Thermische Belastung von Bewohnern in Städten bei Hitzewellen am Beispiel von Freiburg (Breisgau)

Einleitung

Hitze und Hitzewellen belasten das Wohlbefinden, erhöhen den Hitzestress bei Menschen und sind auch für eine Erhöhung der Morbiditäts- und Mortalitätsraten, insbesondere von älteren Menschen über 75 Jahren mit Vorerkrankungen und Pflegebedürftigkeit, verantwortlich. Die negativen gesundheitlichen Folgen von Hitzewellen sind in den Sterbedaten für zahlreiche Länder nachgewiesen worden [1] und auch für Deutschland gut untersucht [2–4].

Während der bekannten Hitzewelle im Sommer 2003, die Anfang August große Teile West- und Mitteleuropas getroffen hat, ergaben Schätzungen in Deutschland rund 7600 zusätzliche Todesfälle [3] und für Europa über 60.000 [5]. Zusätzlich zu den Mortalitätsdaten ist der negative Einfluss von Hitzewellen auch aus anderen Daten des Gesundheitssystems (Krankenhausweisungen, Notarzteinsätze etc.) gut ersichtlich [6–8].

Durch den menschlichen Einfluss auf das Klimasystem hat sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von extremen Temperaturen wie im Jahr 2003 in Europa deutlich vergrößert [9]. Nach Aussagen des Weltklimarates und wissenschaftlichen Untersuchungen wird in den nächsten Dekaden durch den Klimawandel die Zahl von Hitzewellen in Deutschland zunehmen [10]. 6 der 11 extremsten Hitzewellen im Zeitraum zwischen 1950 bis 2015 sind in den Jahren nach dem Jahr 2000 aufgetreten [11]. Infolge des Klimawandels wird außerdem erwartet, dass neben

der zunehmenden Anzahl von Hitzewellen auch die Dauer und insbesondere die Intensität von Hitzewellen sowie die hitzebedingte Mortalität zunehmen werden [2, 8, 12]. Aus diesem Grund werden Auswirkungen von Hitze auf die menschliche Gesundheit in Zeiten des Klimawandels extrem bedeutsam.

Von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) wurden Empfehlungen zu „Hitzeaktionsplänen“ herausgegeben, die hitzebedingte Gesundheitsschäden durch umfassende Aktivitäten auf verschiedenen Ebenen vermeiden sollen. Als ein Instrument zur Vermeidung bzw. Minimierung von negativen Auswirkungen von Hitze auf die menschliche Gesundheit werden Hitzewarnsysteme genannt [13, 14]. Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ist seit 2005 operationell im Einsatz und bietet durch Hitzewarnungen und Vorabinformationen u. a. Pflegeeinrichtungen und Krankenhäusern, aber auch der allgemeinen Bevölkerung die Möglichkeit, präventive Maßnahmen einzuleiten [15]. Die Hitzewarnungen und Vorabinformationen sind über die Warnkarte auf der Webseite des DWD (www.dwd.de), über die Warnwetter-App, die Gesundheitswetter-App oder per E-Mail-Newsletter abrufbar bzw. erhältlich. Empfehlungen für Verhaltensmaßnahmen bei Hitze-krämpfen, Hitzeerschöpfung, Hitzekollaps oder Hitzschlag können zudem aus [16] entnommen werden.

Hitzewellen sind Zeiträume mit ungewöhnlich hohen Temperaturen und fehlender nächtlicher Abkühlung, die mehrere Tage andauern können. Eine einheit-

liche Definition von Hitzewellen existiert nicht und ist aufgrund der Komplexität und der unterschiedlichen Anforderungen an eine Definition kaum möglich [17]. Häufig wird ein Schwellenwert für die Temperatur und die minimale Dauer festgelegt. Verwendung finden dabei nicht nur absolute, sondern auch relative Schwellenwerte, da relative Schwellenwerte aufgrund der Anpassung des Menschen an das lokale Klima besser für den Vergleich zwischen verschiedenen Ländern geeignet sind [3].

Bei der Betrachtung der Auswirkung von Hitze auf Menschen besitzen Städte eine Sonderstellung. Da Städte insgesamt wärmer als das Umland sind (urbane Wärmeinsel), kann man behaupten, dass Menschen in Städten schon jetzt den anthropogenen Klimawandel erleben [18]. Durch die hohe Dichte an Menschen in Städten und durch das Stadtklima sind Bewohner von Städten zusätzlichen thermischen Belastungen bzw. einer erhöhten Wärmebelastung ausgesetzt. Hitzewellen sind folglich für Stadtbewohner belastender als für Bewohner auf dem Land. Zudem nimmt die Anzahl der in Ballungsgebieten lebenden Menschen zu und die damit verbundene stärkere Urbanisierung von natürlichen Landoberflächen führt zum Anwachsen der Risikogruppe [19]. Ende 2017 lebten in Deutschland bereits 77 % der Bevölkerung in dicht und mittelstark besiedeltem Gebiet [20]. Weltweit leben mehr als die Hälfte der Bevölkerung in städtischen Gebieten [21].

In diesem Beitrag werden exemplarisch für die südlichste Großstadt Deutschlands (Freiburg im Breisgau)

die im Jahr 2019 aufgetretenen Hitzewellen analysiert sowie die Hitzewellen in der ländlichen Umgebung der Stadt. Betrachtet werden Gefühlte Temperaturen im Vergleich zu Messungen der Lufttemperatur sowie die im Hitzewarnsystem modellierten Innenraumtemperaturen. Die Häufigkeit des Auftretens von bestimmten Klassen der Gefühlten Temperatur sowie der Lufttemperatur werden zudem im gesamten Jahresverlauf betrachtet.

Das Jahr 2019 war in Deutschland das drittwärmste seit Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnungen 1881. Im Vergleich zu 2003 (19,7°C) und 2018 (19,3°C) lag der Sommer 2019 mit einem Temperaturdurchschnitt von 19,2°C um 2,9°C über dem Wert der international gültigen Referenzperiode 1961 bis 1990. Der Juni 2019 war sogar der wärmste und sonnigste seit Messbeginn. In der letzten Julidekade 2019 zog Hoch „Yvonne“ von Frankreich über Deutschland nach Nordeuropa. Dadurch floss an dessen Westflanke sehr heiße Luft aus Nordafrika nach Skandinavien und ermöglichte zusammen mit der langen astronomisch möglichen Sonnenscheindauer, einer nahezu ungehinderten Einstrahlung und trockenen Böden, dass die Tageshöchsttemperaturen an mehreren Stationen in Deutschland über 40°C erreichten. Bisher traten Temperaturen über 40°C in Deutschland äußerst selten und regional nur sehr begrenzt auf. Der bisherige Deutschlandrekord von 40,3°C aus dem Jahr 2015 wurde an 14 Messstationen, vor allem im Westen Deutschlands, gebrochen. Das gemessene Lufttemperaturmaximum in Deutschland beträgt seitdem 42,6°C [15]. Mit dieser Intensität hat die Hitze alle bisherigen Sommer übertraffen. Außergewöhnlich war außerdem das Überschreiten der 40°C-Schwelle an drei aufeinanderfolgenden Tagen.

Im Folgenden werden zunächst die besonderen Bedingungen in Städten und der Wärmeinseleffekt erläutert. Anschließend werden anhand der Methoden (Messungen der Lufttemperatur und berechnete Gefühlte Temperatur sowie Tage mit Hitzewarnungen und modellierter Innenraumtemperatur des Hitzewarnsystems des DWD) Ergebnisse zum thermischen Empfinden von

Bewohnern in der Stadt und auf dem Land abgeleitet. Als Vergleich wird die Lufttemperatur der Gefühlten Temperatur gegenübergestellt. Zusätzlich werden die während des untersuchten Zeitraums aufgetretenen Hitzewarnungen und die im Hitzewarnsystem (HWS) modellierte Innenraumtemperatur ergänzend dargestellt. Abschließend erfolgt nach der Diskussion der Ergebnisse das Fazit.

Besondere Bedingungen in Städten und Wärmeinseleffekt

Als Stadtklima wird das durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifizierte Klima bezeichnet [22]. Das bekannteste Phänomen des Stadtklimas ist der sogenannte städtische Wärmeinseleffekt (Urban Heat Island Effect, UHI). Die städtische Wärmeinsel beschreibt die vor allem nachts höheren Luft- und Oberflächentemperaturen in Städten im Vergleich zum ländlichen Umland. Die höheren Temperaturen entstehen durch die tagsüber aufgeheizten Gebäude, die ihre Wärme nachts wieder abgeben und somit die nächtliche Abkühlung reduzieren. Je größer die Stadt bzw. je größer der Gebäudeanteil und der Versiegelungsgrad in der Stadt ist, desto größer ist der UHI-Effekt. Ländliche Regionen erwärmen sich nicht so schnell, da Wasser-, Grünflächen oder auch Bäume mehr Wärme aufnehmen können als Baumaterialien wie Beton, Metall, Glas oder Ziegel [23]. Neben der Modifizierung des Wärmehaushalts wird durch die stärkere Versiegelung innerhalb einer Stadt auch der Wasserhaushalt beeinflusst. Die Baustruktur, Bauhöhe und Anordnung von Bauwerken haben Auswirkungen auf die Belüftung der Stadt und die Materialeigenschaften wirken sich auf die Reflexion der solaren Strahlung aus. Mehrfachreflexionen von kurzwelliger Strahlung zwischen den Gebäuden führen zu einer größeren Absorption kurzwelliger Strahlung. Die Luftverunreinigungen durch Verbrennungsprozesse wie Verkehr, Industrie oder evtl. Hausbrände rufen außerdem eine größere atmosphärische Gegenstrahlung hervor und die größere Horizonteinengung

in einer Stadt bewirkt gleichzeitig eine geringere effektive Ausstrahlung. Alle diese Merkmale einer Stadt modifizieren das lokale Klima und führen zur Ausprägung eines Stadtklimas, welches sich vom lokalen Klima in der ländlichen Umgebung unterscheidet [22]. Stadtflächen weltweit beanspruchen derzeit 3 % der Erdoberfläche, emittieren aber ca. 75 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes [24].

Methoden

Das thermische Empfinden des Menschen kann mithilfe der Gefühlten Temperatur charakterisiert werden. Diese berücksichtigt neben der Lufttemperatur und weiteren meteorologischen Größen auch physiologische Parameter. Dadurch eignet sich die Gefühlte Temperatur besser, um die thermoregulatorischen Anforderungen an den menschlichen Organismus abzubilden, als die Lufttemperatur allein. Der Mensch besitzt keine Sensoren für die Lufttemperatur, sondern spürt nur die Wärmemenge, die dem Körper über die Haut entzogen wird. Diese entzogene Wärmemenge ist bei Auftreten von Wind deutlich höher als ohne. Ein weiteres Beispiel sind feuchtwarme Bedingungen im Vergleich zu trockenwarmen Bedingungen. Letztere werden als deutlich angenehmer empfunden, da diese die kühlende Wirkung durch das Verdunsten von Schweiß auf der Haut erleichtern.

Der DWD verwendet das Klima-Michel-Modell (KMM), um die Gefühlte Temperatur zu berechnen. Das KMM ist ein Energiebilanz- bzw. Wärmehaushaltsmodell des Menschen und eignet sich dazu, das thermische Empfinden des Menschen zu charakterisieren, indem es die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit und lang- und kurzwellige Strahlungsflüsse verknüpft sowie alle relevanten Mechanismen des Wärmeaustausches für einen vorgegebenen Modellmenschen (35 Jahre, 1,75 m, 75 kg) mit einer bestimmten Aktivität ($\hat{=}$ Gehen mit 4 km/h) und einer an die aktuelle thermische Situation angepassten Bekleidung berücksichtigt [25, 26]. Das Ergebnis des Modells, die Gefühlte Temperatur, bildet die thermo-

Bundesgesundheitsbl 2020 · 63:1004–1012 <https://doi.org/10.1007/s00103-020-03181-0>
© Der/die Autor(en) 2020

A. Matzarakis · S. Muthers · K. Graw

Thermische Belastung von Bewohnern in Städten bei Hitzewellen am Beispiel von Freiburg (Breisgau)

Zusammenfassung

Hintergrund. Menschen sind im Zuge des Klimawandels immer stärker von Hitze und deren negativen gesundheitlichen Auswirkungen betroffen. Oftmals wird die Lufttemperatur als Maßzahl verwendet. Um jedoch Auswirkungen von Hitze auf den Menschen zu charakterisieren, müssen neben der Lufttemperatur weitere Faktoren berücksichtigt werden.

Ziel der Arbeit. Ziel dieses Beitrags ist es, den Hitzestress von Bewohnern in Städten mithilfe der Gefühlten Temperatur während Hitzewellen zu charakterisieren und mit derjenigen von Bewohnern auf dem Land zu vergleichen sowie Unterschiede zur Lufttemperatur hervorzuheben.

Material und Methoden. Daten der Stadtstation Freiburg und der Station

Freiburg-Flugplatz für 2019 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden für die Analyse der Lufttemperatur sowie für die Berechnung der Gefühlten Temperatur mithilfe des Klima-Michel-Modells für Freiburg verwendet. Zusätzlich werden die Hitzewarntage für Freiburg dargestellt und die nächtlichen Bedingungen der Innenraumtemperaturen des Hitzewarnsystems analysiert.

Ergebnisse und Diskussion. Die Gefühlte Temperatur übersteigt die Lufttemperatur während Hitzewellen um bis zu 10 °C. Während der klassische Wärmeinseleffekt anhand der Differenz der nächtlichen Lufttemperatur hoch und tagsüber gering ist, ist bei der Gefühlten Temperatur die Differenz nicht nur nachts, sondern auch tagsüber deutlich höher.

Fazit. Um negative Auswirkungen zu quantifizieren, wird nicht nur die Lufttemperatur benötigt, sondern auch die Kenntnis über weitere Faktoren, die den Hitzestress beschreiben und steuern. Stadt-Land-Unterschiede bei Lufttemperatur und Gefühlter Temperatur bilden eine gute Möglichkeit der Quantifizierung von Hitze. Anpassungsmaßnahmen in Städten unter Berücksichtigung des Hitzestresses für Menschen sind notwendig.

Schlüsselwörter

Hitze · Thermische Belastung · Gesundheit · Städte · Gefühlte Temperatur

Thermal stress of urban dwellers during heat waves using the example of Freiburg (Breisgau)

Abstract

Background. As a result of climate change, people are increasingly affected by heat and the negative health effects of heat. Air temperature is often used as a measurement. However, in order to characterize the effects of heat on humans, other factors must be considered in addition to air temperature.

Objectives. The aim of this paper is to characterize the thermal stress of urban dwellers by means of the perceived temperature during heat waves, compare it with rural dwellers, and highlight differences from air temperature.

Materials and methods. Data from the year 2019 are used from two different German Weather Service (DWD) stations located

within the city of Freiburg im Breisgau, Germany, and its surroundings (Freiburg Airport). Air temperature as well as other meteorological elements were taken to calculate the perceived temperature by means of the Klima-Michel model. Additionally, days with heat warnings as well as nightly indoor temperatures from the heat health warning system are presented.

Results. The perceived temperature exceeds the air temperature during heat waves by up to 10 °C. The classic heat-island effect is particularly evident in the difference in the nightly air temperature while the difference in the daily air temperature is small. In the case of perceived temperature, the difference is

significantly higher not only at night but also during the day.

Conclusions. In order to quantify negative impacts, not only the knowledge of air temperature is required, but also other factors that describe and control the thermal stress on humans. Urban-rural differences in air temperature and perceived temperature enable heat quantification. Adaptation measures taking into account the more intense conditions in cities are necessary.

Keywords

Heat · Thermal stress · Health · Cities · Perceived temperature

regulatorischen Anforderungen an den menschlichen Organismus ab, die über die Lufttemperatur allein nicht dargestellt werden können. Liegt die Gefühlte Temperatur im Bereich von 0 °C bis 20 °C ist mit entsprechend angepasster Bekleidung thermischer Komfort möglich. Ab einer Gefühlten Temperatur von 32 °C tritt dagegen starke bzw. ab einer Gefühlten Temperatur von 38 °C extreme Wärmebelastung auf (■ Tab. 1; [27]).

Im Hitzewarnsystem des DWD erfolgt ab einer Gefühlten Temperatur von 38 °C

eine Hitzewarnung der Stufe 2 (Warnung vor extremer Wärmebelastung). Die Gefühlte Temperatur wird dabei auf Basis der numerischen Wettervorhersage des DWD berechnet, die die meteorologischen Eingangsparameter liefert. Aus diesen sowie den standardisierten Angaben des Modellmenschen werden Gefühlte Temperaturen auf Landkreisebene für jede Höhenlage Deutschlands prognostiziert. Für eine Hitzewarnung der Stufe 1 (Warnung vor starker Wärmebelastung) müssen mehrere Kriterien erfüllt sein. Zum einen muss ein zeitlich

und örtlich variabler Schwellenwert der prognostizierten Gefühlten Temperatur überschritten werden. Dieser variiert um eine Gefühlte Temperatur von 32 °C, um die Akklimatisation des Menschen ortsspezifisch zu berücksichtigen [29]. Je wärmer es in den vergangenen 4 Wochen war, desto höher ist der Schwellenwert, der am jeweiligen Ort (Landkreismittelpunkt) erreicht werden muss. Maximal kann der Schwellenwert auf bis zu 34 °C Gefühlte Temperatur ansteigen. Die Akklimatisation ist als Reihe von physiologischen Anpassungen definiert, welche sich

Tab. 1 Gefühlte Temperatur (GT), thermisches Empfinden und Belastungsstufe (verändert nach: [28])

GT (°C)	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe
≥38	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung
32 bis <38	Heiß	Starke Wärmebelastung
26 bis <32	Warm	Mäßige Wärmebelastung
20 bis <26	Leicht warm	Leichte Wärmebelastung
>0 bis <20	Behaglich	Kein thermischer Stress
>-13 bis 0	Leicht kühl	Leichter Kältestress
>-26 bis -13	Kühl	Mäßiger Kältestress
>-39 bis -26	Kalt	Starker Kältestress
≤-39	Sehr kalt	Extremer Kältestress

nach einer andauernden Hitzeexposition (Kälteexposition) von einigen Tagen einstellen und die Intensität der Wärmebelastung (des Kältestresses) in heißer (kalter) Umgebung verringern. Der Vorgang der Akklimatisation beruht daher auf einer Ökonomisierung der Thermoregulationsmechanismen [29]. Der variable Schwellenwert muss für eine Hitzewarnung der Stufe 1 an mindestens 2 aufeinanderfolgenden Tagen erreicht werden und eine nächtliche Abkühlung sollte nicht gewährleistet sein. Dadurch wird berücksichtigt, dass Hitze besonders belastend ist, wenn die Erholung des Körpers während der nächtlichen Ruhephase gestört ist. Die Berücksichtigung im Hitzewarnsystem erfolgt mithilfe einer modellierten Innenraumtemperatur, die für eine Hitzewarnung der Stufe 1 einen ortsabhängigen Schwellenwert nicht überschreiten sollte.

Für die Berechnung der thermischen Bedingungen im Innenraum wird ein Wohngebäude angenommen, das in den 1970er Jahren gebaut und bereits saniert wurde [30]. Es wird jeweils der höhere Wert eines nach Osten und eines nach Westen orientierten Raumes verwendet. Im Raum ist eine Person anwesend. Diese öffnet ein Fenster immer dann, wenn es außen kühler ist als innen. Für die Fensteröffnung wird ein Querschnitt von 0,5 m² angenommen. Dies entspricht einem kleinen komplett geöffneten Fenster oder einem großen halb geöffneten Fenster. Sobald die Sonne auf das Fenster scheint, schließt die Person eine innenliegende Gardine, sodass noch 35 % der Sonnenstrahlung in den Raum eindringen. Für die Hitzewarnungen wird die

vom Innenraummodell berechnete operative Raumtemperatur verwendet. Diese lässt sich aus dem Mittelwert von Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur im Innenraum bestimmen. Als Basis zur Bestimmung der ortsabhängigen Schwellenwerte für den Innenraum dient der nächtliche 7-Stunden-Mittelwert (22:30 bis 5:30). Ausgewertet wurden hierfür die nächtlichen Mittelwerte in den Sommern (JJA = Juni, Juli und August) 2011 und 2012. Im Westen und Südwesten Deutschlands wird eine Hitzewarnung herausgegeben, wenn die Innenraumtemperatur in der Nacht mindestens 25 °C beträgt. Zusätzlich zu den Hitzewarnungen der Stufe 1 und 2 werden Bewohner in Städten und ältere Menschen bei den Hitzewarnungen besonders berücksichtigt, indem der Wärmeinseleffekt von Städten einbezogen wird [31] sowie indem einbezogen wird, dass ältere Menschen bereits ab 36 °C statt ab 38 °C Gefühlter Temperatur an extremer Wärmebelastung leiden [15].

Datengrundlage

Als Datengrundlage in diesem Beitrag dienen die meteorologischen Messdaten des Deutschen Wetterdienstes an den Stationen Freiburg-Stadt und Freiburg-Flugplatz mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min für das Jahr 2019. Aus diesen wurden die mittlere Strahlungstemperatur (T_{mrt}) und die Gefühlte Temperatur berechnet. Die täglichen Maximum- und Minimumlufttemperaturen sowie die Werte der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur und der Gefühlten Temperatur zu 12 UTC (Coordinated

Universal Time, früher Greenwich Mean Time, UTC +2 h = MESZ) wurden extrahiert und in den Ergebnissen als Dekadenhäufigkeiten im Jahresverlauf (Separation der Monate in 3 Abschnitte jeweils bestehend aus etwa 10 Tagen) sowie als Zeitreihe für die Sommermonate dargestellt. Zum anderen werden die aus dem Jahr 2019 stammenden Tage mit Hitzewarnungen verwendet, die auf Basis des Hitzewarnsystems des DWD für den Kreis Freiburg herausgegeben wurden. Dabei wird nicht zwischen Hitzewarnungen der Stufe 1 oder 2 unterschieden. Die Hitzewarnungen sind im Ergebnisteil farblich (orange) hinterlegt und sollen die Tage mit Hitzewarnungen hervorheben. Dabei ist zu beachten, dass in die Hitzewarnungen die auf Basis der numerischen Wettervorhersage prognostizierte Gefühlte Temperatur eingegangen ist, während die dargestellte Zeitreihe der Gefühlten Temperatur auf Basis der Messdaten der Stadtstation in Freiburg berechnet wurde. Betrachtet wird insbesondere der Zeitraum 01.06.–31.08.2019, währenddessen in Freiburg 5 Perioden mit Hitzewarnungen auftraten. Außerdem werden die vom Hitzewarnsystem modellierten Innenraumtemperaturen dargestellt.

Ergebnisse

Der Jahresverlauf der Lufttemperatur der Stadt Freiburg für das Jahr 2019 ist in **Abb. 1** in Form von Dekadenhäufigkeiten der Lufttemperatur dargestellt. Dafür wurden die gemessenen Lufttemperaturen in 5 °C-Klassen unterteilt. Temperaturen über 35 °C traten in der letzten Juni- und der ersten sowie letzten Julidekade auf. Die erste Julidekade war die wärmste Dekade des Jahres, in der selbst nachts die Lufttemperatur nicht unter 20 °C sank. Lufttemperaturen über 30 °C traten zu mehr als 50 % auf. In der ersten Septemberdekade traten Lufttemperaturen über 30 °C noch zu knapp 10 % auf und nachts sank die Lufttemperatur nicht unter 15 °C. Die geringsten Lufttemperaturen traten in der Klasse zwischen >-5 °C bis 0 °C vor allem im Januar auf. Lufttemperaturen über 10 °C wurden dort kaum erreicht.

Abb. 1 ◀ Jahresverlauf der Dekadenhäufigkeiten der Lufttemperatur (T) der Stadt Freiburg im Breisgau unterteilt in 5 °C-Klassen für das Jahr 2019. In der wärmsten Dekade Anfang Juli traten zu mehr als 50 % Lufttemperaturen über 30 °C auf. Nachts sank die Lufttemperatur nicht unter 20 °C

Abb. 2 ◀ Jahresverlauf der Dekadenhäufigkeiten der Gefühlten Temperatur (GT) der Stadt Freiburg im Breisgau für das Jahr 2019. Die Klasseneinteilung der GT erfolgte entsprechend der thermophysiologischen Bewertung nach VDI 3787, Blatt 10. In der wärmsten Dekade Anfang Juli traten zu kaum mehr als 20 % Gefühlte Temperaturen zwischen 0 °C und 20 °C auf, bei denen thermischer Komfort für den Menschen möglich ist

Der Jahresverlauf der Gefühlten Temperatur der Stadt Freiburg für das Jahr 2019 in Form von Dekadenhäufigkeiten der Gefühlten Temperatur zeigt im Vergleich zur Lufttemperatur einen ähnlichen Verlauf (Abb. 2). Dabei wurden die Klassen der Gefühlten Temperatur entsprechend dem thermischen Empfinden des Menschen unterteilt, d. h., Gefühlte Temperaturen über 38 °C, wie sie zu etwa 30 % in der ersten Julidekade auftraten, entsprechen einer extremen Wärmebelastung und Gefühlte Temperatu-

ren über 32 °C entsprechen einer starken Wärmebelastung. Starke Wärmebelastungen traten ab der ersten Junidekade bis einschließlich der zweiten Septemberdekade zu bis zu knapp 50 % auf. Gefühlte Temperaturen, die für den Menschen thermischen Komfort bedeuten (0 °C bis 20 °C), traten in der ersten Julidekade und der letzten Januardekade nur zu etwas über bzw. leicht unter 20 % auf. Abgesehen von diesen Extremen ist vor allem im Frühjahr und im Herbst größtenteils thermischer Komfort möglich. In

der ersten Novemberdekade war thermischer Komfort zu 100 % möglich.

Die Zeitreihe der maximalen und minimalen Lufttemperaturen im Zeitraum Juni–August 2019, in dem 5 Hitzewellen auftraten, ist in Abb. 3 für die Stadt Freiburg und das Umland (Messstation: Flugplatz) dargestellt. Der Wärmeinseleffekt ist insbesondere anhand der minimalen Lufttemperaturen zu erkennen, die in der Stadt deutlich höher sind als im Umland. Verglichen mit der Zeitreihe der maximalen und minimalen Gefühlten Tempe-

Abb. 3 ▲ Maximale (rot) und minimale (blau) Lufttemperaturen in der Stadt Freiburg (durchgezogene Linie) und im Freiburger Umland (gestrichelte Linie) im Sommer 2019. Hitzewarnungen sind in orange hervorgehoben. Anhand der minimalen Lufttemperaturen, die in der Stadt höher sind als im Umland, ist der Wärmeinseleffekt deutlich zu erkennen

turen im Zeitraum Juni–August 2019 in **Abb. 4** für die Stadt Freiburg und das Umland, ist dort der Wärmeinseleffekt nicht nur anhand der Unterschiede in den minimalen Gefühlten Temperaturen zu erkennen, sondern auch anhand der maximalen Gefühlten Temperaturen, die sich zwischen Stadt und Umland ebenfalls deutlich unterscheiden. Dies zeigt, dass Stadtbewohner einer zusätzlichen besonders hohen Wärmebelastung ausgesetzt sind. Generell liegen die maximalen Gefühlten Temperaturen durchgängig über den maximalen Lufttemperaturen, während die minimalen Gefühlten Temperaturen durchgängig unterhalb der minimalen Lufttemperaturen liegen. Werden statt der minimalen bzw. maximalen Temperatur die Gefühlte Temperatur und die Lufttemperatur zu 12 UTC betrachtet, zeigt sich anhand von **Abb. 5**, dass die Gefühlten Temperaturen um bis zu 10 °C über den Lufttemperaturen liegen. Am 27.06.2019 wurde zu 12 UTC eine Lufttemperatur von 33 °C in der Stadt Freiburg gemessen, während die Gefühlte Temperatur, die aus der Messung der Lufttemperatur sowie den weiteren im Kapitel Methodik beschriebenen Parametern berechnet wurde, 43 °C erreichte. Die Unterschiede zwischen Lufttemperatur und Gefühlter Temperatur sind größtenteils auf die mittlere Strahlungstemperatur, die in die Berechnung der Gefühlten Temperatur

eingeht, zurückzuführen [32, 33]. Zur Verdeutlichung ist in **Abb. 5** zusätzlich die mittlere Strahlungstemperatur dargestellt.

Während der Hitzewelle Ende Juni im Vergleich zu den Hitzewellen im Juli zeigen die maximalen Gefühlten Temperaturen (**Abb. 4**) außerdem, dass in Freiburg die Hitzewelle Ende Juni belastender war als jene im Juli, obwohl die Lufttemperaturen im Juli extremer waren als im Juni (**Abb. 3**). Im Allgemeinen gilt, dass Hitzewellen am Anfang des Sommers belastender für Menschen sind als gegen Ende des Sommers, da sich der Organismus im Laufe des Sommers an höhere Temperaturen anpasst. Durch die thermophysiologische Anpassung (kurzfristige Akklimatisation) ändert sich die Reaktion des menschlichen Körpers auf die thermische Umwelt, weil diese durch eine Effizienzsteigerung des Thermoregulationssystems die effektiv auf ein Individuum wirkende thermische Belastung reduziert [26]. Nächtliche Erholungsphasen dienen dem Körper außerdem zur Regeneration. Fehlen diese durch hohe nächtliche Temperaturen, die den Schlaf stören oder verkürzen können, sind hohe Temperaturen auch am Tag weniger gut zu ertragen. Ende Juni stiegen die Innenraumtemperaturen in Freiburg auf annähernd 30 °C an und auch während der Hitzewellen im Juli und August überschritten

bzw. erreichten die Innenraumtemperaturen die Schwelle von 25 °C (**Abb. 6**).

Die orange hinterlegten Bereiche in **Abb. 3, 4, 5 und 6** heben die Tage hervor, an denen der DWD auf Basis der prognostizierten Gefühlten Temperatur und der weiteren in der Methodik beschriebenen Kriterien eine Hitzewarnung für den Kreis Freiburg herausgegeben hat. Außerdem lässt sich die an diesen Hitzewarntagen eingetretene thermische Situation anhand der gemessenen Zeitreihen ablesen. Zu erkennen ist, dass hohe gemessene Lufttemperaturen, hohe berechnete Gefühlte Temperaturen und hohe Innenraumtemperaturen mit den Hitzewarntagen korrespondieren (**Abb. 5 und 6**). Da es aber auch vorkommen kann, dass beispielsweise ein einzelnes Kriterium in einem Landkreis nur annähernd erfüllt wird, während es in den umgebenden Landkreisen flächendeckend erfüllt wird, werden die vom Hitzewarnsystem prognostizierten Warnvorschläge von einem Biometeorologen kritisch geprüft und gegebenenfalls angepasst.

Diskussion

Die Auswirkungen von Hitze auf die Gesundheit der Menschen hängen von den 3 Einflussfaktoren Dauer, Häufigkeit und Intensität ab, gegenüber denen der Mensch exponiert ist [14]. Die Aufrechterhaltung einer gleichbleiben-

Abb. 4 ▲ Maximale (rot) und minimale (blau) Gefühlte Temperaturen (GT) in der Stadt Freiburg (durchgezogene Linie) und im Freiburger Umland (gestrichelte Linie) im Sommer 2019. Hitzewarnungen sind in orange hervorgehoben. Der Wärmeinseleffekt ist nicht nur anhand der minimalen Gefühlten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland zu erkennen, sondern auch anhand der maximalen Gefühlten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland

Abb. 5 ▲ Tägliche Lufttemperatur (T) und Gefühlte Temperatur (GT) zu 12 UTC für die Stadt Freiburg sowie die mittlere Strahlungstemperatur (Tmrt), auf die die Unterschiede zwischen GT und T zu großen Teilen zurückzuführen sind. Hitzewarnungen sind in orange hervorgehoben

den Temperatur von etwa 36,6°C im Körperinneren ist das Ziel des Wärmehaushalts. Jegliche Abweichung davon beansprucht die Thermoregulation und belastet somit den menschlichen Körper. Je nach Gesundheitszustand des Körpers können Abweichungen nur eingeschränkt ausgeglichen werden. Daher sind ältere und moribide Menschen während Hitzewellen einem deutlich erhöhten Risiko ausgesetzt [8, 34]. Aber auch Kleinkinder und Säuglinge sowie mobilitätseingeschränkte Menschen weisen ein erhöhtes Risiko, unter Hitze

zu leiden, auf [35]. Die vorliegenden Analysen zeigen, dass Stadtbewohner während Hitzewellen im Vergleich zu Bewohnern auf dem Land neben dem Wärmeinseleffekt, der sich vorwiegend nachts ausprägt, insbesondere auch tagsüber höheren thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Dies unterstützt die These, dass Stadtbewohner bereits den anthropogenen Klimawandel erleben und stärker von Hitzewellen betroffen sind als Bewohner auf dem Land.

Für eine quantitative Beschreibung und Bewertung des Einflusses von Hitze

auf Menschen sind neben der Lufttemperatur auch die weiteren meteorologischen Parameter Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und kurz- sowie langwellige Strahlungsflüsse zur Berechnung der Gefühlten Temperatur verwendet worden. Kleinräumige Wind- und Strahlungsverhältnisse spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Auswirkungen [36] und wurden zur Berechnung der Gefühlten Temperatur berücksichtigt. Eine Gegenüberstellung der Lufttemperatur und der Gefühlten Temperatur zeigt, dass während Hit-

Abb. 6 ▲ Modellierte Innenraumtemperaturen (RT Raumtemperatur) und Schwellenwert (RT_Schwelle) für eine Hitzewarnung für Freiburg im Sommer 2019. Hitzewarnungen sind in orange hervorgehoben. Weitere Details zur Innenraummodellierung sind in der Methodik zu finden

zewellen die Gefühlte Temperatur die Lufttemperatur in diesem Beispiel um bis zu 10°C übersteigt. Die auf Basis der Messdaten berechnete Gefühlte Temperatur ist tagsüber oftmals größer als die gemessene Lufttemperatur, weil die Sonnenstrahlung einer der dominierenden Faktoren der thermischen Indizes (z. B. GT, Physiologisch Äquivalente Temperatur) ist [37]. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass sich der Unterschied der Gefühlten Temperatur zur Lufttemperatur zum größten Teil durch die dargestellte mittlere Strahlungstemperatur erklären lässt. Nachts ist die Gefühlte Temperatur meistens niedriger als die Lufttemperatur, weil unter nächtlichen Bedingungen schon ein schwacher Wind einen abkühlenden Einfluss hat. Da sich Bewohner von Städten und Bewohner auf dem Land nachts meist in ihren Wohnungen aufhalten, werden im Hitzewarnsystem des DWD zusätzlich modellierte Innenraumtemperaturen herangezogen.

Anhand der Ergebnisse könnte vermutet werden, dass teilweise nicht alle Kriterien für eine Hitzewarnung erfüllt wurden, obwohl ein Tag mit einer Hitzewarnung markiert wurde. Solche Abweichungen können zum einen damit zusammenhängen, dass die markierten Hitzewarnungen auf Prognosen beruhen und die dargestellten Gefühlten Temperaturen auf Messungen. Zum anderen

werden die vom Hitzewarnsystem vorgeschlagenen Warnungen anhand eines Biometeorologen überprüft und teilweise aufgrund seiner Einschätzung überarbeitet, sodass geringe Abweichungen vorkommen können.

Über die Modellierungen hinaus sind Auswirkungen in Städten aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität der meteorologischen Größen und Bedingungen allerdings noch komplexer. Die urbane Wärmeinsel führt dazu, dass besonders in der Nacht durch die Unterschiede zwischen Stadt und Land sowie durch den Aufenthalt der Menschen in Innenräumen die Belastungen höher und viel schwieriger zu quantifizieren sind [15]. Das Innenraummodell liefert zwar einen Näherungswert, unterliegt aber genau wie das Klima-Michel-Modell, welches zur Berechnung der Gefühlten Temperatur verwendet wird, bestimmten Standardisierungen, die überhaupt erst eine Modellierung ermöglichen. Individuelle Unterschiede können somit nicht abgebildet werden. Die an ältere Menschen und Bewohner von Städten angepassten Hitzewarnungen sind erste Entwicklungen, die diese Risikogruppen besonders berücksichtigen.

Fazit

Die Quantifizierung von Hitze erfolgt nicht nur auf Basis der Lufttemperatur,

sondern erfordert auch Kenntnisse und Informationen von weiteren meteorologischen Parametern (Feuchte, Wind, Sonnenstrahlung) sowie thermophysiologische Größen. Dies ist insbesondere bei Hitze in Städten von Bedeutung, da Tag- und Nachtbedingungen eine Rolle spielen. Hitzewarnsysteme für verschiedene räumliche und zeitliche Auflösungen zum Schutz der unterschiedlichen vulnerablen Risikogruppen mit den entsprechenden Maßnahmen im Rahmen von Hitzeaktionsplänen sind unerlässliche Hilfsmittel von Anpassungsmaßnahmen. Diese sollten im Zuge des Klimawandels weiterentwickelt werden und insbesondere Bewohnern in Städten, die einer stärkeren thermischen Belastung ausgesetzt sind, präventive Maßnahmen ermöglichen.

Korrespondenzadresse

Kathrin Graw

Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, Deutscher Wetterdienst
79104 Freiburg, Deutschland
kathrin.graw@dwd.de

Funding. Open Access funding provided by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. A. Matzarakis, S. Muthers und K. Graw geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Mora C, Dousset B, Caldwell IR et al (2017) Global risk of deadly heat. *Nat Clim Chang* 7:501–506
- Muthers S, Laschewski G, Matzarakis A (2017) The summers 2003 and 2015 in south-west Germany: heat waves and heat-related mortality in the context of climate change. *Atmosphere* 8:1–13
- An Der Heiden AM, Muthers S, Niemann H, Buchholz U, Grabenhenrich L, Matzarakis A (2019) Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz* 62:571–579
- An Der Heiden AM, Buchholz U, Uphoff H (2019) Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle infolge der Hitzewelle 2018. *Epid Bull* 23:193–197
- Robine JM, Cheung SL, Le Roy S et al (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *CR Biol* 331:171–178
- Ye X, Wolff R, Yu W, Vaneckova P, Pan X, Tong S (2012) Ambient temperature and morbidity: a review of epidemiological evidence. *Environ Health Perspect* 120:19–28
- Hanefeld C, Klaassen-Mielke R, Miebach J et al (2019) Einfluss von Wetterextrema auf Einsatzzahlen im Notarzteinsatz. *Med Klin Intensivmed Notfmed*. <https://doi.org/10.1007/s00063-019-00641-7>
- Mücke H-G, Matzarakis A (2017) Klimawandel und Gesundheit. In: Wichmann HE, Fromme H (Hrsg) *Handbuch für Umweltmedizin*. Ecomed, Landsberg am Lech (Kapitel VIII – 1.10)
- Stott PA (2003) Attribution of regional-scale temperature changes to anthropogenic and natural causes. *Geophys Res Lett* 30:1–4
- IPCC (2013) Summary for policymakers. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (Hrsg) *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge
- Russo S, Sillmann J, Fischer EM (2015) Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ Res Lett* 10:124003
- Matzarakis A, Muthers S, Koch E (2010) Human biometeorological evaluation of heat-related mortality in Vienna. *Theor Appl Climatol* 105:1–10
- Straff W, Mücke H-G (2017) Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz* 60:662–672
- World Health Organization (2008) Heat-health action plans
- Matzarakis A, Laschewski G, Muthers S (2020) The heat health warning system in Germany—application and warnings for 2005 to 2019. *Atmosphere* 11:1–13
- Mücke H-G, Matzarakis A (2019) Klimawandel und Gesundheit: Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/190617_uba_fl_tipps_fur_sommerliche_hitze_und_hitzewellen_bf.pdf. Zugegriffen: 3. Juni 2020
- Robinson PJ (2001) On the definition of a heat wave. *J Appl Meteorol* 40:762–775
- Matzarakis A, Paramita B (2018) Equity, equality and justice in urban housing development
- Schuster C, Honold J, Lauf S, Lakes T (2017) Urban heat stress: novel survey suggests health and fitness as future avenue for research and adaptation strategies. *Environ Res Lett* 12:1–10
- Statistisches Bundesamt (2019) Bevölkerung, Familien, Lebensformen. Statistisches Jahrbuch 2019. https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-bevoelkerung.pdf?__blob=publicationFile. Zugegriffen: 3. Juni 2020
- Ramamurthy P, González J, Ortiz L, Arend M, Moshary F (2017) Impact of heatwave on a megacity: an observational analysis of New York City during July 2016. *Environ Res Lett* 12:1–8
- Matzarakis A (2018) Das Stadtklima – Herausforderung heute und für die Zukunft. *Architekt* 5/18:36–39
- Graw K, Muthers S, Matzarakis A (2019) Hitzewellen und Hitzewarnungen in Städten. In: Lozán JL, Breckle S, Grassl H, Kuttler W, Matzarakis A (Hrsg) *Warnsignal Klima: Die Städte. Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg, S 152–158
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA (2017) *Urban climates*. Cambridge University Press, Cambridge
- Staiger H, Laschewski G, Grätz A (2012) The perceived temperature—a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int J Biometeorol* 56:165–176
- Koppe C (2005) Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse. In: Bericht des Deutschen Wetterdienstes 226. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- Vdi 3787 Blatt 10 (2010) *Umweltmeteorologie Human-biometeorologische Anforderungen im Bereich Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation*.
- Vdi 3787 Blatt 2 (2008) *Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Bioklima und Luftqualität für die Stadt- und Regionalplanung; Teil 1: Klima*. Kapitel 4. Beuth: Berlin.
- Koppe C, Jendritzky G (2005) Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. *Meteorol Z* 14:271–278
- Pfafferoth J, Becker P (2008) Erweiterung des Hitzewarnsystems um die Vorhersage der Wärmebelastung in Innenräumen. *Bauphysik* 30:237–243
- Wienert U, Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2013) A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. *Meteorol Z* 22:179–185
- Matzarakis A (2013) Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Gefahrstoffe Reinhalt Luft* 73:115–118
- Matzarakis A, Endler C (2010) Climate change and thermal bioclimate in cities: impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *Int J Biometeorol* 54:479–483
- Campbell S, Remenyi TA, White CJ, Johnston FH (2018) Heatwave and health impact research: a global review. *Health Place* 53:210–218
- Mangus CW, Canares TL (2019) Heat-related illness in children in an era of extreme temperatures. *Pediatr Rev* 40:97–107
- Staiger H, Laschewski G, Matzarakis A (2019) Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere* 10:1–15
- Matzarakis A, Fröhlich D (2015) Sport events and climate for visitors—the case of FIFA World Cup in Qatar 2022. *Int J Biometeorol* 59:481–486