

Innerstädtische Lufttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins

Inner-city air temperature as indicator for health risks in cities
using Berlin as an example

Daniel Fenner¹, Hans-Guido Mücke², Dieter Scherer¹

Abstract

This study examines differences in air temperature at four observational sites in different parts of the city of Berlin, Germany, during the decade 2001–2010 with respect to threshold indicator days: “hot days” (daily maximum temperature $\geq 30^\circ\text{C}$) and “tropical nights” (daily minimum temperature $\geq 20^\circ\text{C}$). The number of hot days is similar at the different sites whereas tropical nights appear much more frequent at the built-up city centre compared to open areas (factor >3). The effects of high ambient air temperature on Berlin-wide mortality are studied with the help of an event-based risk model. The analysis reveals a strong connection between tropical nights and increased mortality. However, even during cooler nights a statistically significant increase in mortality can be detected. Overall, approximately 4–5 per cent of all deaths in Berlin can statistically be linked to heat events.

Zusammenfassung

Diese Studie untersucht die klimatischen Verhältnisse von vier Messstationen in Berlin für die Dekade 2001–2010 anhand der klimatologischen Kenntage „Heißer Tag“ (Tagesmaximumtemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$) und „Tropennacht“ (Tagesminimumtemperatur $\geq 20^\circ\text{C}$). Während die Anzahl heißer Tage ähnlich an den verschiedenen Stationen ist, treten Tropennächte innerhalb der dichten Bebauungsstruktur wesentlich häufiger auf als auf Freiflächen (Faktor >3). Mit Hilfe eines ereignisbasierten Risikomodells wird die Auswirkung hoher Lufttemperatur auf die Mortalität in Berlin untersucht. Die Analyse zeigt, dass ein enger Zusammenhang zwischen Tropennächten und erhöhter Mortalität besteht. Es kann aber bereits bei weniger warmen Nächten ein statistisch signifikanter Anstieg der Mortalität nachgewiesen werden. Insgesamt können rund 4–5 Prozent der jährlichen Todesfälle in Berlin statistisch mit Hitzeereignissen verbunden werden.

Einleitung

Epidemiologische Untersuchungen haben gezeigt, dass auch im gemäßigten Klima Mitteleuropas die Gesundheit des Menschen durch extreme thermische Belastungen nachteilig beeinflusst wird. So zeigt die Temperatur-Mortalitätsbeziehung, dass sowohl eine niedrige als auch hohe Lufttemperatur (Kälte / Hitze) mit einer erhöhten Sterblichkeit der Bevölkerung verbunden sein kann (Jendritzky 2007; Jendritzky et al. 2007; Eis et al. 2010). Der Jahresgang der Mortalität weist zunächst auf ein Maximum in den Wintermonaten und ein Minimum im Sommer hin (Jendritzky, Koppe 2014). Hohe Mortalitätsraten können einerseits im Winter durch niedrige Temperaturwerte (Kältestress) verursacht

werden, die gemeinsam mit weiteren Umwelteinflüssen, sogenannten Ko-Faktoren (Confounder) wirken, wie zum Beispiel ein prinzipiell erhöhtes Infektionsrisiko, erhöhte gas- und partikelförmige Luftschadstoffkonzentrationen sowie niedriger sozialökonomischer Status (Hajat et al. 2007; Laschewski, Jendritzky 2007; Analitis et al. 2008; Breitner et al. 2014). Andererseits können hohe Mortalitätsraten auch während des sommerlichen Minimums auftreten, zum Beispiel ausgelöst durch Hitzewellen, die häufig mit erhöhten Luftschadstoffkonzentrationen (z.B. Ozon) einhergehen (Breitner et al. 2014; Jendritzky, Koppe 2014; Mücke 2014). Es sind jedoch nicht nur extreme Wet-

¹ Technische Universität Berlin.

² Umweltbundesamt Berlin.

terlagen, wie beispielsweise die Hitzeperioden der Sommer 2003 und 2006 in Berlin, von Relevanz, sondern auch die „normalen“ Bedingungen mit moderat wärmeren Perioden, welche jeden Sommer auftreten. Dies konnten Scherer et al. (2013) in einem kürzlich erschienenen open-access-Artikel in der Zeitschrift „DIE ERDE“ zeigen. Gegenüber thermischer Belastung sind vor allem ältere Menschen mit stark eingeschränkter physischer und psychischer Gesundheit, Personen mit Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, multimorbide Personen mit einer eingeschränkten Adaptationsfähigkeit und -kapazität, aber auch Kleinkinder mit einer noch instabilen Thermoregulation betroffen (Hajat et al. 2007; Jendritzky 2007; Eis et al. 2010).

Innerhalb größerer Siedlungsbereiche und Städte kommt es aufgrund der Bebauung zu einer Veränderung der natürlichen klimatischen Verhältnisse. Insbesondere die Lufttemperatur ist in der Stadt im Vergleich zum Umland höher, verbunden mit durchschnittlich geringeren Windgeschwindigkeiten und kleinräumig sehr unterschiedlichen Strahlungsverhältnissen (Arnfield 2003; Kuttler 2004). Weltweit gibt es zahlreiche Studien, welche den Effekt der „städtischen Wärmeinsel“ zeigen (siehe z. B. Arnfield 2003). Das Stadtgebiet ist jedoch nicht gleichmäßig und dauerhaft überwärmt; vielmehr bilden sich Zentren unterschiedlicher Überwärmung aus, welche unter anderem von der Stadtstruktur, ihrer Lage innerhalb der Stadt, den Jahres- und Tageszeiten sowie den meteorologischen Gegebenheiten abhängen (Oke 1982; Kuttler 2004; Fenner et al. 2014). Für Städte der mittleren Breiten ist der Unterschied der Lufttemperatur zwischen Stadt und Umland insbesondere im Sommer und in der Nacht ausgeprägt. Nicht selten werden in Berlin Unterschiede von mehr als 10 Kelvin (K) gemessen (Fenner et al. 2014). Kühlt sich die Luft während der Nachtstunden nur in begrenztem Maße ab, kann dies zu Situationen führen, in welchen die Lufttemperatur nicht unter 20 °C fällt, sogenannte „Tropennächte“. Aus biometeorologischer Sicht sind diese Situationen höchst problematisch, da der menschliche Körper nicht die notwendige Erholung während der Nacht erfährt.

Der vorliegende Beitrag untersucht den Aspekt der thermischen Belastung aus gesundheitlicher Sicht für den Zeitraum 2001 bis 2010 am Beispiel Berlins. Anhand ausgewählter Messdaten soll gezeigt werden, inwieweit sich die klimatischen Bedingungen innerhalb der dichten Bebauung von Bedin-

gungen auf Freiflächen und außerhalb des bebauten Stadtgebietes unterscheiden und welchen Effekt diese Bedingungen auf das Mortalitätsrisiko haben.

Untersuchungsgebiet und Methoden

Das Untersuchungsgebiet ist Berlin (52.52° N; 13.40° O) mit einer Größe von 892 km² und einer mittleren Bevölkerungszahl von rund 3,35 Millionen in den Jahren 2001–2010. Meteorologische Daten der Jahre 2001–2010 für diese Studie stammen von den Messnetzen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie des Fachgebiets Klimatologie der Technischen Universität Berlin (TUB) (**Abbildung 1**).

Die Station Tempelhof (THF) liegt im südlichen Bereich des ehemaligen Flughafens Berlin-Tempelhof (52,4686° N; 13,4039° O) und wird vom DWD betrieben. Das Gelände des Flughafens liegt innerhalb des bebauten Stadtgebietes und besitzt weitestgehend Offenlandcharakter mit Grasbewuchs und einzelnen Baumgruppen. Im östlichen Bereich des Flughafens Berlin-Tegel liegt die Station Tegel (TGL) (52,5656° N; 13,3108° O), welche der DWD als Flugwetterwarte betreibt. Östlich und nördlich des Flughafens liegen Wohn- und Industriegebiete, westlich und südlich befinden sich Waldflächen beziehungsweise Park- und Kleingartenanlagen. Für beide Stationen wurden Lufttemperaturdaten aus 2 m über Grund (ü. G.) (gemessen in einer Wetterhütte mit Pt100 1/3 DIN Klasse B, Genauigkeit ±0,2 K bei 20 °C) in stündlicher und täglicher Auflösung verwendet (DWD 2015).

Die Station Dahlemer Feld (DAHf) befindet sich auf einer mit Gras und kleineren Baumgruppen bewachsenen Freifläche von 0,17 km² Größe im Grunewald im Südwesten Berlins (52,4777° N; 13,2252° O). Lufttemperatur und Luftfeuchte werden in einer Wetterhütte in 2 m ü. G. gemessen (Vaisala HMP35A, Genauigkeit ±0,2 K bei 20 °C). Im Gegensatz zu den drei Stationen auf Freiflächen liegt die Station Dessauer Straße (DESS) innerhalb einer Straßenschlucht (52,5045° N; 13,3783° O) östlich des Potsdamer Platzes. Lufttemperatur und Luftfeuchte werden in 3,5 m ü. G. auf der westlichen Straßenseite gemessen. Der Lufttemperatursensor (Pt100 1/3 DIN Klasse B, Genauigkeit ±0,2 K bei 20 °C) ist in einem passiv belüfteten Strahlenschutzgehäuse in 0,7 m Entfernung zur Fassade angebracht. Während der späten Vormittags- und Mittagsstun-

den ist die westliche Straßenseite sonnenbeschienen. Die lokale Umgebung (500 m Radius) weist einen durchschnittlichen Versiegelungsgrad von rund 62 Prozent (bebaut und unbebaut versiegelt), einen Grünflächenanteil von rund 34 Prozent und eine mittlere Gebäudehöhe von 28,7m auf (Sen-Stadt 2010). Die Stationen DAHF und DESS sind Bestandteil des Messnetzes des Fachgebiets Klimatologie der TUB. Die Originaldaten mit 5-Minuten Auflösung wurden qualitätsgeprüft (Fenner et al. 2014) und zu Zeitreihen mit stündlicher und täglicher Auflösung aggregiert.

Zur Identifizierung von Hitze wurden folgende klimatologische Kenngröße berechnet:

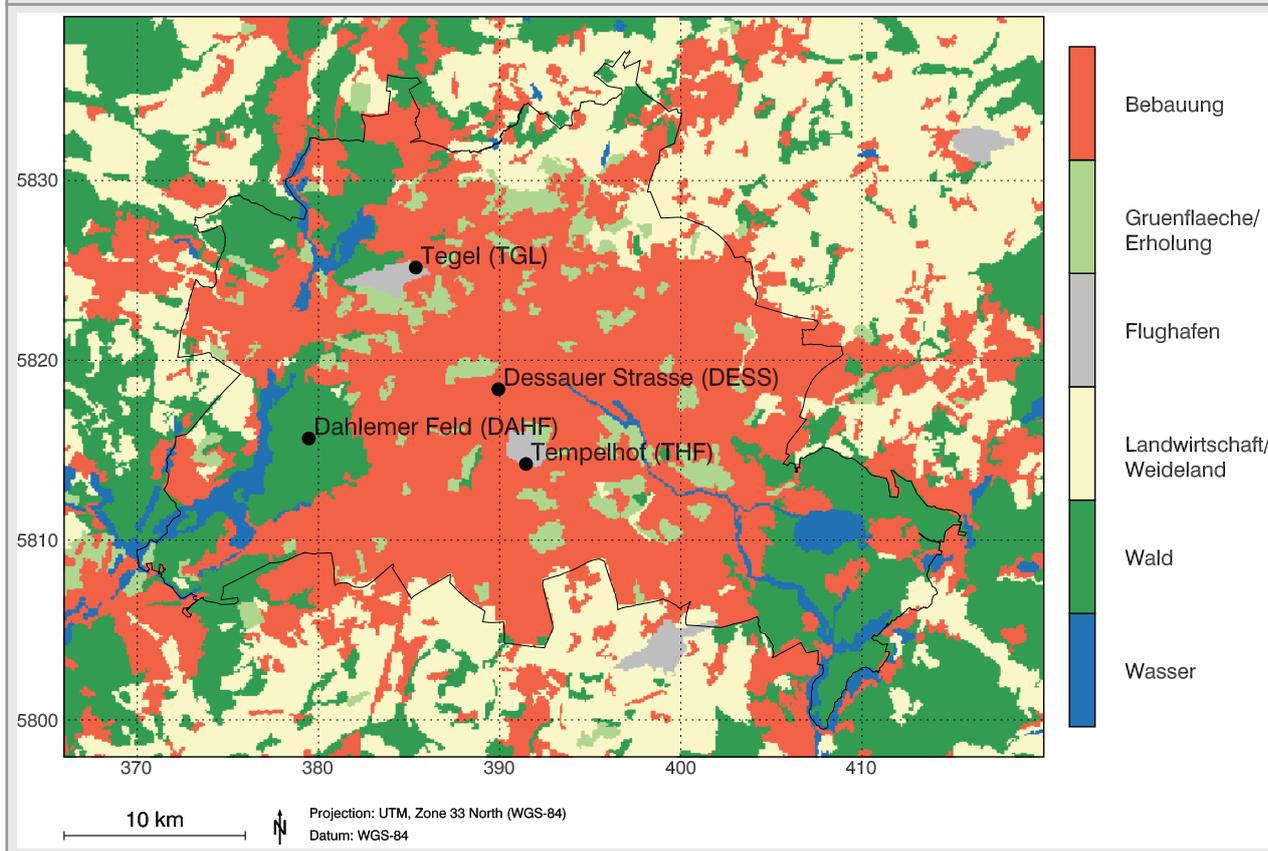
- 1) Heißer Tag: Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur (T_{max}) $\geq 30^{\circ}\text{C}$ beträgt.
- 2) Tropennacht: Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur (T_{min}) $\geq 20^{\circ}\text{C}$ beträgt.

Die Untersuchung des hitzebedingten Mortalitätsrisikos für die Bevölkerung basiert auf dem Risiko-

modell von Scherer et al. (2013), welches auf täglich aufgelösten Lufttemperaturdaten als Hitzeindikator (Tagesmittelwert T_{mean} , T_{min} und T_{max}), auf täglichen Todesfallzahlen für drei Altersgruppen (Gesamt, 0–64 Jahre, 65+ Jahre) sowie auf Daten zur Bevölkerungsanzahl basiert. Das Modell identifiziert Hitzeereignisse und quantifiziert das damit einhergehende erhöhte Mortalitätsrisiko. Halbjährliche Zeitreihen der Bevölkerungszahl von Berlin wurden vom Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2013) bereitgestellt und auf eine tägliche Auflösung interpoliert. Täglich aufgelöste Todesfallzahlen ohne Unterscheidung der Todesursache für die drei Altersgruppen wurden ebenfalls vom Amt für Statistik Berlin-Brandenburg bereitgestellt. Details zum Risikomodell sind in Scherer et al. (2013) zu finden.

Die Funktionsweise des Modells sei im Folgenden jedoch kurz dargestellt. Zunächst werden die Altersgruppe sowie der Hitzeindikator gewählt. Anschließend detektiert das Modell Hitzeereignisse, an denen an mindestens drei aufeinander folgenden Tagen eine bestimmte Schwellenwerttemperatur (T_{th}) überschritten wurde. Für jedes Hitzeereignis wird

Abbildung 1: Lage der Messstationen (schwarze Punkte) und Landbedeckung in und um Berlin. DWD-Stationen: Tegel (TGL), Tempelhof (THF); TUB-Stationen: Dahlemer Feld (DAHF), Dessauer Straße (DESS). Die schwarze Linie zeigt die Landesgrenze Berlins. Kartengrundlage: Corine Land Cover 2006 (EEA 2006).



anschließend die Ereignisstärke (Hitzemagnitude) anhand von logarithmierten Hitzesummen (Gradzahltagen) berechnet, normiert auf das Minimum der Hitzemagnitude in der gesamten Zeitreihe. Anschließend wird mittels sogenannter „lag days“ (L_i) getestet, ob auch im Nachlauf eines Hitzeereignisses erhöhte Mortalität nachweisbar ist. Für jedes Ereignis plus der entsprechenden Anzahl von L_i (0 bis 14 Tage) wird hierzu die mittlere Mortalitätsrate bestimmt, dann eine lineare Regression zwischen der Hitzemagnitude und der mittleren Mortalitätsrate berechnet und signifikante Ergebnisse ($p \leq 0,05$) ausgewählt. Alle Berechnungen werden für unterschiedliche Werte von T_{th} durchgeführt (Schrittweite 1 K). Der Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass nicht im Vorhinein Annahmen über T_{th} , die Basisrate der Mortalität oder die Beziehung zwischen Lufttemperatur und Mortalität getroffen werden.

Das Risikomodell wurde für diese Studie mit den Lufttemperaturdaten der Dessauer Straße angetrieben. Die Ergebnisse werden denen von Tempelhof (Scherer et al. 2013) gegenübergestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Klimatologische Kenntage

Wie **Tabelle 1** zeigt, ist die Anzahl der heißen Tage an den vier Messstandorten ähnlich. Die Stationen TGL und THF zeigen die geringste Anzahl, DAHF liegt leicht darüber, während die höchste Anzahl an der Station DESS registriert wurde. Die durchschnittliche Anzahl im Untersuchungszeitraum 2001–2010 ist an den Stationen des DWD im Vergleich zur Periode 1981–2010 höher. Im langjährigen Mittel wurden an der Station TGL 9,4 heiße Tage verzeichnet, an der Station THF 9,6 (DWD 2013a). Im Vergleich zur klimatologischen Referenzperiode 1961–1990 ist die durchschnittliche

| Tabelle 1: Anzahl heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) und Tropennächte ($T_{min} \geq 20 \text{ °C}$) pro Jahr für die Messstationen in Berlin im Untersuchungszeitraum 2001–2010. | | |
|---|------------------|--------------------|
| | Heiße Tage (d/a) | Tropennächte (d/a) |
| Dahlemer Feld (DAHF); TUB | 12,6 | 0,1 |
| Dessauer Straße (DESS); TUB | 14,0 | 9,1 |
| Tegel (TGL); DWD | 11,6 | 2,9 |
| Tempelhof (THF); DWD | 12,0 | 1,6 |

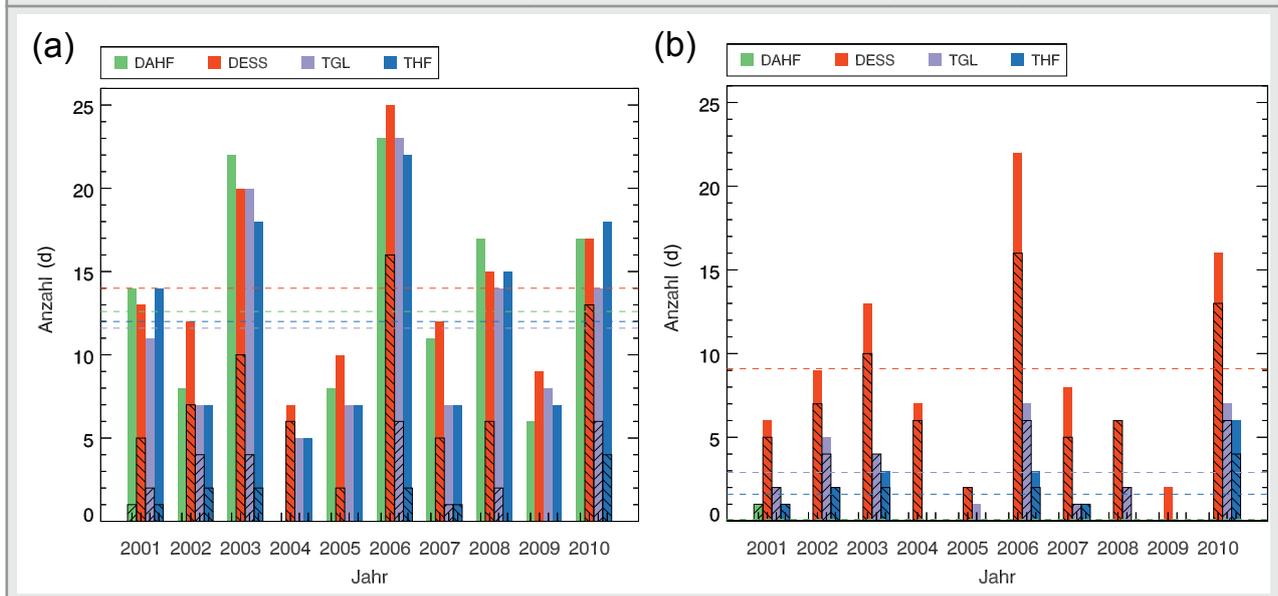
Anzahl heißer Tage sogar fast verdoppelt (6,8 Tage an TGL und THF; DWD 2013b).

Für die Tropennächte ergeben sich hingegen markante Unterschiede (**Tabelle 1**). Während im Zeitraum 2001–2010 auf dem Dahlemer Feld nur eine Tropennacht verzeichnet wurde, waren es an der Station THF im gleichen Zeitraum 16 Tropennächte, an der Station TGL 29 Tropennächte und an der Station DESS sogar 91 Tropennächte, was einem Faktor von 3 im Vergleich zu TGL beziehungsweise mehr als 5 zu THF entspricht. Für einen Großteil der Bevölkerung Berlins, welcher in dicht bebauten Stadtquartieren lebt, ergibt sich dadurch eine deutlich höhere thermische Belastung während der Nachtstunden, als sie an den Messstationen TGL und THF oder gar am Stadtrand (DAHF) verzeichnet wird. Diese markante Erhöhung der Anzahl der Tropennächte verdeutlicht die temperaturanhebende Wirkung der Bebauung auf die nächtliche Lufttemperatur.

Abbildung 2 zeigt die Anzahl der heißen Tage (a, links) und Tropennächte (b, rechts) für die vier Messstationen in den einzelnen Jahren 2001–2010 und macht deutlich, dass die Anzahl der Kenntage stark von Jahr zu Jahr schwankt. Bezüglich der heißen Tage waren die Jahre 2003 und 2006 Extremjahre mit 20 oder mehr heißen Tagen an allen Messstationen (Ausnahme THF 2003 mit 18 heißen Tagen). Diese Jahre waren die Jahre der Hitzesommer in ganz Europa, wobei die Hitzeperiode im Juli 2006 in Berlin weitaus stärker ausgeprägt war als im Jahr 2003. Im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2001–2010 (gestrichelte Linien) war die Anzahl 2006 fast doppelt so hoch (**Abbildung 2a**, links). Auch epidemiologische Studien für Berlin konnten zeigen, dass die extreme Hitze im Sommer 2006 eine größere Wirkung auf die Mortalität hatte als die Hitzewelle im Jahr 2003 (Gabriel und Endlicher 2011; Scherer et al. 2013).

Anhand der Tropennächte (**Abbildung 2b**, rechts) wird deutlich, wie stark sich die Verhältnisse im bebauten Innenstadtbereich von denen der anderen Stationen unterscheiden. Hier fallen insbesondere die Jahre 2006 und 2010 an der Station DESS auf. Im Vergleich zum Mittelwert des Untersuchungszeitraums 2001–2010 bedeutet dies eine Erhöhung um 140 Prozent (2006), beziehungsweise 70 Prozent (2010). Im Jahr 2003 traten nach 2006 und 2010 die meisten Tropennächte an der Station DESS auf, an der Station TGL gab es im Jahr 2002 sogar eine

Abbildung 2: Balkendiagramme mit der Anzahl der (a) heißen Tage ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) und (b) Tropennächte ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$) für die Messstationen in Berlin im Untersuchungszeitraum 2001–2010. Die gestrichelten farbigen Linien zeigen den arithmetischen Mittelwert der Jahre 2001–2010 der jeweiligen Station. Die schwarze Schraffur zeigt die Anzahl der Tage, an denen heiße Tage in Kombination mit Tropennächten aufgetreten sind. An der Station DAHF gab es im August 2004 Messausfälle.



Tropennacht mehr als 2003, für THF liegen die Jahre 2002 und 2003 gleichauf. Es wird an allen Stationen deutlich, dass die Mehrzahl der Tropennächte in Kombination mit heißen Tagen auftritt (Schraffur in **Abbildung 2b**). Dies sind die aus bioklimatischer Sicht äußerst problematischen Situationen, an denen die Menschen nicht nur während des Tages starker Hitze im Freien ausgesetzt sind, sondern der Körper auch in den Nachtstunden durch hohe Lufttemperatur belastet sein kann.

Im folgenden Abschnitt soll auf die Tagesgänge der Lufttemperatur an klimatologischen Kenntagen eingegangen werden (**Abbildung 3**). Für die heißen Tage (**Abbildung 3a**, links) wurde dabei die Station THF als „Basisstation“ verwendet, das heißt die Daten aller Stationen sind für die Tage, an denen heiße Tage an THF verzeichnet wurden, stratifiziert. Für Tropennächte (**Abbildung 3b**, rechts) wurde die Station DESS als Basisstation gewählt.

Anhand der Tagesgänge wird deutlich, dass die größten Unterschiede zwischen den Stationen in den Abend- und Nachtstunden auftreten, sowie, dass die Tagesgänge an den Kenntagen zu deutlich höheren Lufttemperaturen verschoben sind. Während im Sommer (JJA) das mittlere Minimum an THF bei rund 15 °C liegt, liegt es an heißen Tagen bei über 18 °C (**Abbildung 3a**). Im Umland an der Station DAHF kühlt sich die Luft dagegen auch an heißen

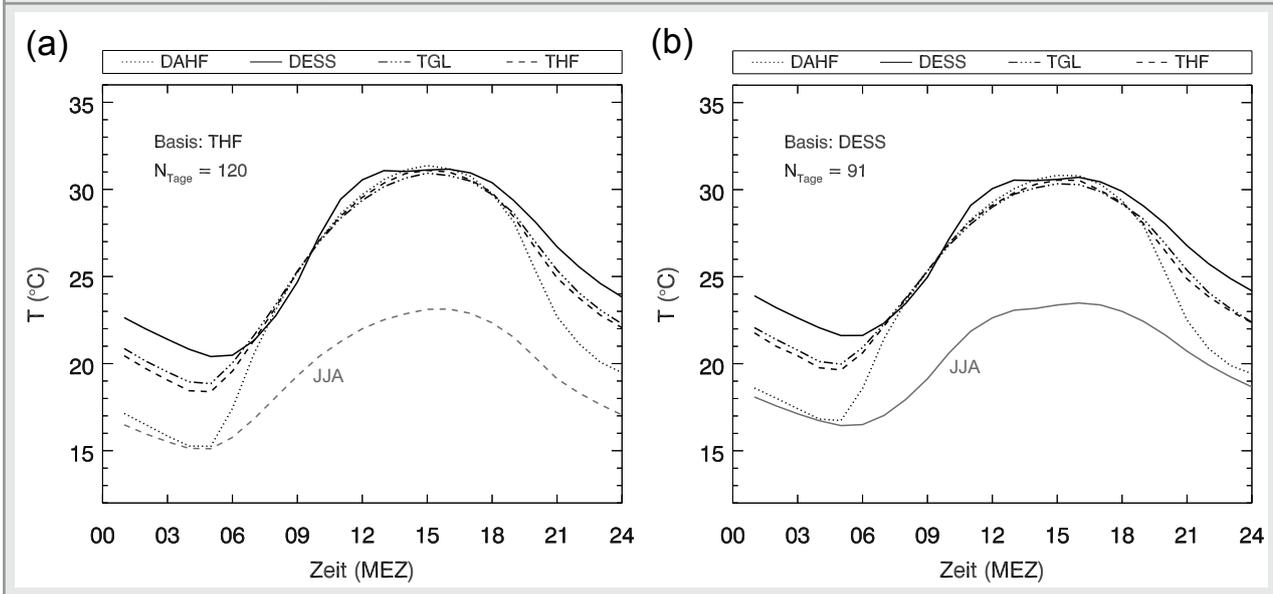
Tagen während der Nacht auf bis zu 15 °C ab. Die Tagesmaxima sind an allen Stationen nahezu identisch und zeigen für THF eine stärkere Erhöhung als das Tagesminimum, verglichen mit dem mittleren Tagesgang während des Sommers. Die Minima an der Station DESS liegen während heißer Tage an THF bereits im Mittel über 20 °C und damit nochmals deutlich über denen der Stationen TGL und THF. Dadurch ist die Amplitude des Tagesgangs im Stadtzentrum verringert. Auch tritt das Maximum leicht verzögert zu den anderen Stationen ein, verbunden mit einer geringeren Abkühlung ab dem Nachmittag. Alle drei Merkmale sind typische Charakteristika des Stadtklimas (Oke 1982).

Für Tropennächte an der Station DESS (**Abbildung 3b**) ergibt sich ein ähnliches Bild, jedoch sind die mittleren Minimumtemperaturen am frühen Morgen nochmals mindestens 1 K höher als während heißer Tage. Für DESS liegt das mittlere Minimum bei rund 22 °C , die heißeste Nacht im Untersuchungszeitraum lag bei $24,8\text{ °C}$ (11.07.2010). Die Maximumtemperaturen an den Stationen sind wieder nahezu identisch und auf einem ähnlichen Niveau wie während heißer Tage.

Hitzebezogene Mortalität

In **Tabelle 2** sind ausgewählte Ergebnisse des Risikomodells für die Gesamtbevölkerung Berlins für die Jahre 2001–2010 dargestellt. Es wurde für

Abbildung 3: Mittlere Tagesgänge der bodennahen Lufttemperatur (T) an (a) heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$), gemessen an der Station Tempelhof (Basis: THF) und (b) Tropennächten ($T_{\min} \geq 20^\circ\text{C}$), gemessen an der Station Dessauer Straße (Basis: DESS). Die schwarzen Linien zeigen die mittleren Tagesgänge für die Stationen an den jeweiligen Kenntagen der Basisstation, die graue Linie (JJA) zeigt jeweils den mittleren Tagesgang der Lufttemperatur an der Basisstation während der Sommermonate Juni, Juli, August.



die Stationen THF und DESS für jeden Hitzeindikator das Ergebnis mit dem geringsten Fehler des Regressionskoeffizienten (Fehler zwischen 14,7% und 21,2%) ausgewählt.

Tabelle 2 zeigt, dass die Ergebnisse von Scherer et al. (2013), welche mit den Lufttemperaturdaten von THF erzielt wurden, mit den Daten der Station DESS bestätigt werden. Die hitzebezogenen zusätzlichen Todesfälle (zusätzlich zur Basisrate der Mortalität) zeigen für beide Stationen bei Verwendung des Hitzeindikators T_{mean} , dass rund 4–5 Prozent der Todesfälle in Berlin im Zeitraum 2001–2010 statistisch mit Hitzeereignissen in Verbindung gebracht werden können (Gesamttodesfälle: 32.160 pro Jahr), auch

wenn gänzlich unterschiedliche Stationen für die Lufttemperaturmessungen herangezogen werden.

Anhand der Schwellenwerte T_{th} für T_{mean} und T_{min} wird der Versatz zu höheren Lufttemperaturen an der Station DESS deutlich, der auch in den Tagesgängen (Abbildung 3) und der höheren Anzahl an Tropennächten (Abbildung 2) sichtbar ist. Für T_{max} ergibt sich erwartungsgemäß ein geringerer Unterschied in T_{th} . Der Unterschied zwischen den beiden Stationen bezüglich der hitzebedingten zusätzlichen Todesfälle für T_{max} folgt aus der niedrigeren Anzahl an Hitzeereignissen und lag days an der Station THF. Bezüglich T_{min} konnten mit den Lufttemperaturdaten von DESS nahezu identische Ergebnisse wie an THF erzielt werden, jedoch mit $T_{\text{th}} = 20^\circ\text{C}$ im Vergleich

Tabelle 2: Ausgewählte Ergebnisse des ereignisbasierten Risikomodells (Scherer et al. 2013) für die gesamte Bevölkerung Berlins für die Jahre 2001–2010 mit den Lufttemperaturdaten der Stationen Tempelhof (THF) und Dessauer Straße (DESS). Alle Ergebnisse sind statistisch hoch signifikant bezüglich der Regressionsanalyse ($p \leq 0.001$; $p \leq 0.01$ für T_{min} an THF). Hitzestresstage setzen sich aus Hitzeereignissen und lag days zusammen. Für die zusätzlichen Todesfälle ist außerdem der Standardfehler angegeben. Die Ergebnisse für THF sind Scherer et al. (2013) entnommen.

| Hitzeindikator | Station | Schwellenwert T_{th} ($^\circ\text{C}$) | Hitzeereignisse (1/a) | Hitzestresstage (d/a) | Lag days (d) | r^2 (%) | Zusätzl. Todesfälle (Einw./a) |
|-------------------|---------|--|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------|-------------------------------|
| T_{mean} | THF | 21 | 4,0 | 23 | 5 | 50,4 | 1384 \pm 288 |
| | DESS | 23 | 3,2 | 18 | 6 | 54,0 | 1354 \pm 266 |
| T_{min} | THF | 18 | 1,1 | 5 | 4 | 71,2 | 336 \pm 72 |
| | DESS | 20 | 1,1 | 4 | 4 | 71,7 | 334 \pm 72 |
| T_{max} | THF | 28 | 3,1 | 15 | 5 | 58,6 | 809 \pm 177 |
| | DESS | 27 | 4,1 | 23 | 8 | 54,4 | 1693 \pm 320 |

zu $T_{th}=18^{\circ}\text{C}$ an THF. Somit können diese Hitzeereignisse nur an der Station DESS im bebauten Innenstadtbereich auch mittels des klimatologischen Kenntages „Tropennacht“ erfasst werden, und es gehen rund 25 Prozent der hitzebedingten Todesfälle ($=334\pm 72$) auf Extremereignisse mit mehreren tropischen Nächten nacheinander zurück. Es muss jedoch beachtet werden, dass bereits unterhalb der Schwellenwerttemperatur von $T_{min}=20^{\circ}\text{C}$ mit einer erhöhten Mortalität gerechnet werden muss.

Für die Gesamtpopulation und die Bevölkerungsgruppe 65+ Jahre konnten statistisch hoch signifikante Ergebnisse ($p \leq 0.001$) für DESS und THF für alle drei Indikatortemperaturen erzielt werden. Hingegen zeigt die Gruppe 0–64 Jahre kaum statistisch eindeutige Zusammenhänge zwischen Hitze und Mortalität (beides nicht dargestellt).

Ausblick

Wie die vorliegende Studie zeigt, stellt sich die thermische Belastungssituation durch eine hohe Lufttemperatur innerhalb der Bebauungsstruktur anders dar als auf Freiflächen. Dies trifft insbesondere für die nächtliche Situation zu, da hier die Veränderung der bodennahen Atmosphäre durch die Stadt ausgeprägt ist. Hitzeereignisse (am Tag und in der Nacht) in Berlin können außerdem mit statistisch hoher Signifikanz mit einem erhöhten Mortalitätsrisiko in Verbindung gebracht werden. Nach Auswertungen der Weltgesundheitsorganisation für die Region Europa sind Hitzewellen (neben Erdbeben) für die meisten Todesfälle durch Naturkatastrophen verantwortlich (WHO 2007). Zusätzlich wird im Zuge des Klimawandels das Problem in den kommenden Jahrzehnten an Relevanz gewinnen, da mit großer Wahrscheinlichkeit die Anzahl, Dauer und Intensität von Hitzewellen zunehmen wird (Meehl, Tebaldi 2004; Zacharias et al. 2015). Auf den aus den WHO-Auswertungen angemahnten politischen Handlungsbedarf erwiderte die Europäische Union mit der Erarbeitung einer Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, die sich unter anderem auch die Reduzierung der Ausprägung von städtischen Wärmeinseln als Ziel gesetzt hat (EU 2013). Unabhängig davon reagierte die Bundesregierung auf die Auswirkungen der Anfang dieses Jahrhunderts in kurzer Abfolge aufgetretenen Extremwetterereignisse (Stürme, Hochwässer und Hitzewellen) mit dem politischen Rahmenprogramm „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel/DAS“ (BMU

2009), für welches der Schutz der menschlichen Gesundheit von besonderer Bedeutung ist. Mit dem „Aktionsplan Anpassung/APA“ zur DAS (BMU 2012) wurden erste konkrete Schritte eingeleitet.

Den bereits eingetretenen hitzebedingten Gesundheitsauswirkungen der jüngeren Vergangenheit stehen Projektionen gegenüber, nach denen bis zum Ende des Jahrhunderts bundesweit jährlich bis zu 8.500 zusätzliche hitzebedingte Todesfälle eintreten könnten (Eis et al. 2010). Dass in dicht bebauten Innenstädten lebende Menschen aus thermischer Sicht gefährdeter sind als solche, die im suburbanen Raum oder auf dem Land leben, hat diese Studie gezeigt. Es können drei Schlussfolgerungen gezogen werden:

- 1) Um Hitzebelastungen auf Menschen abzuschätzen, empfiehlt es sich zukünftig, nicht nur die Hitze während des Tages mit Hilfe des Indikators „Heiße Tage“, sondern auch die nächtliche Situation mittels der Kenngröße „Tropennacht“ zu berücksichtigen.
- 2) Um die Exposition und Belastungswirkung von Hitze auf die städtische Bevölkerung bestmöglich abschätzen zu können, sollten repräsentative Messstationen innerhalb des bebauten Stadtgebietes, in dem ein Großteil der Bevölkerung lebt, betrieben und deren Messungen für Analysen verwendet werden.
- 3) Die Indikatoren „Heiße Tage“ und „Tropennächte“ sind geeignet, um Hitzebedingungen zu erfassen, wohl wissend, dass beide Indikatoren Extremsituationen abbilden und aufgrund ihres absoluten Grenzwertes ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$, bzw. $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) Situationen, die direkt darunter fallen, vernachlässigen. Diese Situationen können jedoch bereits mit gesundheitlichen Belastungen beziehungsweise Beeinträchtigungen verbunden sein.

Der Kombinationsansatz dieser beiden Indikatoren sollte einerseits im Rahmen der DAS-APA-Indikatoren (für den Zeitraum 2016ff.) diskutiert und festgeschrieben werden, um bei Hitzewellen vulnerable Bevölkerungsgruppen noch gezielter und effektiver informieren und warnen zu können. Dies vor allem vor dem Hintergrund einer in naher Zukunft eintretenden, ausgeprägten Verschiebung in der demographischen Struktur mit einem Anstieg des relativen Anteils und der absoluten Anzahl alter beziehungsweise hochbetagter Menschen. Andererseits müssen

unsere Städte aus gesundheitlicher Sicht nachhaltig klimaresilient (um)gebaut werden. Dabei sollten insbesondere sogenannte „No-Regret-Maßnahmen“ in Betracht gezogen werden. Raum- und Stadtplanung sind aufgefordert, möglichst bald dem Trend der stetigen Zunahme der innerstädtischen Versiegelung entgegenzuwirken sowie mittels weiterer gezielter Maßnahmen unverzichtbare Beiträge zum Klimaschutz und zur gesundheitsbezogenen Klimaanpassung zu leisten (Kandarr et al. 2014). Dabei sind insbesondere die Erhaltung intakter Ökosystemleistungen sowie die Förderung weiterer Ökosystemleistungen in Städten von großer Bedeutung.

Danksagung

Diese Studie wurde in Teilen vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen 03DAS038B) sowie durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) als Teil der DFG-Forschergruppe 1736 „Urban Climate and Heat Stress in mid-latitude cities in view of climate change (UCaHS)“ (Förderkennzeichen SCHE 750/8-1 und SCHE 750/9-1) gefördert.

Literatur

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2013): Halbjährliche Bevölkerungszahlen für Berlin, unterteilt nach Geschlecht und Altersgruppen im Zeitraum 2000–2010, abgeleitet vom Melderegister.

Analitis A, Katsouyanni K, Biggeri A et al. (2008): Effects of Cold Weather on Mortality: results from 15 European Cities within the PHEWE project. In: *Am. J. Epidemiol.* 168 (12): 1397–1408. DOI: 10.1093/aje/kwn266.

Arnfield AJ (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban heat island. In: *Int. J. Climatol.* 23 (1): 1–26. DOI: 10.1002/joc.859.

BMU (2012): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin.

BMU (2009): Dem Klimawandel begegnen – Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel/DAS. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin.

Breitner S, Wolf K, Devlin RB et al. (2014): Short-term effects of air temperature on mortality and effect modification by air pollution in three cities of Bavaria, Germany: A time-series analysis. In: *Sci. Total Environ.* 485–486: 49–61. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.048.

DWD (2015): Klimadaten Deutschland. Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten_kostenfrei%2Fkldat__D_stationen_home__node.html%3F__nnn%3Dtrue (Abrufdatum: 05.01.2015).

DWD (2013a): Heiße Tage - langjährige Mittelwerte 1981-2010. Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/heissetage_8110_fest_html,templateId=raw,property=publicationFile.html/heissetage_8110_fest_html.html (Abrufdatum: 23.01.2015).

DWD (2013b): Heiße Tage - langjährige Mittelwerte 1961-1990. Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/heissetage_6190_fest_html,templateId=raw,property=publicationFile.html/heissetage_6190_fest_html.html (Abrufdatum: 23.01.2015).

EEA (2014): Corine Land Cover 2006 raster data. European Environmental Agency. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-3#tab-gis-data> (Abrufdatum: 08.01.2015).

Eis D, Helm D, Laußmann D, et al. (2010): Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut. Berlin.

EU (2013): Eine EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 16. April 2013. COM(2013) 216 final.

Fenner D, Scherer D, Meier F et al. (2014): Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. In: *Urban Clim.* 10 (2): 308–331. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.02.004.

Gabriel KM, Endlicher WR (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. In: *Environ. Pollut.* 159 (8-9): 2044–2050. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.016.

Hajat S, Kovats RS, Lachowycz K (2007): Heat-related and cold-related deaths in England and Wales: who is at risk? In: *Occup. Environ. Med.* 64 (2): 93–100. DOI: 10.1136/oem.2006.029017.

Jendritzky G, Koppe C (2014): Auswirkungen von thermischen Belastungen auf die Mortalität. In: Lozan J et al. (Hrsg.) *Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen.* Kap.3 (3.1.9), 1-7. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.

Jendritzky G (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher W, Gerstengarbe F-W (Hrsg.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke.* Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam: 108–118.

Jendritzky G, Fiala D, Havenith G et al. (2007): Thermische Umweltbedingungen. In: *promet Jahrg. 33, Biometeorologie des Menschen*, Nr. 3/4: 83–94. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Offenbach a.M.

Kandarr J, Reckert H, Mücke H-G (2014): Anpassung an die gesundheitlichen Risiken des Klimawandels als Aufgabe des umweltbezogenen Gesundheitsschutzes. In: *Bundesgesundheitsbl. 57 (10)*: 1209–1215. DOI: 10.1007/s00103-014-2056-7.

Kuttler W (2004): Stadtklima. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 16 (3)*: 187–199. DOI: 10.1065/uwfs2004.03.078.

Laschewski G, Jendritzky G (2002): Effects of the thermal environment on human health: an investigation of 30 years of daily mortality data from SW Germany. In: *Clim. Res. 21*: 91–103. DOI: 10.3354/cr021091.

Meehl GA, Tebaldi C (2004): More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. In: *Science 305 (5686)*: 994–997. DOI: 10.1126/science.1098704.

Mücke H-G (2014): Gesundheitliche Auswirkungen von atmosphärisch beeinflussten Luftverunreinigungen. In: Lozan J. et al. (Hrsg.) *Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen*. Kap. 3 (3.1.3), 1-7. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.

Oke TR (1982): The energetic basis of the urban heat island. In: *Q. J. R. Meteorol. Soc. 108 (455)*: 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502.

Scherer D, Fehrenbach U, Lakes T et al. (2013): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In: *Die Erde 144 (3-4)*: 238–259. DOI: 10.12854/erde-144-17.

SenStadt - Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2010): *Umweltatlas Berlin/Gebäude- und Vegetationshöhen 2009/2010*.

WHO (2007): Bedrohungen und Herausforderungen im Bereich Gesundheit in der Europäischen Region der WHO. Wachsende Zahl von Naturkatastrophen und Krisensituationen. Faktenblatt EURO/03/07 vom 2. April 2007. Weltgesundheitsorganisation. Regionalbüro Europa. Kopenhagen.

Zacharias S, Koppe C, Mücke H-G (2015): Climate Change Effects on Heat Waves and Future Heat Wave-Associated IHD Mortality in Germany. In: *Climate 3 (1)*: 100–117. DOI: 10.3390/cli3010100.

Kontakt

Daniel Fenner
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, Fachgebiet Klimatologie
Rothenburgstraße 12
12165 Berlin
E-Mail: daniel.fenner[at]tu-berlin.de

[UBA]