. TACKENBERG 2012: Urban-industrielle Lebensräume. In: Mosbrugger, V., G. Brasseur, M. Schaller u. M. Stribny, B. (Hrsg.): *Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland. Darmstadt*, S. 290–307.
- WURM, M. u. H. TAUBENBÖCK 2015: Hier spielt die Musik. Räumlich differenziertes Siedlungswachstum in deutschen Ballungsräumen. In: Taubenböck, H., M. Wurm, T. Esch u. S. Dech (Hrsg.): *Globale Urbanisierung – Perspektive aus dem All. Oberpfaffenhofen*, S. 83–92.
- ZHOU, W., G. HUANG u. M.L. CADENASSO 2011: Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. In: *Landscape and Urban Planning*, 102, 1, S. 54–63.