

Leon Flemming, Andreas Braun, Volker Hochschild

Kartierung demographisch-bedingter Veränderungen im städtischen Hitzerisiko

Ein räumlich-integrierter Ansatz am Beispiel der Universitätsstadt Tübingen

Die hitzebedingten Belastungen in Städten werden durch den Klimawandel und eine alternde Bevölkerung verschärft. Während viele Studien nur die Gefahr der Hitzeinsel untersuchen, aber nicht deren gesellschaftliche Konsequenzen, bietet die Konzeptualisierung von Hitzeinseln als Risiko das sich aus den Komponenten Gefahr (Hitze), Exposition (Einwohnerdichte) und Vulnerabilität (Vulnerable Gruppen) zusammensetzt, erhebliche Vorteile für die Stadtplanung. In dieser Studie werden hierfür Zensusdaten und Satellitenaufnahmen kombiniert, um die Berechnung des Heat-Related Elderly Risk Index als integriertes Maß am Beispiel der Stadt Tübingen aufzuzeigen. So können nicht nur räumliche Unterschiede dargestellt, sondern auch demographisch bedingte Veränderungen kartiert und quantifiziert werden. Die Untersuchungen zeigen, dass sich ein sehr hohes Risiko auf wenige konstante Bereiche in der Stadt konzentriert, jedoch zwischen 2011 und 2022 insbesondere Bereiche hohen Risikos zugenommen haben und einen Anstieg um rund 11 % verbuchen, der allein auf demographische Veränderungen zurückzuführen ist. Das vorgelegte Konzept ist transparent und auf andere Städte übertragbar und kann durch weitere Aspekte wie innerstädtische Mobilität oder tageszeitliche Unterschiede in der Hitze erweitert werden.

Einleitung

Hitze stellt eine zunehmende Herausforderung für Städte dar – auch in Deutschland sind jedes Jahr Todesfälle direkt auf hohe Temperaturen zurückzuführen. So errechnete das Robert-Koch-Institut für das Hitzejahr 2003 rund 7.600 hitzebedingte Todesfälle in Deutschland, europaweit waren es über 70.000 (An der Heiden et al. 2019). Besonders betroffen sind Ballungsräume, in denen versiegelte Flächen, dichte Bebauung und Schadstoffemissionen den städtischen Wärmehaushalt erheblich verändern (Mehra 2021; Kang et al. 2022). Der sogenannte Urbane Hitzeinsel-Effekt (UHI) führt dazu, dass Städte sich tagsüber stärker aufheizen und nachts langsamer abkühlen als das Umland. Diese Entwicklung verstärkt gesundheitliche Risiken, insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen, und steigert den Energieverbrauch für Gebäudekühlung erheblich. Zudem kann Hitze langfristige Auswirkungen auf Luftqualität und Infrastruktur haben, etwa durch erhöhte Ozonwerte und smogartige Bedingungen (Santamouris et al. 2015).

Vor diesem Hintergrund wird zunehmend die Notwendigkeit gezielter Anpassungsmaßnahmen betont. Während urbane Hitzeinseln bereits vielfach untersucht wurden, bietet die Konzeptualisierung von Hitze als Risiko – zusammengesetzt aus Gefahr, Exposition und Vulnerabilität – entscheidende Vorteile für die Stadtplanung. Dieser Ansatz ermöglicht eine priorisierte Identifikation besonders gefährdeter Bereiche, um Maßnahmen gezielt einzusetzen (Carter et al. 2015). Die Integration kleinräumiger Zensusdaten in Geographische Informationssysteme (GIS) erlaubt eine genauere Analyse der demographischen Entwicklung und deren Einfluss auf das Hitzerisiko. Während räumliche Bevölkerungsdaten lange Zeit ein Engpass in der Forschung waren (Dieckhoff et al. 2018; Hoeckner et al. 2020), bieten aktuelle Datensätze des Statistischen Bundesamts neue Möglichkeiten für detaillierte Untersuchungen.

In dieser Studie wird am Beispiel der Universitätsstadt Tübingen exemplarisch gezeigt, wie die Kombination von Zensusdaten und Satellitenbildern genutzt werden kann, um das Hitzerisiko älterer Bevölkerungsgruppen zu quantifizieren. Ziel ist es, durch eine präzisere Kartierung demographischer Veränderungen eine bessere Grundlage für Hitzeaktionspläne zu schaffen und die Anpassungsstrategien in Städten zu verbessern.

B.Sc. Leon Flemming

Masterstudierender am Geographischen Institut der Universität Tübingen

✉ leon.flemming@student.uni-tuebingen.de

Dr. Andreas Braun

Akademischer Rat am Geographischen Institut der Universität Tübingen

✉ an.braun@uni-tuebingen.de

Prof. Dr. Volker Hochschild

Professor für Physische Geographie und Geographische Informationssysteme am Geographischen Institut der Universität Tübingen

✉ volker.hochschild@uni-tuebingen.de

Schlüsselwörter:

Urbane Hitzeinsel (UHI) – Risiko, Stadtklima – Klimawandel – Vulnerabilität – Zensus – Geographische Informationssysteme (GIS)

Daten und Methodik

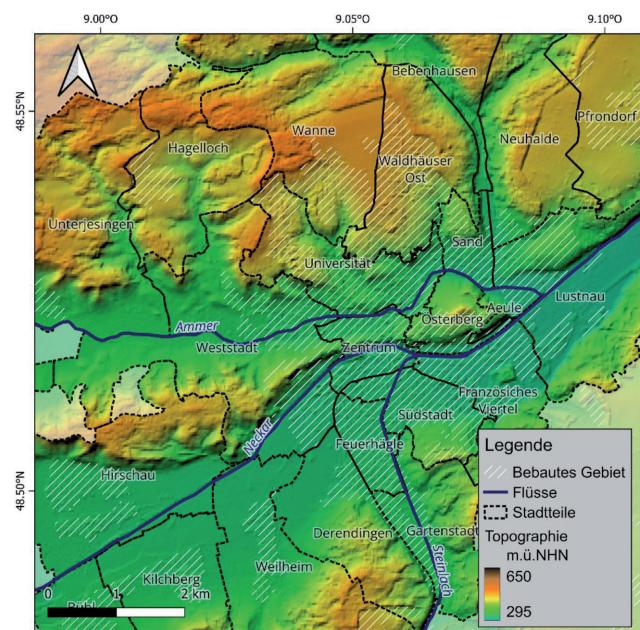
Methodischer Ansatz

Die Untersuchung urbaner Hitzeinseln basiert auf der Definition des UN Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR 2019), wonach sich Risiko aus Gefahr, Exposition und Vulnerabilität zusammensetzt. Dieses Konzept geht auf das Risikodreieck von Crichton (1999) zurück, welches diese drei Komponenten als gleichwertige oder gewichtbare Einflussfaktoren beschreibt, welche leicht durch räumliche Daten repräsentiert und quantifiziert werden können. In dieser Studie wird das Hitzerisiko anhand einer Kombination von Zensus- und Satellitendaten ermittelt. Dabei repräsentieren die Oberflächentemperaturen die Komponente der Gefahr, die sich aufgrund unterschiedlicher Bebauung ungleich in der Stadt verteilt. Die Exposition wird durch die räumliche Verteilung der gesamten Bevölkerung beschrieben, während die Vulnerabilität ältere Menschen umfasst, die besonders anfällig für hitzebedingte Gesundheitsrisiken sind, deren Anteil an der Gesellschaft jedoch durch den demographischen Wandel ansteigt. Durch die Kombination dieser Faktoren kann das Hitzerisiko kartiert und im Zeitverlauf analysiert werden. Mit dem vorliegenden Ansatz untersuchen wir retrospektiv, wie sich das Hitzerisiko in Tübingen zwischen 2011 und 2022 entwickelt hat (Abb. 1). Um den Einfluss der sich ändernden Bevölkerungsstruktur herausarbeiten zu können, wird die Komponente Gefahr (Oberflächentemperaturen) als zeitlich konstant betrachtet.

Untersuchungsgebiet

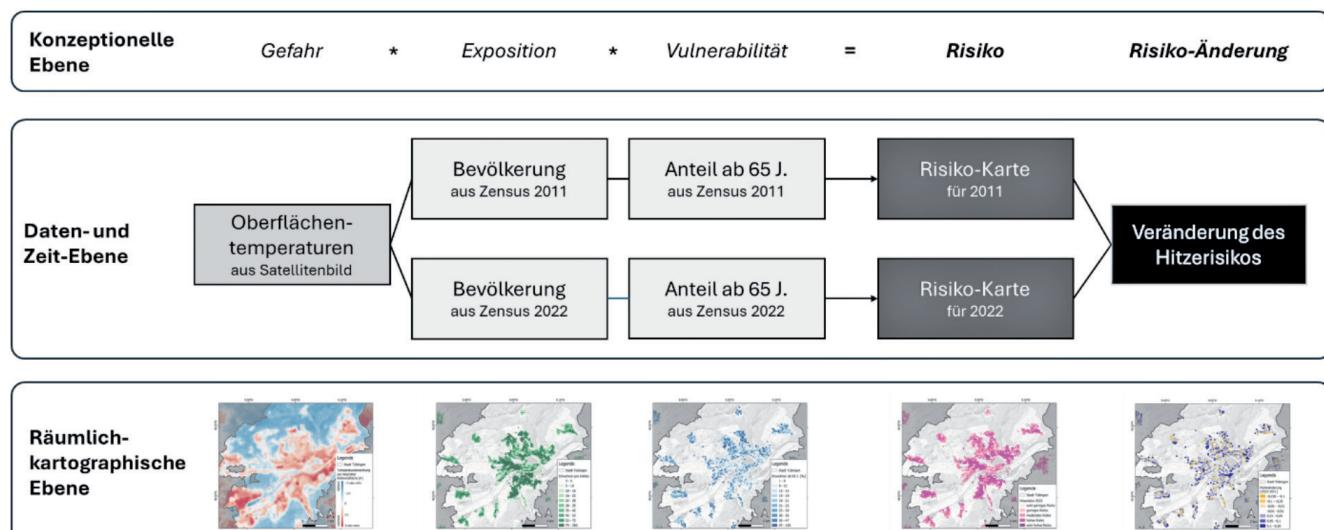
Die Universitätsstadt Tübingen liegt etwa 30 km südlich von Stuttgart und zählt rund 90.000 Einwohner. Geprägt von einer abwechslungsreichen Topographie (Abb. 2), wird die Stadt durch den Neckar in einen Nord- und Südtteil unterteilt. Neben der historischen Altstadt im Zentrum gehören 23 Stadtteile mit unterschiedlichen Siedlungsstrukturen zum Stadtgebiet. Klimatisch weist Tübingen eine Jahresdurchschnittstemperatur von 10,0 °C auf (Deutscher Wetterdienst, Zeitraum 1991–2020), welche bereits 3,2 °C über dem der vorindustri-

Abb. 2 Stadtteile, Hydrographie und Topographie im Untersuchungsgebiet. Datenquelle: Stadt Tübingen (Stadtteile) und DLR / Airbus im Rahmen des Copernicus Programms der ESA (Digitales Höhenmodell)



ellen Zeit liegt. Die Region verzeichnet langfristig steigende Temperaturen sowie veränderliche Niederschlagsmuster, bei denen sich insbesondere seit 2005 unterdurchschnittliche Jahresniederschlagssummen auf die potenzielle Verdunstung im städtischen Umfeld auswirken, welche die Bildung von städtischen Hitzeinseln begünstigen (Rosner & Eck 2025). In dieser Entwicklung kann Tübingen als eine Stadt mit für Baden-Württemberg repräsentativer Entwicklung betrachtet werden, wenn man die Daten des Klimaatlas heranzieht

Abb. 1 Methodischer Ansatz der Arbeit



(LUBW 2025). Seine Eignung, um die Heterogenität von urbanen Hitzeinseln zu untersuchen, ist dadurch gegeben und es ist davon auszugehen, dass die Übertragung der Methodik auf Tübingen auch auf vergleichbare andere Städte gegeben ist, insbesondere durch die landesweite Verfügbarkeit von Zensusdaten.

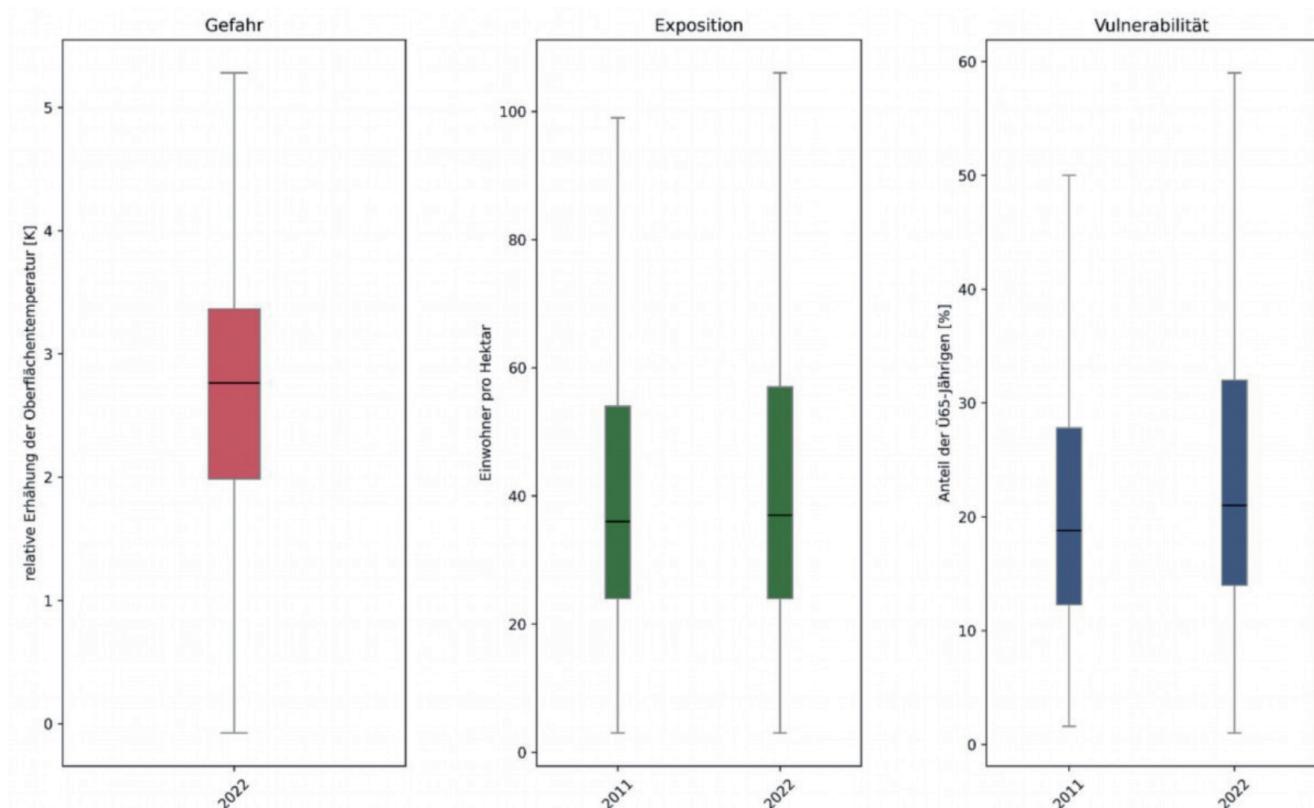
Datengrundlage und -verarbeitung

Um die Komponente Gefahr einheitlich und objektiv im Stadtgebiet abzubilden, werden Satellitendaten der Landsat-Mission herangezogen. Aufgrund ihrer räumlichen Auflösung von 100 m und hohen Wiederkehrrate eignen sie sich zur flächenhaften Ableitung urbaner Temperaturmuster. Für diese Studie wurde eine Aufnahme vom 25. Juli 2022 gewählt, da an diesem Tag besonders hohe Temperaturen gemessen wurden und in diesem Zeitraum generell eine stabile Strahlungswetterlage vorherrschte. Diese in den Pixeln erfasste Emission der Erdoberfläche in Wellenlängenbereichen des thermalen Infrarots (1.000 bis 1.250 nm) wurde zunächst in °C umgerechnet. An 15 unbebauten Flächen außerhalb der Stadt wurde eine Referenztemperatur durch Bildung eines Medians ermittelt, welcher anschließend von der gesamten Aufnahme subtrahiert wurde. Die daraus resultierende Karte (Abb. 4) zeigt, wie stark bebaute Bereiche überhitzt, bzw. bewaldete Flächen kühler sind als die offene Landschaft.

Die Komponenten Exposition und Vulnerabilität wurden anhand von Zensusdaten der Jahre 2011 und 2022 ermittelt, die von Statistischen Ämtern des Bundes und der Länder

(2025) erhoben werden. Sie liegen sowohl aggregiert nach administrativen Einheiten (z.B. Landkreise und Gemeinden) als auch nach geographischen Gittern mit der Kantenlänge von 100 m vor (BKG 2025). In dieser Form lassen sie sich ideal mit den Satellitendaten zusammenführen, welche denselben räumlichen Maßstab aufweisen. Während die Exposition durch die Gesamtzahl der Einwohner pro Gitterzelle beschrieben wird und Grundvoraussetzung für das Auftreten von Hitzerisiko ist (Abb. 5), umfasst die Vulnerabilität den Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahren (Abb. 6), da diese nach Chambers (2020) körperlich besonders vulnerabel gegenüber Hitze sind, insbesondere im Zusammenhang mit Vorerkrankungen oder der regelmäßigen Einnahme von Medikamenten oder durch ihre eingeschränkte Mobilität (Sarofim et al. 2016). Zur Datenverarbeitung wurden die Zensusdaten in einem Geographischen Informationssystem (GIS) mit den Landsat-Daten verschneitten und in einer Vektor-Attributabelle zusammengefasst. Dabei wurden nur Gitterzellen innerhalb des Stadtgebiets berücksichtigt. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Werte der fünf räumlich modellierten Eingangsparameter: Die mittlere Oberflächentemperatur liegt für alle besiedelten Gebiete bei 2,59 K mit einer Standardabweichung von 1,1 K. Die mittlere Bevölkerungsdichte (Exposition) ist zwischen 2011 und 2022 von 44,25 auf 46,32 Einwohner pro Hektar angestiegen, was den Bevölkerungszuwachs von 83.249 auf 92.811 Einwohner in diesem Zeitraum widerspiegelt (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2024). Zudem hat sich der Quartilsabstand vergrößert: Das obere Ende (75. Perzentil) ist von 54 auf

Abb. 3 Box Plots aller Werte für Exposition, Vulnerabilität und Risiko für 2011 und 2022



57 Einwohner je Hektar gestiegen, was bedeutet, dass 2022 mehr Menschen in dichter besiedelten Gebieten leben. Der Anteil der über 65-Jährigen ist im betrachteten Zeitraum von durchschnittlich 22,24% auf 25,34% gestiegen. Im Gegensatz zur Bevölkerungsdichte ist der Interquartilsabstand durch die Alterung der Bevölkerung allgemein angestiegen. Diese Zahlen bilden den Ausgangspunkt für die nachfolgende räumliche Modellierung des Hitzerisikos.

Räumliche Modellierung des Risikos

Zur Berechnung des Hitzerisikos wurde der Heat-Related Elderly Risk Index (HERI) verwendet, der bereits in anderen Städten erfolgreich eingesetzt wurde (Todeschi et al. 2022). Der Index kombiniert die drei Komponenten Gefahr, Exposition und Vulnerabilität auf einer einheitlichen Skala von 0 bis 1 und ermöglicht eine leicht interpretierbare räumliche Darstellung. Da die drei Parameter auf unterschiedlichen Einheiten basieren, erfolgte zunächst eine Normalisierung anhand der 5%- und 95%-Perzentile (Formel 1). Dies reduziert den Einfluss extremer Werte und gewährleistet eine konsistente Skalierung.

$$\text{mit } y_i = \frac{x_i - P_5(x)}{P_{95}(x) - P_5(x)} \quad (1)$$

- y_i = normalisierter Wert
- x_i der ursprüngliche Wert
- P_5 bzw. P_{95} die jeweiligen Perzentile

Anschließend wurden die normalisierten Werte gewichtet summiert (Formel 2):

$$HERI = \left(\frac{1}{2} * G_{norm} \right) + \left(\frac{1}{4} * E_{norm} \right) + \left(\frac{1}{4} * V_{norm} \right) \quad (2)$$

G_{norm} , E_{norm} , V_{norm} stehen hierbei für den normalisierten Parameter einer Zelle der drei Komponenten Gefahr, Exposition und Vulnerabilität. Der resultierende Wert (HERI) beschreibt das relative Hitzerisiko für jede 100-Meter-Gitterzelle im Stadtgebiet und wurde zur besseren Interpretierbarkeit in fünf Risikoklassen eingeteilt (nach Morabito et al. 2015):

- sehr geringes Risiko: HERI < 0,2
- geringes Risiko: 0,2 ≤ HERI < 0,4
- moderates Risiko: 0,4 ≤ HERI < 0,6
- hohes Risiko: 0,6 ≤ HERI < 0,8
- sehr hohes Risiko: HERI ≥ 0,8

Diese Klassifizierung wurde für das Jahr 2022 angewandt (Abb. 7). Um die Veränderung des Hitzerisikos zwischen 2011 und 2022 zu quantifizieren, wurden die Werte beider Jahre direkt subtrahiert. Positive Werte zeigen eine Zunahme des Risikos, negative Werte eine Abnahme (Abb. 8).

Ergebnisse

Aktuelles Hitzerisiko

Abbildung 4 zeigt deutliche Unterschiede in der Intensität der urbanen Hitzeinsel innerhalb Tübingens. Wie erwartet, sind bebauten Flächen wärmer als natürliche Gebiete, wäh-

rend Waldflächen aufgrund höherer Verdunstung kühler sind. Allerdings sind nicht alle Stadtteile gleichermaßen betroffen: Während die nördlichen Stadtteile Wanne, Waldhäuser Ost und Sand eine Temperaturerhöhung von 1 bis 2 K aufweisen, sind das Zentrum und Industriegebiete in Süd- und Weststadt deutlich stärker erhitzt. Hier spielen neben Versiegelungs- und Begrünungsgrad auch topographische Unterschiede eine Rolle, da das Stadtgebiet nach Norden hin ansteigt. Auffällig sind vergleichsweise kühle Bereiche trotz Bebauung, etwa am westlichen Österberg oder im Loretto-Viertel der Südstadt, wo die Temperaturabweichungen überwiegend bei 1 bis 2,5 K liegen. Auch der kühlende Einfluss des Neckars ist linienhaft erkennbar. Besonders hohe Temperaturen treten in den industriellen Gebieten auf, mit Spitzenwerten bis 7,2 K im Stadtteil Feuerhägele und 6,3 K im Industriegebiet Sindelfinger Straße. Städtische Viertel ohne industrielle Nutzung, darunter die Innenstadt und das Universitätsviertel, sind ebenfalls übermäßig erhitzt, erreichen aber nicht die Extremwerte der Industriegebiete.

Abb. 4 Karte der Komponente „Gefahr“

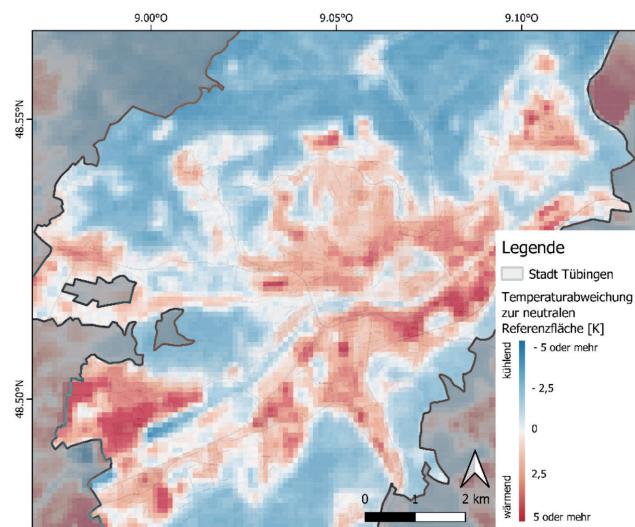
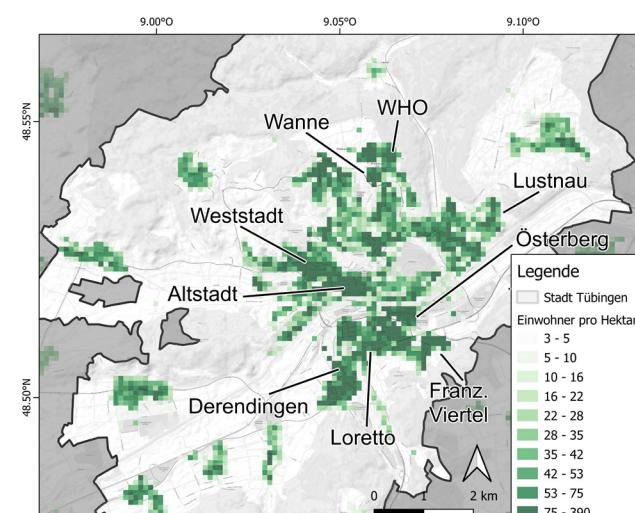


Abb. 5 Karte der Komponente „Exposition“



Gebiete mit hoher Exposition (Abb. 5) konzentrieren sich vor allem auf die Altstadt im Zentrum und die Weststadt, wo dichte Bebauung die Bevölkerungsdichte erhöht. Besonders auffällig sind die Hochhausgebiete in Waldhäuser Ost und Wanne, insbesondere das „Studentendorf Waldhäuser Ost“, welches trotz kleiner räumlicher Ausdehnung die höchsten Werte aufweist. Weitere dicht besiedelte Bereiche finden sich nordwestlich des Österbergs, die von einer hohen Bauweise und einem hohen Wohnanteil geprägt sind. Auch südlich des Neckars gibt es stark besiedelte Quartiere, darunter das Französische Viertel, das Loretto-Areal und Derendingen. Die Verteilung im Stadtteil Lustnau ist heterogener, mit vereinzelten Hochhäusern als Hotspots hoher Exposition.

Abbildung 6 zeigt den Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahren je Gitterzelle, wobei nur bewohnte Gebiete mit einem Wert über 0 % dargestellt sind. Besonders am Stadtrand ist die Interpretation vorsichtig vorzunehmen, da hier niedrige Bevölkerungsdichten zu einer größeren statistischen Schwankung führen können. Gebiete mit hoher Vulnerabilität konzentrieren sich vor allem in den nördlichen Stadtteilen Waldhäuser Ost, Sand und Wanne sowie auf Teile des Österbergs. Auch im südlichen Derendingen und in der Gartenstadt südlich des Neckars leben überdurchschnittlich viele ältere Menschen. Einzelne Pflegeheime, wie der Samariterstift Mühenviertel (Derendingen) oder das Luise-Poloni-Heim (Lustnau), sind ebenfalls klar erkennbar und vereinen hohe Vulnerabilität mit Exposition. Demgegenüber gibt es Gebiete mit geringer Vulnerabilität, darunter die dicht bebaute Altstadt, in der der Anteil älterer Menschen trotz hoher Bevölkerungsdichte gering bleibt. Ähnlich verhält es sich in Teilen der Südstadt, insbesondere im Französischen Viertel und Loretto-Viertel.

Nach der Gewichtung der drei Teilespekte (Formel 2) wurde das Hitzerisiko für beide Zeitpunkte berechnet und ist in Abbildung 7 für 2022 dargestellt. Auffällig ist, dass sehr hohes Risiko (> 0,8; dunkelviolett) nur auf sieben Zellen begrenzt ist, die fast ausschließlich Pflege- und Altenheime enthalten. Dies bestätigt die Zuverlässigkeit der Zensusdaten und unterstreicht die Relevanz dieser Einrichtungen für Anpas-

sungsmaßnahmen. Ein hohes Risiko (0,6 – 0,8) tritt dagegen großflächig auf, insbesondere in der Altstadt, großen Teilen Lustnau sowie in Feuerhägle, Derendingen und rund um den Sternplatz. In einigen Bereichen, wie der Altstadt, entsteht das hohe Risiko trotz niedriger Vulnerabilität durch eine Kombination aus hoher Bevölkerungsdichte und erhöhter Temperatur. Die nördlichen Stadtteile Waldhäuser Ost und Wanne weisen hohes bis moderates Risiko auf, während Sand aufgrund der Nähe zu Waldfächen nur moderates Risiko zeigt. Flächen mit moderatem Risiko finden sich in nahezu allen bewohnten Stadtgebieten und grenzen an Hochrisikobereiche. Geringes Risiko ist selten und meist in teilbebauten Gebieten mit hohem Grünflächenanteil oder in der Nähe von Gewässern zu finden.

Veränderung des Hitzerisikos durch den demographischen Wandel

Das divergierende Farbschema in Abbildung 8 zeigt die Veränderung des Hitzerisikos zwischen 2011 und 2022. Da für die Berechnung dieselbe Gefahrenkomponente (Oberflächentemperatur aus 2022) zugrunde gelegt wurde, zeigt sie nur die Effekte der Komponenten Exposition und Vulnerabilität, also Veränderungen in der Einwohner- und Altersstruktur in Tübingen in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Hitze. Dabei zeigen blaue Farben eine Zunahme, gelbe eine Abnahme des Hitzerisikos an. Zur besseren Lesbarkeit wurden Sie in drei positive und drei negative Klassen sowie eine neutrale Klasse eng um den Nullpunkt konzentriert eingeteilt. Eine starke Erhöhung des Hitzerisikos ist insbesondere in den neu bebauten Gebieten zu verzeichnen, also aufgrund einer deutlichen Steigerung der Exposition. Beispielsweise können hier das Gebiet der Alten Weberei in Lustnau oder des Alten Güterbahnhofs südlich des Österbergs genannt werden, wo unter anderem die Maximalwerte der Hitzerisikoänderung liegen. Es gibt jedoch auch Bereiche, in denen das Hitzerisiko im Vergleich zu 2011 gesunken ist, allerdings handelt es sich hierbei um stark vereinzelt vorkommende Zellen ohne größere räumliche Clusterung, die sich beispielsweise durch die Umgestaltung des Wohnraums (Verringerung der Exposition)

Abb. 6 Karte der Komponente „Vulnerabilität“

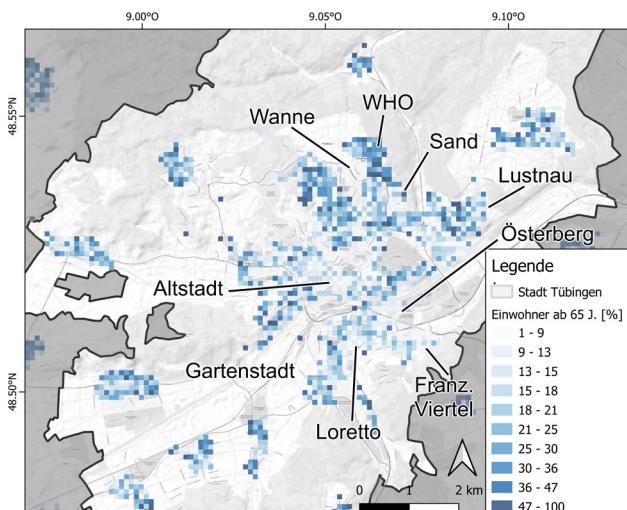


Abb. 7 Karte des Hitzerisikos für 2022

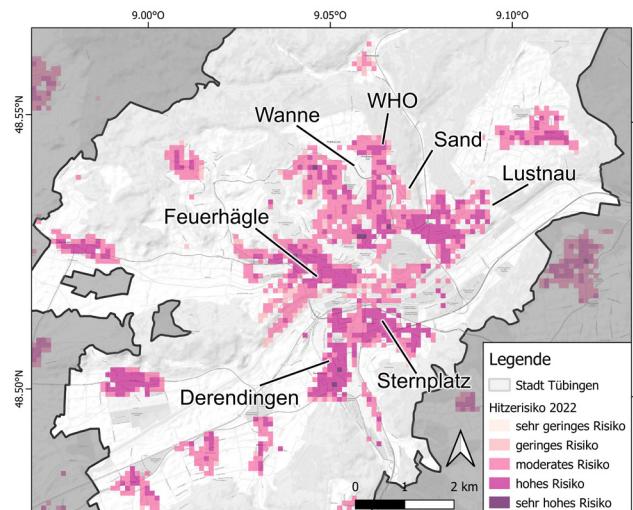
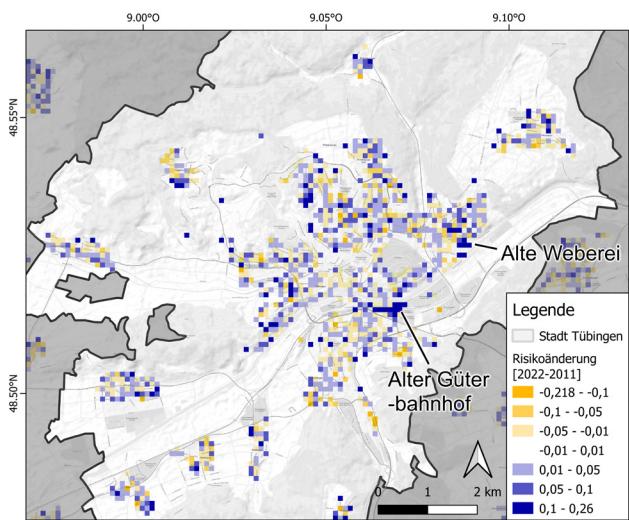


Abb. 8 Karte der Änderung des Hitzerrisikos zwischen 2011 und 2022



oder den Zuzug jüngerer Bevölkerungssteile bzw. das Ableben älterer Menschen (Verringerung der Vulnerabilität) erklären lassen. Wie jedoch in Abbildung 10 ersichtlich wird, unterliegen nur sehr wenige Bereiche in Tübingen einem Rückgang der absoluten Bevölkerung. Generell kann festgestellt werden, dass die Veränderung des Hitzerrisikos keinen klaren räumlichen Trends folgt, jedoch klare Hotspots erkennbar werden, an denen Anpassungsmaßnahmen ansetzen sollten.

Es konnten auch signifikante Veränderungen des Risikos in einigen Stadtgebieten Tübingens beobachtet werden. Die quantitative Analyse ergab insgesamt einen leichten Trend zu höheren Risikowerten, wie das Histogramm in Abbildung 9 zeigt. Dieses basiert auf der Farbgebung und Klasseneinteilung der Karte in Abbildung 8 und stellt die Häufigkeitsverteilung dar. Die Risiko-Änderung folgt einer Normalverteilung,

deren Mittelpunkt die Klasse der geringsten Veränderung (-0,01 bis +0,01) darstellt und 730 Zellen enthält. Außerhalb dieser neutralen Kategorie werden 1.428 Zellen mit negativer Veränderung (gelb) und 1826 Zellen mit positiver Veränderung (blau) verortet. Dieser Befund stützt die Annahme, dass das Hitzerrisiko in Tübingen in der Summe angestiegen ist. Diese Schlussfolgerung wird durch die Gegenüberstellung der kategorisierten Risikoklassen der Jahre 2011 und 2022 gestützt. Die Gegenüberstellung der beiden Zeiträume zeigt, dass sich die Anzahl der Zellen in den beiden extremen Klassen (sehr geringes bzw. sehr hohes Risiko) nicht verändert. Es ist jedoch eine verstärkte Migration von Zellen aus der Klasse „Mittel“ in die Klasse „Hoch“ zu beobachten, was einen Anstieg um rund 11 % (von 499 auf 554 Zellen) entspricht. Dieser Anstieg ist allein auf demografische Veränderungen zurückzuführen.

Diskussion

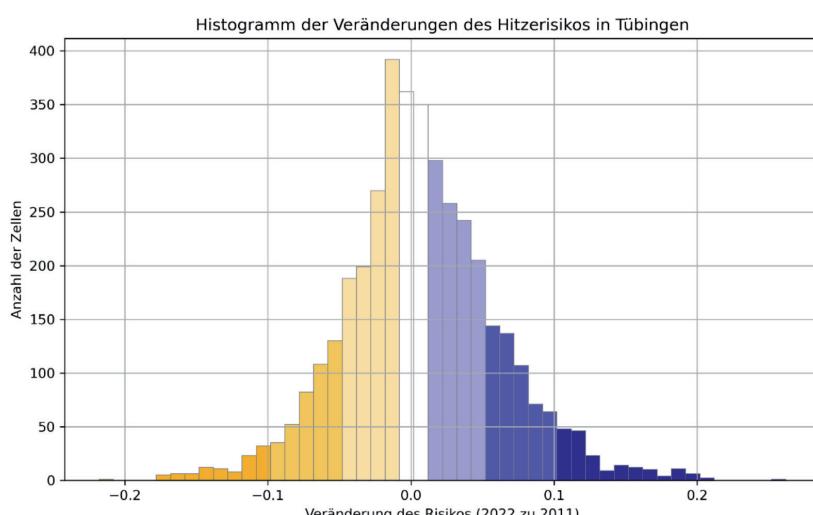
Methodische Kritik

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination von Zensus- und Satellitendaten ein zuverlässiger HERI berechnet werden kann, der räumliche und zeitliche Dynamiken in Städten erfasst. Dennoch gibt es methodische Aspekte, die berücksichtigt werden müssen.

Die Zensusdaten entsprechen höchsten Standards, unterliegen jedoch systematischen Einschränkungen, da nach §16 BStatG Zellen mit weniger als drei Personen nicht ausgewiesen werden. Dies betrifft hauptsächlich Randgebiete mit geringer Bevölkerungsdichte; es beeinflusst das Gesamtergebnis jedoch nur minimal. Entscheidend für diese Studie sind insbesondere die Zellen mit sehr hohem Risiko, die von diesen Einschränkungen nicht betroffen sind.

Die Normalisierung der Eingangsdaten anhand der 5 %- und 95 %-Perzentile gewährleistet eine robuste Skalierung, kann jedoch dazu führen, dass bestimmte Zellen früher als Hochrisikobereiche klassifiziert werden, was die Vergleich-

Abb. 9 Häufigkeitsverteilung der Veränderung des Risikos (2011 bis 2022) aller untersuchter Zellen im Stadtgebiet



Tab.1 Häufigkeit der Risiko-Klassen für die untersuchten Jahre

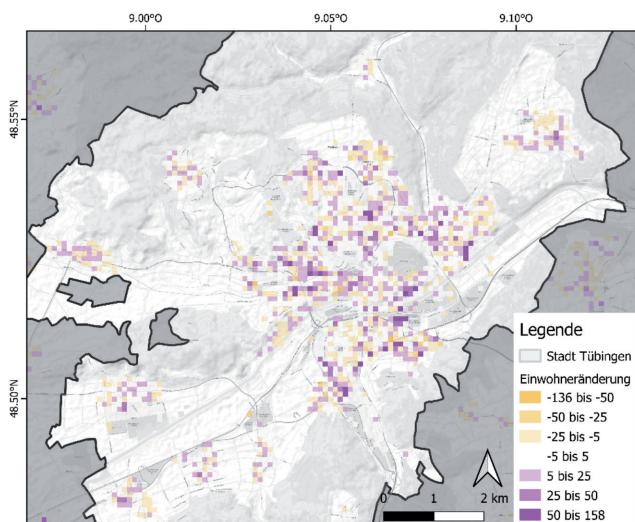
Risikoklasse	Jahr 2011	Jahr 2022
Sehr gering	0	0
Gering	77	87
Mittel	718	669
Hoch	499	554
Sehr hoch	7	7

barkeit mit anderen Studien einschränken könnte. Da beide Jahre nach der gleichen Methode berechnet wurden, bleibt die relative Verschiebung des Hitzerisikos jedoch erhalten.

Die Exposition wurde durch Bevölkerungsdichte modelliert, was sinnvoll ist, aber nicht berücksichtigt, dass sich der Aufenthaltsort der Menschen im Tagesverlauf verändert. Daten zu Pendel- und Freizeitverhalten könnten hier weitere Einblicke liefern, würden jedoch die Vergleichbarkeit zwischen den Jahren erschweren.

Die Variablengewichtung beeinflusst die Risikoberechnung erheblich. In manchen Stadtteilen zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen Bevölkerungsveränderung und Risikoentwicklung (Abbildung 10). Die gewählte Kombination aus Umwelt- und Bevölkerungsdaten hat sich als praktikabel erwiesen und erlaubt eine nachvollziehbare Differenzierung, ohne den Index unnötig zu verkomplizieren.

Abb. 10 Änderung der Komponente „Exposition“



Durch die genutzten Datenquellen und die angewandte Methodik bestehen kaum Limitationen in der Übertragbarkeit der Methode auf andere Städte. Je nach Stadtgröße und Lage kann eine Anpassung der Datenaggregation sinnvoll sein. Besonders in Megacitys oder anderen Klimazonen könnten zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden.

Da keine direkten Messdaten für die Fragestellung existieren, kann das Ergebnis nicht quantitativ validiert werden. Die räumlichen Muster und Statistiken aus Kapitel 3 unterstützen jedoch eine plausible Interpretation der Risikobewertung. Sehr hohes Risiko tritt ausschließlich in direkter Nähe von Pflegeeinrichtungen auf, wo Exposition und Vulnerabilität maximal sind. Die restlichen Risikokategorien verteilen sich erwartungsgemäß um diese Hotspots. Die statistischen Muster entsprechen weitgehend den Erkenntnissen anderer Studien (Morabito et al., 2015; Todeschi et al. 2022; Pappalardo et al., 2023), sodass keine systematischen Verzerrungen zu erwarten sind.

Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die zentralen Erkenntnisse dieser Arbeit liegen im hohen räumlichen Detailgrad sowie der quantifizierbaren Veränderung des Hitzerisikos im Stadtgebiet. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich gezielte Anpassungsmaßnahmen zur Reduzierung urbaner Hitzeinseln entwickeln. Diese senken nicht nur das Hitzerisiko, sondern können auch Energiekosten reduzieren und die Luftqualität verbessern (Akbari et al. 2016). Grünflächen spielen hierbei eine entscheidende Rolle: Eine Verdoppelung des Grünanteils von 15 auf 30 % kann Städte um 0,4 K abkühlen und die Zahl der hitzebedingten Todesfälle um ein Drittel senken (lungman et al. 2023). Besonders effektiv ist eine gezielte Begrünung in Hochrisikobereichen, wobei der Kronendurchmesser wichtiger für die Kühlwirkung ist als die Baumhöhe (Wang & Akbari 2016). In Tübingen bieten sich Dachbegrünungen an, insbesondere für Pflegeeinrichtungen, da sie eine zusätzliche Abkühlung um bis zu 1,5 K bewirken (Köhler & Kaiser 2019) und auch die Innenraumtemperatur um bis zu 3 K senken können (Marvuglia et al. 2020). Eine weitere Maßnahme ist die Verwendung reflektierender Materialien für Dächer und Straßenbeläge (Qin 2015). Allerdings sollte in Fußgängerzonen Begrünung bevorzugt werden, da stark reflektierende Oberflächen zwar die Lufttemperatur senken, aber den thermischen Komfort für Passanten reduzieren können (Taleghani 2018). Dennoch kann eine Erhöhung der Albedo - dem Anteil des Lichts, der von einer Oberfläche reflektiert wird - großflächig eine Temperaturreduktion um bis zu 2 K bewirken (Morini et al. 2016). Klimaanlagen sind aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs keine nachhaltige Lösung. Sie verstärken vielmehr den Hitzeinseleffekt und tragen nicht zur Verbesserung der Außenbedingungen bei, sondern wirken bei übermäßiger Nutzung eher kontraproduktiv, da sie die physiologische Anpassungsfähigkeit des Körpers an Hitze verhindern (Jay et al. 2021).

Ausblick

Die dargestellten Veränderungen des Hitzerisikos durch den demografischen Wandel und einen allgemeinen Bevölkerungszuwachs lassen darauf schließen, dass sich die Situation ohne Umsetzung von Gegenmaßnahmen im Zuge des Klimawandels zukünftig weiter verschärfen wird, da sowohl die Komponente der Gefahr (steigende Temperaturen) als auch die der Exposition (Verdichtung) und Vulnerabilität (Gesundheitszustand und Überalterung der Bevölkerung) weiter zunehmen. Auf Basis der demografischen Veränderung zwischen 2011 und 2022 konnten keine neuen räumlichen Hotspots des Hitzerisikos identifiziert werden, jedoch wäre die vorgestellte Methodik bei gegebener Datenlage (z.B. bei Entstehen neuer altersgerechter Wohnungen mit hohem Anteil an über 65-Jährigen) dazu imstande, derartige Verschiebungen aufzudecken. Eine Voraussetzung dafür ist, dass Zensusdaten auch in Zukunft mit den bisherigen kompatibel bereitgestellt werden. Das betrifft sowohl die räumliche Aggregation in der gegenwärtigen Gitterstruktur als auch die inhaltliche Kategorie der über 65-Jährigen.

Eine vielversprechende Option für zukünftige Forschung ist eine umfassendere Zeitserienanalyse des Tübinger Stadtgebiets. Zukünftige Studien können die Erkenntnisse dieser Arbeit unter Berücksichtigung von längeren Zeitreihen aus-

bauen sowie gegebenenfalls auch Prognosen für zukünftige Jahre treffen. Allerdings müssen dabei die Qualität und Vergleichbarkeit der verwendeten Daten gewährleistet bzw. durch einen strengen Kriterienkatalog sichergestellt werden. Darüber hinaus berücksichtigen die vorgestellten Ergebnisse nur die Hitze während des Tages am Wohnort der Menschen, sodass zukünftige Analysen die nächtliche Abkühlung, die Wohnsituation und das Mobilitätsverhalten der Menschen während des Tages berücksichtigen könnten. Dies würde neue Fragestellungen eröffnen, beispielsweise eine Unterscheidung zwischen dem Risiko am Arbeitsplatz und dem Risiko am Wohnort.

Um die kleinräumigen Variationen der Hitzeinseln besser erfassen zu können oder die Planung und Umsetzung von Maßnahmen für bestimmte Problembereiche zu begleiten, werden auch technologische Fortschritte in der Sensorik der satellitengestützten Erdbeobachtung eine Verbesserung der Datengrundlage bringen, beispielsweise durch die im Januar 2025 gestartete HiVE-Mission (constellr), welche die räumliche Auflösung von Thermaldaten um den Faktor vier erhöhen wird (Spengler et al. 2024).

Zuletzt soll auch die Wahl der räumlichen Analyseeinheit gut überlegt sein, da die regelhafte Einteilung des Stadtgebiets in Zellen zwar eine objektive Beschreibung der Verhältnisse ermöglicht, lokalklimatische Unterschiede jedoch eventuell besser auf dem Maßstab der Baublöcke oder Quartiere untersucht werden können, die eine einheitliche morphologische Struktur aufweisen und sich mit auf dieser Einheit erhobenen Statistiken zusammenführen lassen (Braun et al. 2023). Die Gitterstruktur der amtlichen Zensusdaten bringt aber grundsätzlich große Flexibilität, was Integration weiterer Geodaten und Bevölkerungsprognosen betrifft (Pötsch 2016).

Schlussfolgerungen

Die Studie zeigt, dass anhand präziser Zensusdaten ein umfassenderes Verständnis des Risikos durch die urbane Hitzeeinsel gewonnen werden kann, welches die sozialräumlichen Strukturen innerhalb einer Stadt berücksichtigt. Dies erfolgte durch die konzeptionelle Zerlegung in Gefahr, Exposition und Vulnerabilität, die nicht nur eine räumliche Differenzierung des Hitzerisikos ermöglichen, anhand derer effektive und passgenaue Lösungen im Umgang mit Hitze erarbeitet werden können, sondern auch eine Betrachtung seiner zeitlichen Veränderung. Durch die frei zugänglichen Eingangsdaten ist die entwickelte Methodik auf andere Städte oder zukünftige Szenarien ausweitbar, solange die räumliche Zonierung in Zellen von 100 m Kantenlänge dafür ausreicht. Die Anwendung für die Stadt Tübingen zeigte plausible Ergebnisse, die durch die gegebene Topographie, die bauliche Struktur, naturräumliche Einheiten und soziodemographische Muster erklärbare werden, gleichzeitig aber eine quantitative Grundlage für die Entwicklung von Maßnahmen und das Monitoring ihres Erfolgs liefern. Die Bewertung des Hitzerisikos anhand des Heat-Related Elderly Risk Index ergab ein sehr hohes Risiko ausschließlich für Bereiche mit Pflegeheimen und ein hohes Risiko für große zentrale Bereiche im gesamten Stadtgebiet verteilt. Bei zu treffenden Gegenmaßnahmen kann daher eine Priorisierung auf Basis der quantitativen Risiko-Werte vorgenommen werden. Darüber hinaus lässt sich die Methodik ohne größere Modifikationen auf andere vergleichbare Städte übertragen.

Zusätzliche Materialien

Eine digitale Version der Karte ist unter folgender Adresse aufrufbar: <https://uni-tuebingen.de/de/284016>

Literatur

- An Der Heiden, M., Muther, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L., Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt*, 62, S. 571–579.
- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., Wong, N.H., Zinzi, M. (2016): Local climate change and urban heat island mitigation techniques - the state of the art. *Journal of civil engineering and management*, 22(1), S. 1–16.
- Carter, J.G., Cavan, G., Connelly, A., Guy, S., Handley, J., Kazmierczak, A. (2015): Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. *Progress in Planning*, 95, S. 1–66.
- Chambers, J. (2020): Global and cross-country analysis of exposure of vulnerable populations to heatwaves from 1980 to 2018. *Climatic Change*, 42(10), S. 539–558.
- Dieckhoff, V.S., Becker, D., Wiechmann, T., Greiving, S. (2018): Raummustertypen: Demographischer Wandel und Klimawandel in deutschen Städten. *Raumforschung und Raumordnung*, 76(3), S. 211–228.
- Hoeckner, H., Stecking, M., Singer-Posern, S. (2020): KLIMPRAX Stadtclima: Ansätze für eine hitzeangepasste Stadtplanung. *Public Health Forum*, 28, (1), S. 50–53.
- Jungman, T., Cirach, M., Marando, F., Pereira Barboza, E., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparri, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M., Nieuwenhuijsen, M. (2023): Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment of European cities. *The Lancet*, 401(10376), S. 577–589.
- Jay, O., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Sari Kovats, R., Ma, W., Malik, A., Morris, N.B., Nybo, L., Seneviratne, S.I., Vanos, J., Ebi, K.L. (2021): Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. *The Lancet*, 398(10301), S. 709–724.
- Kang, S., Lee, D., Park, J., Jung, J. (2022): Exploring Urban Forms Vulnerable to Urban Heat Islands: A Multiscale Analysis. *Sustainability*, 14(6).
- Köhler, M., Kaiser, D. (2019): Evidence of the Climate Mitigation Effect of Green Roofs – A 20-Year Weather Study on an Extensive Green Roof (EGR) in Northeast Germany. *Buildings*, 9(7), S. 157.
- LUBW (2025): Klimaatlas. Kompetenzzentrum Klimawandel der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). Verfügbar unter: <https://www.klimaatlas-bw.de> (15.02.2025).
- Marvuglia, A., Koppelaar, R., Rugani, B. (2020): The effect of green roofs on the reduction of mortality due to heatwaves: Results from the application of a spatial microsimulation model to four European cities. *Ecological Modelling*, 438.
- Mehra, S.-R. (2021): Stadtbauphysik – Grundlagen klima- und umweltgerechter Städte. Springer, Heidelberg.
- Morabito, M., Crisci, A., Gioli, B., Gualtieri, G., Toscano, P., Di Stefano, V., Orlandini, S., Gensini, G.F. (2015): Urban-Hazard Risk Analysis:

- Mapping of Heat-Related Risks in the Elderly in Major Italian Cities. *PLOS ONE*, 10(5), S. 1–18.
- Morini, E., Toucheai, A., Castellani, B., Rossi, F., Cotana, F. (2016): The Impact of Albedo Increase to Mitigate the Urban Heat Island in Terni (Italy) Using the WRF Model. *Sustainability*, 8(10).
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Nikolopoulos, G.K., Katavoutas, G., Asimakopoulos, D.N. (2008): Evaluation of thermal discomfort in Athens territory and its effect on the daily number of recorded patients at hospitals' emergency rooms. *International Journal of Biometeorology*, 52(8), S. 773–778.
- Pappalardo, S.E., Zanetti, C., Todeschi, V. (2023): Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies. *Landscape and Urban Planning*, 238.
- Pötzsch, O. (2016): Demographische Prozesse, Bevölkerungsstruktur und -entwicklung in Deutschland. In: Niephaus, Y., Kreyenfeld, M., Sackmann, R. (Hrsg.) Handbuch Bevölkerungssoziologie. Springer Nachschlagewissen, Wiesbaden.
- Qin, Y. (2015): A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, S. 445–459.
- Rosner, H.-J., H. Eck (2025): Der Tübinger Raum im Klimawandel. Entwicklung, Projektionen, Szenarien. *Tübinger Blätter*, 111, S. 85–89.
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., Koliokotsa, D. (2015): On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – A review. *Energy and Buildings*, 98, S. 119–124.
- Sarofim, M.C., Saha, S., Hawkins, M.D., Mills, D.M., Hess, J., Horton, R., Kinney, P., Schwartz, J., St. Juliana, A. (2016): Temperature-related death and illness. *The impacts of climate change on human health in the United States – A scientific assessment*, S. 43–68.
- Spengler, D., Ibrahim, E., Chamberland, N., Pregel Hoderlein, A., Berhin, J., Zhang, T., Taymans, M. (2024): Monitoring land surface temperature from space-constellr HiVE-new perspectives for environmental monitoring. EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-21514, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-21514>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2015): Zensus 2011 – Methoden und Verfahren. Wiesbaden. Verfügbar unter: <https://www.zensus2011.de/SharedDocs/>
- Downloads/DE/-Publikationen/Aufsaetze_Archiv/2015_06_MethodenUndVerfahren.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (26.02.2025).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2025): Ergebnisse des Zensus 2022. Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0. Verfügbar unter: <https://www.zensus2022.de> (26.02.2025).
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2024): Gemeindegebiet, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte der Universitätsstadt Tübingen seit 1961. Verfügbar unter: <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Bevoelkerung/01515020.tab?R=GS416041> (26.02.2025).
- Taleghani, M. (2018): Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), S. 2011–2018.
- Todeschi, V., Pappalardo, S.E., Zanetti, C., Peroni, F., De Marchi, M. (2022): Climate Justice in the City: Mapping Heat-Related Risk for Climate Change Mitigation of the Urban and Peri-Urban Area of Padua (Italy). *International Journal of Geo-Information*, 11(9).
- UNDRR (2019): Global Assessment Report (GAR). Genf. Verfügbar unter: <https://gar.unisdr.org/report-2019> (26.01.2025).