



## Flächennutzungsmonitoring XI Flächenmanagement – Bodenversiegelung – Stadtgrün

IÖR Schriften Band 77 · 2019

ISBN: 978-3-944101-77-4

### **Multiskalige Erfassung und Prognose des Stadtklimas**

*Ronald Queck, Björn Maronga, Valeri Goldberg*

Queck, R.; Maronga, B.; Goldberg, V. (2019): Multiskalige Erfassung und Prognose des Stadtklimas. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XI. Flächenmanagement – Bodenversiegelung – Stadtgrün. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 77, S. 245-253.

# Multiskalige Erfassung und Prognose des Stadtklimas

Ronald Queck, Björn Maronga, Valeri Goldberg

## Zusammenfassung

Im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ werden Methoden und Werkzeuge zur multiskaligen Erfassung und Prognose des Stadtklimas erarbeitet. Der Beitrag gibt einen kurzen Überblick zum Gesamtprojekt und beschäftigt sich mit dem Teilbereich thermische Belastung von Stadtbewohnern. Zur Erfassung des Zustandes wurde ein Konzept mit mobilen Messsystemen entwickelt und angewendet. Die erhobenen Daten dienen unter anderem zur Evaluierung des neuen Stadtklimamodells PALM-4U. Dieses Werkzeug wird in „Stadtklima im Wandel“ weiterentwickelt und in Zusammenarbeit mit Anwendern und Behörden auf Funktionalität getestet. Das Konzept wird anhand von Untersuchungen in Berlin getestet.

## 1 Einführung

Vor dem Hintergrund des projizierten Klimawandels und zunehmender Bevölkerungskonzentration in großen Städten mit Wärmeinseleffekt erarbeitet die BMBF-Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ (Scherer et al. 2019b; <http://www.uc2-program.org>) Methoden und Werkzeuge zur Prognose der klimatischen Belastung von Großstadtbewohnern. Diese sollen auch zukünftige städtebauliche Änderungen bewerten können.

Bisherige Untersuchungen zur Veränderung des Basisklimas durch Städte tragen aufgrund von Skalenproblemen große Unsicherheiten in sich. Numerische Modelle, die z. B. Wärmeinseleffekte von Großstädten simulieren können, haben Gitterauflösungen von einem bis mehreren Kilometern (Lokalmodelle: COSMO-DE, ICON-EDA, WRF). Messungen in den Städten werden dagegen oft von lokalen Bedingungen dominiert und können daher nur bedingt zur Evaluierung bzw. Validierung dieser Modelle herangezogen werden. Simulationen auf der lokalen Ebene (z. B. mit ENVI-met) sind wiederum von einer Vorgabe der Umgebungsbedingungen abhängig, die den Wärmeinseleffekt bereits enthalten müssen.

Abbildung 1 zeigt die generelle Struktur der Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“. Eine zentrale Aufgabe ist die Entwicklung des Stadtklimamodells PALM-4U in „Modul A“ (Maronga et al. 2019a; <https://palm.muk.uni-hannover.de/mosaik/wiki>), welches in der Lage ist, sowohl den Wärmeinseleffekt von Großstädten als auch die Umströmung einzelner Gebäude und die Wirkung von Bäumen auf den Strahlungshaushalt zu simulieren. Neben der Einbeziehung der wesentlichen Skalen für das Stadtklima können optional Module zugeschaltet werden, die die Bearbeitung unterschiedlichster Fragestellungen erlauben, z. B. zur Luftchemie, Aerosolphysik und zum Innenraumklima.

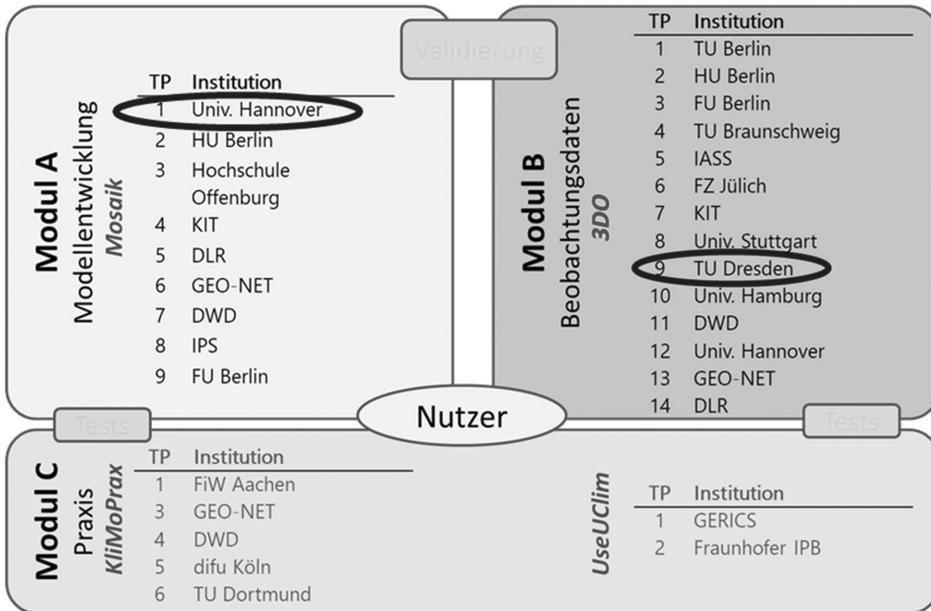


Abb. 1: Struktur des Projektverbundes mit Markierung der Institutionen der Autoren (Quelle: Scherer et al. 2019, modifiziert und ergänzt)

Zur Evaluierung des Modells wurden von Modul B in den drei deutschen Großstädten Berlin, Hamburg und Stuttgart umfangreiche Messungen zur dreidimensionalen räumlichen Erfassung des Stadtklimas durchgeführt (Scherer et al. 2019a). Zur Untersuchung des thermischen Wirkungskomplexes (KRdL 1998) wurde ein Netz von Messstationen genutzt und ein Konzept für Messungen mit mobilen Plattformen entwickelt. Letzteres liefert zum einen repräsentative Daten für bestimmte Orte, deckt zugleich aber auch den typischen Aktionsradius eines Stadtbewohners ab. Die eingesetzten mobilen Plattformen (Rucksack und Fahrrad) ermöglichen eine direkte Bestimmung der individuellen Exposition und repräsentieren Lebensräume in hoher räumlicher Auflösung.

Die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen in den Modulen A und B wird von Modul C begleitet, in dem in Zusammenarbeit mit künftigen Nutzern Anforderungskataloge erstellt werden und die Praxistauglichkeit getestet wird (Halbig et al. 2019).

Der folgende Beitrag konzentriert sich auf den Teilbereich „Thermische Belastung von Stadtbewohnern“. Er führt kurz in die Messmethodik ein und zeigt exemplarische Ergebnisse, abschließend werden die betreffenden Modell-Module von PALM-4U vorgestellt.

## 2 Thermische Belastung von Stadtbewohnern – die Bestimmung mit mobilen Messplattformen

### 2.1 Aufbau – Kriterien und Besonderheiten

Der Wärmehaushalt des Menschen bildet die Grundlage für die Bestimmung der thermischen Belastung. Er wird bestimmt durch thermophysio-logische Regulationsmechanismen des menschlichen Organismus, die Bekleidung und die äußeren Umweltbedingungen. Letztere bilden praktisch die objektiven Randbedingungen, den thermischen Wirkungskomplex. Dieser umfasst die Größen Strahlung, Temperatur, Feuchte und Wind. Der Einfluss der Größen auf die thermische Belastung wird in Kennzahlen wie dem „Predicted Mean Vote“ (PMV), der „Perceived Temperature“ (PT) oder dem „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) zusammengefasst (Freitas und Grigorieva 2017).

In komplexen Umgebungen bilden mobile Messplattformen die ideale Methode zur direkten Erfassung der Umweltbedingungen. Für den Vergleich mit Modellen ist jedoch eine zeitliche und räumliche Auflösung notwendig, die den Änderungen der Umweltbedingungen entspricht. Die räumliche Skala der Änderungen wird an der Einstrahlung in engen Straßenschluchten und bei der Betrachtung der Wirkung von Straßenbäumen deutlich, sie liegt im Bereich von 1 bis 5 m. Aus der Geschwindigkeit der mobilen Plattformen von 0 bis 8 m/s leitet sich eine Messfrequenz von 1 Hz ab. Diese Bedingung stellt besondere Anforderungen an die Ansprechzeit der Sensoren. Für die Messung der kurzwelligen Strahlung konnten dabei neu entwickelte Quantendetektoren genutzt werden. Die thermischen Detektoren für die langwellige Strahlung und die Feuchtesensoren sind mit 1-2 s Reaktionszeit die limitierenden Elemente für die zeitliche Auflösung der mobilen Messsysteme. Im Rahmen von „Stadtklima im Wandel“ wurden Fahrräder und Rucksäcke (Abb. 2) als mobile Plattformen genutzt. Zur Qualitätsprüfung, Zuordnung und Einschätzung der Messungen wurden zeitlich synchronisierte Serienfotos aufgezeichnet, teilweise von einer 360°-Kamera. Damit sind Position, Ausrichtung und sich



Abb. 2: Mobiles Meßsystem auf dem Rucksack im Einsatz  
(Foto: Queck 2018)

ändernde Rahmenbedingungen der Messungen genau protokolliert (z. B. Bewölkung, dichter Verkehr). Zusätzlich lassen sich die Strahlungsmessungen (Umgebungstemperaturen) den bestimmenden Oberflächen zuordnen und es können Sky View Faktoren (Sichtbereich des Himmels) in hoher Dichte bestimmt werden (Abb. 3).

Ein nicht erwartetes Problem ergab sich aus der exakten räumlichen Zuordnung der Messungen. Globale Positionierungssysteme (GPS) können in Städten aufgrund von Reflexion und Dämpfung der elektromagnetischen Wellen Fehler von mehr als 30 m aufweisen. Differentielle GPS benötigen eine Funkverbindung zwischen Basis und mobiler Plattform, die in Straßenschluchten nur bis ca. 500 m Entfernung zuverlässig ist. Zur Lösung des Problems wurde eine Routine entwickelt, mit der die Messpunkte anhand der GPS-Aufnahmen zeitlich auf einem vorgegebenen Messpfad verteilt werden. Die exakte Zuordnung wird anhand der Fotografien überprüft.

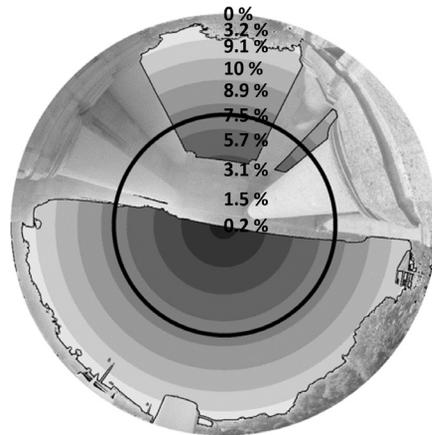


Abb. 3 Obere Hemisphäre aus einer 360°-Fotografie, mit Anteilen an sichtbarem Himmel (konzentrische Kreise), deren Summe den „Sky View Factor“ ergibt. Die schwarze Linie umreißt den Bereich, der vom vertikalen Infrarotthermometer „gesehen“ wurde. (Quelle: eigene Darstellung)

## 2.2 Anwendung

Erprobungen und erste Anwendungen der mobilen Messsysteme im Rahmen von „Stadtklima im Wandel“ fanden in Hamburg (Winter 2018) und Berlin (Sommer 2017 und 2018) statt. Parallel dazu wurde der Messrucksack im Projekt „HeatResilientCities“ in Dresden eingesetzt. In Berlin fanden 25 Messgänge mit dem Rucksack und Fahrrad statt, in Summe wurden dort 140 km bzw. 550 km vermessen.

Exemplarisch werden im Folgenden die Temperaturmessungen auf der Fahrradroute diskutiert. Während die Messungen am Tag (hier nicht dargestellt) eine hohe Variabilität der Lufttemperatur zeigen, die hauptsächlich durch die momentane Einstrahlung in den einzelnen Abschnitten der Messroute hervorgerufen wird, bildet sich in der Nacht eine deutliche Gliederung des Stadtgebiets heraus. Auf Abbildung 4 sind die Nachtmessungen über die Karte von Berlin geplottet (die Siegestsäule im Tiergarten ist durch die Temperaturskala markiert). Unter dem Einfluss von Grünflächen und Wasserläufen kühlen sich die nordöstlichen Bereiche deutlich stärker ab. Die Temperatur um die Wohnblocks in der Nähe des Tiergartens liegt um 4 °C unter denen auf der Leibnizstraße, einem dichter bebauten Bereich (weißes Viereck im Südwesten). An der Spree liegende Wohn-

blocks (weißes Viereck im Norden), die am Abend aufgrund der westlichen Exposition sehr hohe Temperaturen zeigen, kühlen sich nachts schnell auf moderate Temperaturen ab. Dagegen wurden auf der Leibnizstraße Temperaturen bis zu 25 °C um Mitternacht gemessen, obwohl dort am Tag geringere Strahlungsbelastungen in Bodennähe zu verzeichnen waren.

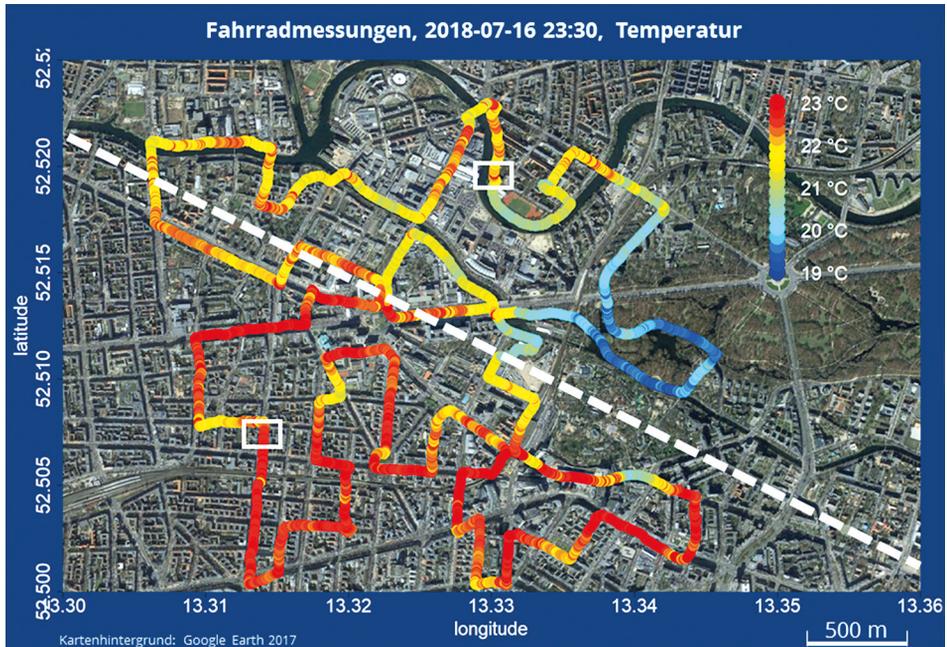


Abb. 4: Temperaturmessung auf Fahrradroute im Stadtgebiet Berlin (Quelle: eigene Darstellung mit Kartenhintergrund aus Google Earth, 2019)

### 3 Das Stadtklimamodell PALM-4U

#### 3.1 Modellmerkmale

Das Modell PALM-4U bzw. die sogenannten PALM-4U-Komponenten für urbane Fragestellungen sind Teil des PALM-Modellsystems (Maronga et al. 2015; 2019b), das im Wesentlichen von der PALM-Arbeitsgruppe des Institutes für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz-Universität Hannover entwickelt und betreut wird. Im Rahmen von „Stadtklima im Wandel“ wurde und wird es von einem Konsortium von nationalen Institutionen (Abb. 1) sowie Kooperationspartnern aus dem Ausland um eine wesentliche Zahl von Komponenten und Methoden erweitert, die eine universelle Anwendung im Bereich der Erforschung des Stadtklimas und der Planung von Änderung erlauben. Das Modellsystem ist frei verfügbar (<http://palm-model.org>, open source), sehr gut dokumentiert und wird von einer zunehmenden Zahl von Anwendern weltweit genutzt.

Abbildung 5 gibt einen Überblick zu den in PALM-4U implementierten Prozessen für die Repräsentation der Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Atmosphäre in Städten. Im Zusammenhang mit der Wärmebelastung sind vor allem die Strahlungsmodellierung, das Biometeorologiemodul und das Multiagentensystem von Bedeutung. Diese Komponenten erlauben eine detaillierte Untersuchung von baulichen Veränderungen auf den thermischen Komfort in Städten. Ein Alleinstellungsmerkmal bilden vor allem die Chemiemodule sowie der Vorteil, dass PALM-4U grundsätzlich turbulenzauflösend arbeitet. Mit dem Modell können daher sowohl die übergeordnete Strömung als auch die Umströmung von Gebäuden und deren Einfluss auf die Stoffkonzentrationen in Rezeptorhöhe unter Berücksichtigung der Thermodynamik und Strahlung simuliert werden.

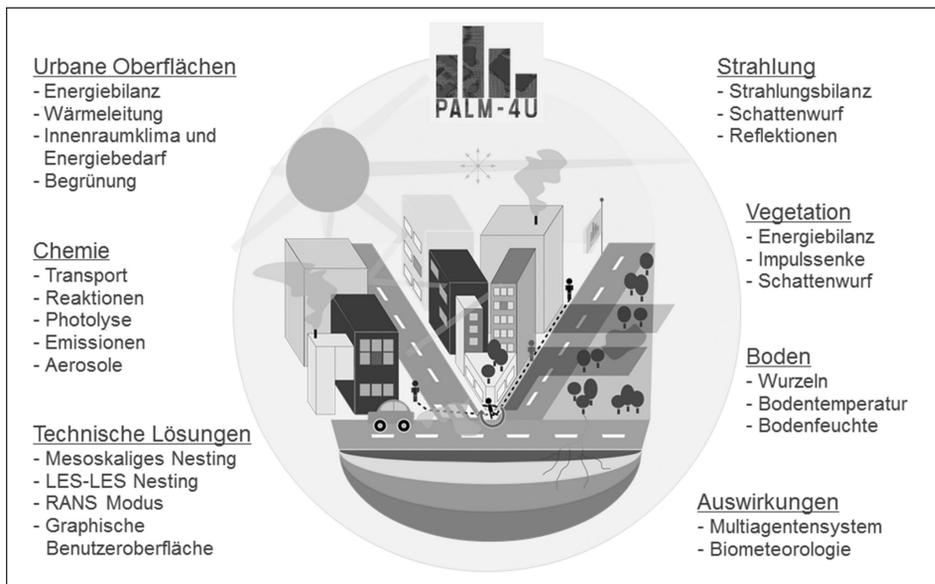


Abb. 5: PALM-4U, Überblick zum Modellsystem und den enthaltenen Modellkomponenten (Quelle: eigene Darstellung)

### 3.2 Fallbeispiel Berlin

Zur Verdeutlichung des betrachtbaren Skalenumfangs sind die mittäglichen Temperaturverteilungen für den Großraum Berlin (Abb. 6) und das Regierungsviertel (Abb. 7) an einem typischen Sommertag (21.07.2013) dargestellt.

Abbildung 6 macht den Wärmeinseleffekt von ca. 3 K im städtischen Bereich deutlich, aber auch die Abkühlung durch Seen und Waldgebiete. Das Signal der Wärmeinsel wird hier durch die thermische Konvektion überlagert, die zu einer zellähnlichen Temperaturverteilung führt. Zellähnlich heißt hier, dass es kleinräumige Gebiete mit Auf- und Abwinden gibt. Dadurch entstehen sehr warme (rote) Bereiche, die im Bild oft verbunden sind; davon eingeschlossen sind kühlere Bereiche.

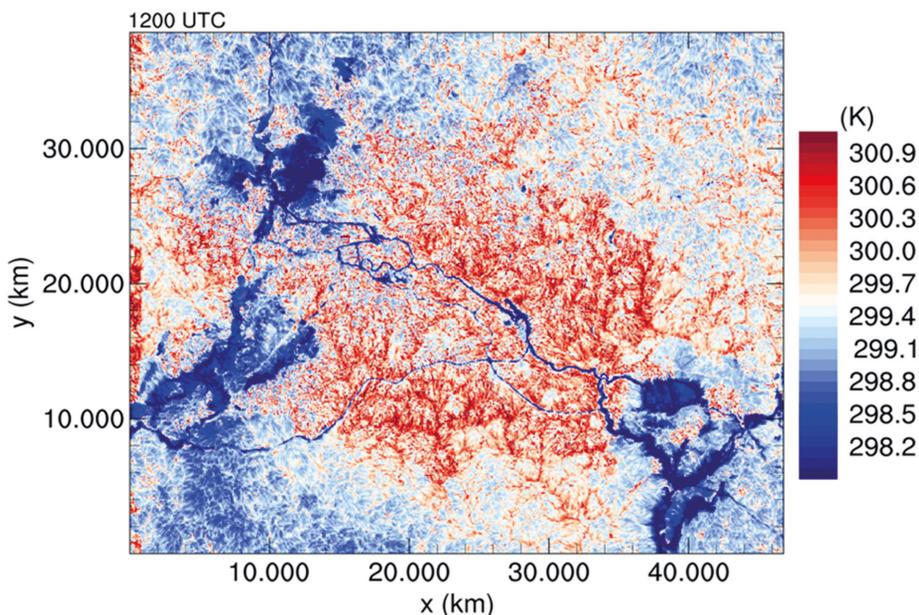


Abb. 6: PALM-4U Simulation für den Großraum Berlin an einem Sommertag – mittägliche instantane (augenblickliche) Temperaturverteilung in 2 m Höhe über Grund/Gebäude (Quelle: eigene Darstellung)

Die zu diesem Modelllauf gehörige Simulation des Regierungsviertels zeigt die Temperaturverteilung mit einer räumlichen Auflösung von 1 m. Es wird damit möglich, Hotspots, wie die Berliner Charité ( $x = 0,9$  km,  $y = 0,8$  km) und den südlichen Bereich des Kanzleramtes ( $x = 0,4$  km,  $y = 0,3$  km) zu erkennen und die Wirkung von Grün- und Wasserflächen genauer zu betrachten. Es können Orte ermittelt werden, in denen einzelne Maßnahmen am effektivsten zur Minderung von thermischem Stress eingesetzt werden.

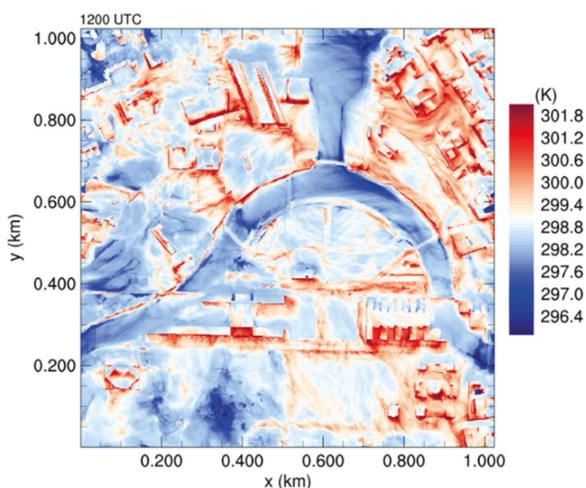


Abb. 7: PALM-4U Simulation für das Regierungsviertel in Berlin „Child-domain“ – mittägliche instantane (augenblickliche) Temperaturverteilung in ca. 2 m Höhe über Grund/Gebäude (Quelle: eigene Darstellung)

## 4 Fazit

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass thermische Bedingungen in Städten einer hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen. Exponierte Wohnlagen zeichnen sich durch einen starken Tagesgang mit extremen Hitzebelastungen aus, während in dicht bebauten Gebieten mit geringer Strahlungsbelastung im Straßenniveau die nächtliche Abkühlung fehlt.

Mit den entwickelten Messkonzepten und PALM-4U wird es in Zukunft möglich sein, das Klima von Großstädten detailliert, aber auch flächendeckend zu untersuchen. PALM-4U ermöglicht es dabei, Einflussgrößen zu detektieren und die Wirkung von baulichen Änderungen und Adaptionsmaßnahmen zu quantifizieren. Weiterhin können Einflüsse von zukünftigen Änderungen des Basisklimas auf das Stadtklima prognostiziert werden.

## 5 Literatur

- Freitas, C. R. de; Grigorieva, E. A. (2017): A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. In: *Int. J. Biometeorol.* 61: 487-512.
- Halbig, G.; Steuri, B.; Büter, B.; Heese, I., Schultze, J., Stecking, M.; Stratbücker, S., Willen, L., Winkler, M. (2019): User requirements and case studies to evaluate the practicability and usability of the urban climate model PALM4U. In: *Meteorol. Z.*: 139-146.
- KRdL – Kommission Reinhaltung der Luft (1998): VDI 3787, Blatt 2: Umweltmeteorologie; Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Luft-hygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima.
- Maronga, B.; Gryschka, M.; Heinze, R.; Hoffmann, F.; Kanani-Sühring, F.; Keck, M.; Ketelsen, K.; Letzel, M. O.; Sühring, M.; Raasch, S. (2015): The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for Atmospheric and Oceanic Flows: Model Formulation, Recent Developments, and Future Perspectives. In: *Geosci. Model Dev.*, 8: 2515-2551. DOI: 10.5194/gmd-8-2515-2015.
- Maronga, B.; Gross, G.; Raasch, S.; Banzhaf, S.; Forkel, R.; Heldens, W.; Kanani-Sühring, F.; Matzarakis, A.; Mauder, M.; Pavlik, D.; Pfafferott, J.; Schubert, S.; Seckmeyer, G.; Sieker, H.; Winderlich, K. (2019a): Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements. In: *Meteorol. Z.* 28(2): 105-119.
- Maronga, B.; Banzhaf, S.; Burmeister, C.; Esch, T.; Forkel, R.; Fröhlich, D.; Fuka, V.; Gehrke, K. F.; Geletič, J.; Giersch, S.; Gronemeier, T.; Groß, G.; Heldens, W.; Hellsten, A.; Hoffmann, F.; Inagaki, A.; Kadasch, E.; Kanani-Sühring, F.; Ketelsen, K.; Khan, B. A.; Knigge, C.; Knoop, H.; Krč, P.; Kurppa, M.; Maamari, H.; Matzarakis, A.; Mauder, M.; Pallasch, M.; Pavlik, D.; Pfafferott, J.; Resler, J.; Rissmann, S.; Russo, E.; Salim, M.; Schrempf, M.; Schwenkel, J.; Seckmeyer, G.; Schubert, S.; Sühring, M.; von Tils, R.; Vollmer, L.; Ward, S.; Witha, B.; Wurps, H.; Zeidler, J.; Raasch, S. (2019b, in Begutachtung): Overview of the PALM model system 6.0. In: *Geosci. Model Dev. Discuss.*

- Scherer, D.; Ament, F.; Emeis, S.; Fehrenbach, U.; Leitl, B.; Scherber, K.; Schneider, C.; Vogt, U. (2019a): Three-Dimensional Observation of Atmospheric Processes in Cities. In: *Meteorol. Z.* 28(2): 121-138.
- Scherer, D.; Antretter, F.; Bender, S.; Cortekar, J.; Emeis, S.; Fehrenbach, U.; Gross, G.; Halbig, G.; Hasse, J.; Maronga, B.; Raasch, S.; Scherber, K. (2019b): Urban Climate Under Change [UC]2 – A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions. In: *Meteorol. Z.* 28(2): 95-104.