

 reviewed paper

Siedlungsgebundene Unterflur-Überwärmung und deren Risikopotenzial für Infrastruktur und Gesundheit

Sascha Henninger, Martin Fabisch

(Prof. Dr. Sascha Henninger, Technische Universität Kaiserslautern, Raum- und Umweltplanung, Physische Geographie, sascha.henninger@ru.uni-kl.de)

(Dr.-Ing. Martin Fabisch, Technische Universität Kaiserslautern, Raum- und Umweltplanung, Physische Geographie, martin.fabisch@ru.uni-kl.de)

1 ABSTRACT

Das Phänomen der siedlungsgebundenen Überwärmung ist äußerst vielschichtig. Entsprechend der Tatsache, dass die städtische Wärmeinsel (UHI) in ihrem horizontalen Erscheinungsbild als „einfache“ Lufttemperaturglocke dargestellt werden kann, zeigt sich, dass die oftmals als eine Einheit betrachtete UHI auch in der vertikalen Lufttemperaturverteilung mit zunehmender Höhe über Grund Modifikationen aufweist. Dementsprechend lassen sich grundsätzlich vier vertikale urbane Überwärmungsbereiche unterscheiden (Oberflächenwärmeinsel, Stadthindernisschichtwärmeinsel, Stadtgrenzschichtwärmeinsel, Unterirdische urbane Wärmeinsel), die sich in ihrer Intensität, dem zeitlichen Verhalten, der räumlichen Form und dem Grad ihrer Homogenität unterscheiden.

Von den oben genannten vertikalen Wärmeinseln ist die unterirdische die in der Fachliteratur bisher am geringsten beachtete. Wenig ist bisher bekannt über die Intensität und das räumliche Erscheinungsbild, ebenso wie über die individuellen Faktoren, die zur Entstehung dieser beitragen. Den physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen, meist künstlichen Baumaterialien folgend, wird durch die Aufheizung der Bodenoberfläche und Gebäude die Wärme nicht nur in die Atmosphäre, sondern auch in den Untergrund abgeleitet. Hieraus resultiert eine Überwärmung unter Grund, die einige Meter in den Boden hineinreichen kann. Je nachdem wie stark diese ausgebildet ist bzw. sollte die Untergrundversiegelung das Grundwasserniveau erreichen, ist die Überwärmung auch im Grundwasser nachweisbar.

Ein Risiko, welches die unterirdische Wärmeinsel in der Zukunft hervorrufen könnte, ist die entstehende „thermische Verschmutzung“ des Bodens. Vor allem der Wasserhaushalt, speziell die Versorgung mit Trinkwasser, spielt eine tragende Rolle, wenn der Frage nachgegangen wird, wie sich Veränderungen der Bodentemperatur auf das durch den Boden geführte Trinkwasser auszuwirken vermag.

Da der überwiegende Anteil der Trinkwasserleitungen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur liegt, der klimatopunabhängig am stärksten von der Erwärmung des Bodens betroffen sein wird, kann eine stetig steigende Bodentemperatur auf dem Niveau der Trinkwasserleitungen durchaus ein trinkwasserhygienisches Risikopotenzial darstellen.

Keywords: urbaner Wasserhaushalt, Infrastruktur und Gesundheit, urbane Wärmeinsel, Unterflur-Überwärmung, thermische Verschmutzung

2 EINLEITUNG

Die städtische Wärmeinsel (engl. *urban heat island*, UHI) ist der bekannteste und durch das Arbeitsfeld der Stadtklimatologie am besten erforschte und nachweisbare Effekt des Phänomens Stadtklima. Diese urbane Überwärmung weist sowohl vergleichsweise höhere Oberflächen- als auch Lufttemperaturen auf und offenbart damit einen signifikanten tages- und jahreszeitlichen Gang. Dieser Erwärmungseffekt hebt den wärmeren urbanen Siedlungsbereich teilweise vom kühleren ruralen Raum ab. Hier lässt sich durch die Betrachtung der Isothermen ein inselartiger Charakter dieses Effektes erkennen. Grundsätzlich erfolgt dieser Nachweis der urbanen Wärmeinsel sowohl über die vorherrschende Intensität der horizontalen positiven Temperaturdifferenz ($\Delta t = t_{\text{Stadt}} - t_{\text{Umland}}$) als auch durch den streckenbezogenen horizontalen Temperaturgradienten ($\Delta t_{\text{Stadt} - \text{Umland}} / \Delta t_{\text{Stadt} - \text{Umland}}$; Henninger & Weber, 2019).

Die Genese der städtischen Überwärmung ist jedoch sehr viel komplexer, als sie plakativ nur auf die Modifikation der Umgebungstemperatur zu reduzieren. Tatsächlich sogar ist die einfache Vorstellung dieses idealisierten räumlichen Erscheinungsbildes der UHI als Lufttemperaturglocke mit einer recht einfach gestalteten schematischen Struktur der sich ändernden Lufttemperaturverhältnisse vom urbanen Umland zum Innenstadtbereich irreführend. Der Stadtkörper ist ein zu komplexer und heterogener Raum, als dass er sich einfach in ein simples Schema fassen lassen würde. Aus dieser Heterogenität, nicht zuletzt hervorgerufen

durch den Wechsel unterschiedlichster Flächennutzungstypen, ergibt sich nicht nur eine Überwärmung. Vielmehr finden sich auch Bereiche innerhalb eines Stadtkörpers wieder, die einen eindeutigen Temperaturrückgang aufweisen. Viele Großstädte offenbaren zudem mehr als nur eine einzige Wärmeinsel innerhalb ihres urbanen Raumes. Abgesehen von einigen verhältnismäßig warmen, in der Regel dicht bebaute Flächennutzungen, geprägt durch Vielgeschossigkeit und schmale Straßenschluchten, finden sich ebenso kühlere Standorte, wie offene und/ oder begrünte Parkanlagen bzw. unbebaute Grundstücke. Tatsächlich ist die Temperaturverteilung innerhalb eines Stadtgebietes sehr viel aus- bzw. angeglicher, als dies immer wieder, v. a. außerhalb der wissenschaftlichen Fachcommunity, dargestellt wird. Die Genese einer urbanen Überwärmung ist nicht davon abhängig wie weit entfernt vom Stadtrand bzw. wie nah am Zentrum Messungen durchgeführt werden. Entscheidend ist vielmehr die direkte Umgebung, also die Frage nach dem Klimatop bzw. der Flächennutzung, des entsprechenden Standortes (Henninger & Weber, 2019).

3 URBANE WÄRMEINSELN

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt sind urbane Wärmeinseln durch diverse äußere Einflüsse in ihrem Erscheinungsbild gekennzeichnet. Neben der tages- und jahreszeitlichen Abhängigkeit (zeitliches Erscheinungsbild) ergibt sich zudem in Verbindung mit der Topographie und Struktur eines urbanen Raumes auch ein räumliches Erscheinungsbild.

3.1 Zeitliches Erscheinungsbild

Das zeitliche Erscheinungsbild einer urbanen Wärmeinsel lässt sich am deutlichsten während autochthoner Wetterlagen nachweisen. Diese zeitliche Ausprägung des urbanen Erwärmungseffektes bedingt eine enge Bindung an bestimmte Tages- und Jahreszeiten. Ganz charakteristisch für dieses Erscheinungsbild ist die höchste Intensität der UHI zwischen Juni und August, und erwartungsgemäß in der zweiten Nachthälfte - sehr gut nachvollziehbar am Beispiel der Abbildung 1 und in dieser Ausprägung sinnbildlich für mitteleuropäische Großstädte.

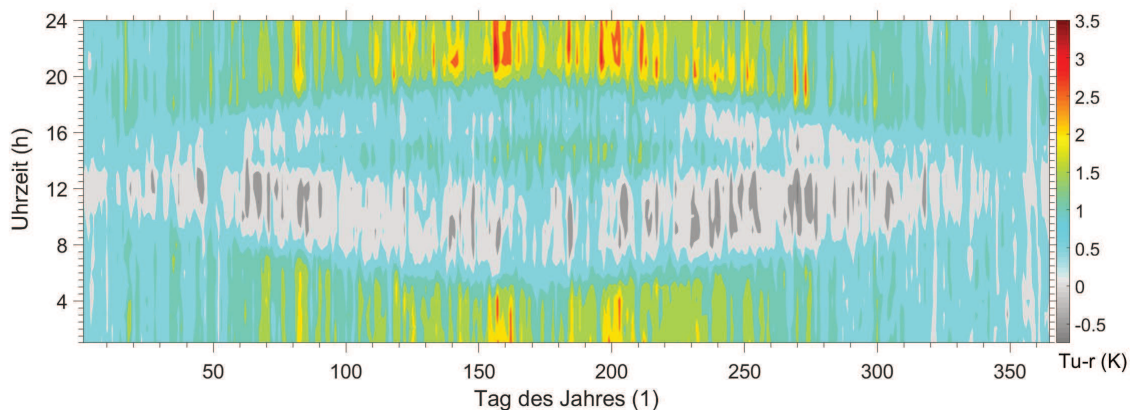


Abb. 1: Mittlerer zeitlicher Verlauf der Wärmeinselintensität (ΔT_{u-r}) in der Stadt Braunschweig am Beispiel der Lufttemperaturdifferenz eines Stadtstandorts und einem Umlandstandort (Datengrundlage: Stundenmittelwerte im Zeitraum 2012-2016; verändert nach Henninger & Weber, 2019).

3.2 Räumliches Erscheinungsbild

Am besten ist die städtische Wärmeinsel in ihrem räumlichen Erscheinungsbild während windstiller, nächtlicher Strahlungswetterlagen (autochthone Wetterlagen) nachzuweisen. Aufgrund der austauscharmen atmosphärischen Verhältnisse kann der konventionelle Nachweis der urbanen Wärmeinselintensität ($\Delta T = t_{\text{stadt}} - t_{\text{Umland}}$) durch die Temperaturdifferenz zwischen zwei Messpunkten ausgedrückt werden, wobei einer den städtischen und der andere die ländlichen Temperaturverlauf repräsentiert. In der Realität jedoch ist es oftmals schwierig entsprechend repräsentative Stadt-Umland-Messstellen zu finden, die von denselben mesoskaligen Wettereinflüssen beeinflusst werden. Die Klassifizierung eines Standortes entweder als urban oder rural ist daher immer als eine grobe Abgrenzung anzusehen und gibt letztendlich keinen Raum für eine akkurate Beschreibung der komplexen ruralen Verhältnisse bzw. der Flächennutzungstypen. Das Umland ist meist landwirtschaftlich geprägt (oder war es in der Vergangenheit). „Echte“ ländliche Klimamessstationen liegen daher meist in erheblicher Entfernung zur Innenstadt. Dies birgt das Risiko, dass mesoskalige Effekte zum Tragen kommen können, wie z. B. der Durchzug einer Kaltfront, und somit eine parallele, zeitgleiche

Analyse zwischen den urbanen und ruralen Temperaturverhältnissen erschwert wird. Auch darf in der Realität die Lage der Wärmeinsel nicht als absolut flächenscharf angesehen werden. Aufgrund der Beeinflussung durch die bodennahen atmosphärischen Austauschbedingungen kann eine windschwache Strahlungswetterlage die überwärmten Bereiche etwas verwischen und nicht 100%-ig deckungsgleich mit der bebauten Oberfläche sein. In vielen Fällen gut nachvollziehbar ist der Stadtrand. Infolge des Kaltluftzuflusses aus dem Umland entsteht ein kurviger, teilweise buchtenartiger Verlauf, der die Wärmeinsel umgibt, unabhängig vom gegenwärtigen Versiegelungsgrad (Henninger, 2011).

Dass die urbane Überwärmung bzw. die Stadt-Umland-Differenz auch in den Sommermonaten nicht immer gleich ausfällt in der Tatsache geschuldet, dass die thermischen und optischen Eigenschaften natürlicher bzw. künstlicher und versiegelter Oberflächen nicht gleich sind. Während eine urbane Oberfläche dazu neigt relativ homogen über der gesamten Fläche (verputzte Wand, Weg etc.) zu sein und sich die Eigenschaften über die Zeit wenig verändern, gilt dies jedoch nur in seltenen Fällen auch für rurale Oberflächen. Hinsichtlich der Betrachtung sowohl der thermischen als auch optischen Eigenschaften lassen sich zwei Punkte hervorheben, die die Inhomogenität der natürlichen bzw. naturnahen Oberflächen im Vergleich zu den naturfernen erklären:

- Veränderungen des Bodenfeuchtegehaltes durch infiltrierendes Niederschlagswasser: In der anschließenden Trocknungsphase kommt es zu Schwankungen der Bodenfeuchte. Dieser trocknet nicht an jeder Stelle gleich schnell ab. Dies wiederum bewirkt eine Veränderung der thermischen Leitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität, der Temperaturleitfähigkeit sowie der Wärmeaufnahme der Bodenoberflächen. All diese Größen spielen eine entscheidende Rolle für den Boden als thermischen Speicher und dessen Interaktion mit der bodennahen Atmosphäre. Ebenso ändert sich die Albedo des Bodens mit dessen Feuchtegehalt. Die einfallende solare Strahlung wird aufgrund der internen Reflektion an sog. Luft-Wasser-Schnittstellen zwischen den Bodenpartikeln und dem Porenvolumen der Zwischenräume „gefangen“, sodass die Albedo abnimmt, sollte die Bodenfeuchte ansteigen.
- Schwankungen der Albedo im jahreszeitlichen Gang der Vegetation einer Fläche: Das Reflexionsvermögen einer bewachsenen Fläche mit voller Belaubung ist typischerweise geringer als das von un- bzw. gering bewachsenen Böden.

Es ist nicht ganz einfach eine präzise Aussage darüber zu treffen welchen Einfluss die städtischen Materialeigenschaften auf die Wärmeinselintensität nehmen. Die Inhomogenität der urbanen Oberflächen sowie die große Variabilität der Eigenschaften ländlicher, naturnaher Referenzflächen erschwert einen direkten Vergleich. Dennoch kann allgemein festgehalten werden, dass das Ausmaß der urbanen Überwärmung reduziert werden kann, wenn stark absorbierende Materialien (Asphalt, dunkel gefärbte Dachziegel, etc.) in ausreichend hoher Quantität durch hellere und stärker reflektierende Materialien sowohl für die Dachbedeckung als auch den Bodenbelag ersetzt würden.

3.2.1 Überflurversiegelung und deren Auswirkung

Das Phänomen der urbanen Überwärmung ist im wahrsten Sinne des Wortes vielschichtig. Entsprechend der Tatsache, dass die städtische Wärmeinsel in ihrem horizontalen Erscheinungsbild nicht als einfache Temperaturglocke dargestellt werden kann (höchste Temperatur im Zentrum, geringste am Stadtrand), zeigt sich, dass die oftmals als eine Einheit betrachtete UHI auch in der vertikale Temperaturverteilung mit zunehmender Höhe über Grund Modifikationen aufweist. Dementsprechend lassen sich grundsätzlich vier vertikale urbane Überwärmungsbereiche unterscheiden, wobei die nach unten gerichtete unterirdische urbane Wärmeinsel nochmals gesondert betrachtet wird (s. Kap. 3.3).

Die einzelnen vertikal ausgerichteten Wärmeinseln unterscheiden sich in ihrer Intensität, dem zeitlichen Verhalten, der räumlichen Form und dem Grad ihrer Homogenität. Und obwohl die Genese das Ergebnis der Interaktion diverser physikalischer Prozesse ist, müssen diese nicht zwangsläufig gleichzeitig (zeitlich oder räumlich) zu beobachten sein:

- **Oberflächenwärmeinsel** (engl. *surface urban heat island*, UHI_{SFC})

Die Oberflächenwärmeinsel wird bestimmt durch die Oberflächentemperaturen und bildet sich, wenn die Temperaturen der urbanen Oberflächen höher sind als die der umgebenden ländlichen (natürlichen) Oberflächen. Sie ist flächenscharf ausgebildet (deckungsgleich mit den bebauten Flächen) und speziell während autochthoner Wetterlagen generell tagsüber am deutlichsten bzw. nachts schwächer ausgeprägt.

Die Messung der Oberflächentemperatur der UHISFC erfolgt im urbanen Maßstabsbereich mithilfe von Satellitendaten oder Befliegungen.

- **Stadthindernisschichtwärmeinsel** (*engl. canopy-layer urban heat island; UHI_{UCL}*)

Die Stadthindernisschichtwärmeinsel erstreckt sich zwischen Bodenoberfläche und mittlerer Dachhöhe. Verantwortlich für ihre Ausbildung sind die Oberflächenvergrößerung, die Energiefreisetzungen, die thermische Trägheit der Baukörper und eine verringerte effektive Ausstrahlung infolge der Horizonteinschränkung. Die UHIUCL ist nur bedingt deckungsgleich mit der bebauten Oberfläche. Typischerweise ist die Stadthindernisschichtwärmeinsel nachts zu beobachten (stabile atmosphärische Bedingungen, geringer Bedeckungsgrad und/ oder geringe Windgeschwindigkeiten). Am Tag ist sie nur sehr schwach ausgeprägt oder durchaus auch nicht existent. Grundsätzlich wird die Wärmeinsel der Stadthindernisschicht als positive Lufttemperaturdifferenz der bodennahen urbanen Luftschicht verstanden. Erfasst wird diese UHIUCL über ein Messnetz aus urbanen und ruralen Klimamessstationen und/ oder ergänzenden mobilen Messfahrten.

- **Stadtgrenzschichtwärmeinsel** (*engl. boundary-layer urban heat island; UHI_{UBL}*)

Die Stadtgrenzschichtwärmeinsel entsteht im Wesentlichen durch den turbulenten Wärmetransport von unten nach oben, teilweise jedoch auch in umgekehrter Richtung, erstreckt sich bis an die freie Atmosphäre und kann während der Tagstunden > 1.000 m mächtig sein, nachts jedoch bis auf wenige hundert Meter zusammenschrumpfen. Die Ausbreitung der Stadtgrenzschicht wird durch das übergeordnete Windfeld bestimmt. Mit der Folge, dass meist eine leewärtige Abdrift der urbanen Abluffahne entsteht. Die Dynamik und vertikale Ausdehnung der UHIUBL erfordert den Einsatz von Vertikalsondierungen mithilfe hoher Masten und/ oder bodengebundenen Fernerkundungsverfahren.

3.3 Unterflurversiegelung und deren Auswirkung

- **Wärmeinsel des urbanen Untergrundes** (*engl. subsurface urban heat island; UHI_{SUB}*)

Die vierte vertikal nachweisbare Wärmeinsel dehnt sich unter der Bodenoberfläche (u. Gr.) aus und wird als Wärmeinsel des urbanen Untergrundes bzw. unterirdische Wärmeinsel bezeichnet. Grundsätzlich ist die Entwicklung einer unterirdischen Wärmeinsel schnell erklärt: den physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen, meist künstlichen Baumaterialien folgend, wird durch die Aufheizung der Bodenoberfläche und Gebäude die Wärme nicht nur in die Atmosphäre, sondern auch in den Untergrund abgeleitet. Hieraus resultiert dann eine Überwärmung unter Grund, die einige Meter in den Boden hineinreichen kann. Je nachdem wie stark diese ausgebildet ist bzw. sollte die Erwärmung des Bodens aufgrund der Untergrundversiegelung das Grundwasserniveau erreichen, ist dieser Wärmeeffekt auch im Grundwasser nachweisbar (Müller et al, 2013a). Und genau an dieser Stelle wird die oftmals steifmütterlich behandelte unterirdische urbane Wärmeinsel interessant und dessen Modifikationen besitzen das Potential das urbane Leben durchaus nachhaltig beeinflussen.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Versiegelungsgrade und künstlicher Baumaterialien auf die Bodentemperaturen konnten bereits in den 1980er bzw. 1990er u. a. von Halverson & Heisler (1981) sowie Aseada & Ca (1993) nachgewiesen werden. Zudem wurde offenbar, dies zeigen Modellrechnungen, dass auch der Klimawandel in Zukunft eine gewichtige Rolle im Hinblick auf steigende Temperaturen im Boden spielen wird. Allerdings ist nicht alleine die Wärmeleitung der an der Bodenoberfläche absorbierten Strahlungsenergie in den Boden hinein verantwortlich für die Modifikation der Bodentemperatur. In Abhängigkeit der urbanen Unterflurversiegelung leistet auch die Wärmeleitung von Tiefgaragen, Tunnels, Kellern oder auch die Fernwärme aus dem Versorgungsnetz ihren entsprechenden Beitrag zum Temperaturanstieg des urbanen Bodens (Abb. 2). Somit sind die zunehmende Urbanisierung und der Klimawandel Hauptverursacher für die Erwärmung des Stadtbodens und damit auch für die beständige Entwicklung der unterirdischen Wärmeinsel (u. a. Zhu et al., 2010; Chow et al., 2011).

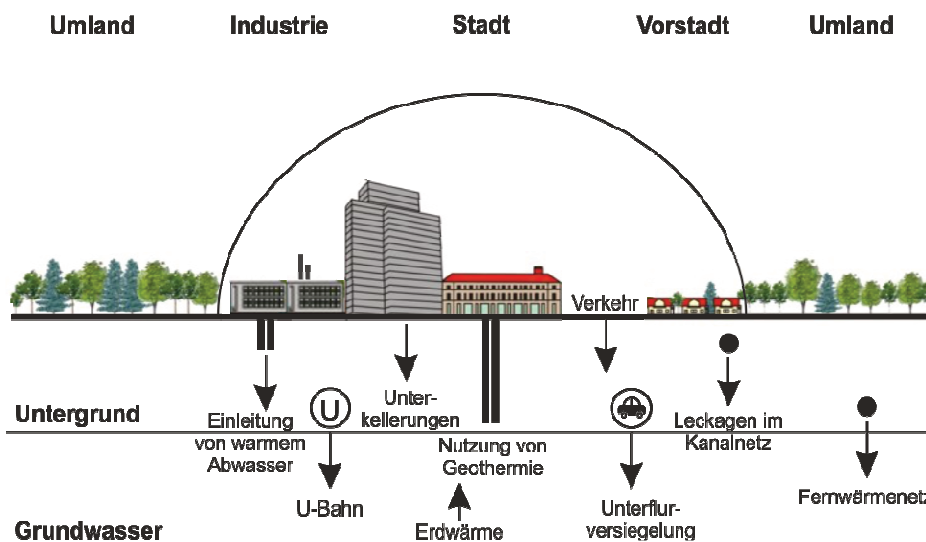


Abb. 2: Schematische Darstellung möglicher anthropogener und natürlicher Wärmequellen innerhalb eines urbanen Bodens (u. Gr.; verändert nach Henninger & Weber, 2019).

Ein Problem, das von der unterirdischen Wärmeinsel in der Zukunft hervorgerufen werden könnte ist die hierdurch sich entwickelnde „thermische Verschmutzung“ des Bodens. Vor allem der urbane Wasserhaushalt, speziell die Versorgung mit Trinkwasser, spielt eine tragende Rolle, wenn der Frage nachgegangen wird, wie sich eine Veränderung der Bodentemperaturen auf das durch den Boden geführte Trinkwasser auswirken vermag. Die Bereitstellung von sauberem Trinkwasser erfolgt in Deutschland unter strengen hygienischen Qualitätsstandards der Trinkwasserverordnung (s. dazu Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Trinkwasserverordnung, TrinkwV). Teilweise wird ein hoher technischer Aufwand betrieben, um das Wasser in einwandfreier Qualität dem Verbraucher zur Verfügung zu stellen (Kuttler et al., 2012). Und genau dieser Transfer des Wassers vom Erzeuger zum Nutzer bietet gegenwärtig ein großes Forschungsfeld, sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene, da jetzt und vor allem bei sich zukünftig ändernden klimatischen Vorzeichen, bekannt sein muss wie die Trinkwasserqualität auf ihrem Weg von A nach B potentiell beeinträchtigt werden kann. Mangelnde Aufbereitung von belastetem Wasser, das Aufkeimen durch bakterienverfügbare Nährstoffe und schwankende Desinfektionsmittelkonzentrationen sind bekannte Einflussgrößen. Der Auswirkung einer klimabedingten Erhöhung der Bodentemperaturen, die zu einer zu erwartenden Erwärmung des Trinkwassers im Verteilernetz (insbesondere schwach durchflossene Bereiche) führt, ist bisher noch nicht ausreichend beachtet und untersucht worden (Henninger & Weber, 2019).

Bereits Temperaturerhöhungen zwischen 1 K und 3 K resultieren in einer sprunghaften Vermehrung hygienisch relevanter Mikroorganismen, was im Umkehrschluss für die öffentliche Gesundheit eine wichtige Rolle spielen kann, da in Deutschland der überwiegende Teil der Versorgungssysteme ohne Desinfektion betrieben wird. Da der überwiegende Anteil der Trinkwasserleitungen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur liegt, also einem urbanen Raum, der klimatopunabhängig am stärksten von der Erwärmung des Bodens betroffen sein wird, kann eine stetig steigende Bodentemperatur auf dem Niveau der Trinkwasserleitungen durchaus ein trinkwasserhygienisches Gefährdungspotenzial darstellen (Müller et al., 2013a; Henninger & Weber, 2019).

Unterirdische Wärmeinseln lassen sich über die statistische Auswertung von Bodentemperatur, Bodenwärmestrom und Bodenfeuchte äußerst präzise nachweisen. Vergleichbar mit der oberirdischen Wärmeinsel kann die Intensität dieser Überwärmung aus der Berechnung der unterirdischen ($\Delta t = t_{\text{Stadtboden}} - t_{\text{Umlandsboden}}$) und oberirdischen Wärmeinsel ($\Delta t = t_{\text{Stadt}} - t_{\text{Umland}}$) erfassen werden. Besonders deutlich ist die Wärmeinsel in den Sommermonate ausgeprägt (Müller et al., 2013b). Differenzen von mehr als 5 K sind dabei keine Seltenheit. Im Winter hingegen ist sie nur schwach ausgebildet und erreicht ihr Minimum im Frühjahr. Ab Ende April/ Anfang Mai speichert der versiegelte Boden gegenüber dem Freilandboden wieder mehr an Energie und gibt die Wärme entsprechend wiederum verstärkt an den Boden ab. In Abhängigkeit der Bodentiefe tritt das Minimum der unterirdischen Bodenwärmeinsel erst auf, wenn die UHI über Grund schon annähernd ihr Jahresmaximum erreicht hat, was in diesem Zusammenhang die Verzögerung der Bodenerwärmung von „oben nach unten“ verdeutlicht (Abb. 3). Daher ist auch die geringste unterirdische

Bodenwärmeinselintensität nicht zum Zeitpunkt der kältesten Böden nachzuweisen, sondern in einer Phase in der sich die Bodenoberfläche bereits wieder erwärmt. Deutlich zeigt sich auch in diesem Zusammenhang, dass die oberirdische Wärmeinsel nicht durch die unterirdische beeinflusst wird, da die jeweiligen Maxima zeitlich versetzt zueinander auftreten. Der erwärmte Boden dient als Zwischenspeicher für die in den Boden hinein gerichtete Wärme, beeinflusst dann aber nicht den Temperaturverlauf der Luft (Henninger & Weber, 2019).

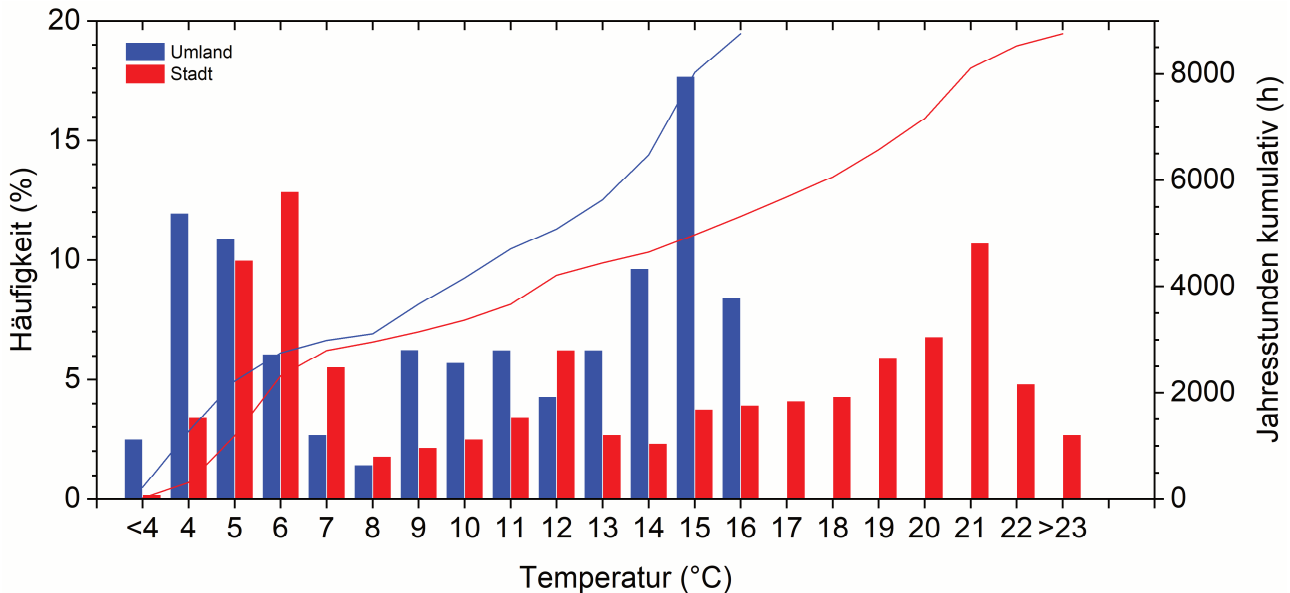


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Bodentemperatur (1,1 m u. Gr.) an einem Innenstadt- und Umlandstandort der Stadt Oberhausen. Darstellung: Bodentemperatur = prozentualer Anteil der Temperaturklasse an den Jahresstunden (Balken) und kumulative Jahresstunden (Linien) (verändert nach Henninger & Weber, 2019).

4 UHI IN DER SMART CITY

Eine Smart City kann viele unterschiedliche Ansätze zur Untersuchung und Visualisierung der städtischen Wärmeinsel bereithalten. Eine allgemeine Zusammenfassung der Möglichkeiten ist allerdings nur sehr schwierig möglich, da diese Potenziale sehr stark von den eingesetzten Smart City Lösungen bzw. den verbauten Sensoren abhängig sind. Deshalb wird an dieser Stelle nur beispielhaft auf einige Monitoring- und Visualisierungsmöglichkeiten der UHI(SUB) in der Smart City und die daraus entstehenden Vorzüge eingegangen.

4.1 Monitoring der UHI

Die Datenlage ist bei der Analyse der städtischen Wärmeinsel häufig ein Problem. Meist können die benötigten Daten nur durch aufwendige Messreihen erfasst werden. Zwar gibt es einige Ansätze die UHI mithilfe von Crowdsourcing-Daten zu analysieren, doch diese Methode ist bisher noch bei weitem nicht ausgereift, da meist die Standortbedingungen der zur Verfügung stehenden Sensoren (z. B. private Wetterstationen) nicht bekannt sind (Madelin, 2018).

Oftmals sind aber in einer Smart City in der Regel eine Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren verbaut, deren genaue Lage und damit verbunden die Umgebungsbedingungen bekannt sind. Auch wenn der eigentliche Zweck dieser Sensoren meist nicht die Erfassung der thermischen Bedingungen vor Ort ist, verfügen viele technische Geräte heutzutage über Temperatursensoren. Diese dienen üblicherweise zur Überwachung der technischen Bauteile (z. B. Batterien, Prozessoren) können aber auch grundsätzlich zur Beurteilung der thermischen Situation im Siedlungskörper verwendet werden. Zwar reicht die Genauigkeit und damit die Datenqualität solcher Sensoren nicht an die von geeichten Messgeräten heran, kann aber dennoch verwertbare Ergebnisse liefern (Droste, 2018). In der Praxis stehen dieser Verwendung allerdings zurzeit noch einige Hindernisse im Weg. Häufig ist die Datenschnittstelle zum Auslesen der Messgrößen, z. B. die Temperatur, für den Nutzer nicht offen zugänglich und die Verwendung durch den Hersteller nicht freigegeben (ESPRESSO, 2018).

Speziell für die Wärmeinsel des urbanen Untergrunds bieten sich als Monitoring- bzw. Messansätze Smart City Lösungen an, die diesen als Betrachtungsraum haben. Als Beispiel kann an dieser Stelle die Stadt Rotterdam aufgeführt werden. Hier wird an über 2.000 Messstellen im Stadtgebiet der Grundwasserstand zum Teil durch in-Situ-Messungen, in zunehmendem Maße aber auch durch smarte Sensoren überwacht und in einem 3D-Stadtmodell den Bürgern zur Verfügung gestellt. Diese Sensoren könnten, die technische Ausstattung vorausgesetzt, hochauflösende Daten über die Temperatur des Grundwassers und damit verbunden die Ausprägung der UHSUB liefern.

4.2 Visualisierung der UHI

Das Bewusstsein der Bürgerinnen und Bürger bezüglich lufthygienischer Bedingungen in der Stadt hat in den letzten Jahren durch die intensive Berichterstattung in den Medien zugenommen. Der städtischen Überwärmung, und hier in besonderem Maße der Unterflurüberwärmung, wird in der Berichterstattung deutlich weniger bzw. gar kein Raum eingeräumt. Hier bieten die Smart City Informationssysteme eine gute Möglichkeit die Bürgerinnen und Bürger über die thermischen Bedingungen im Siedlungskörper zu informieren, beispielsweise mittels der Integration von Stadtklimauntersuchungen in bestehende 3D-Stadtmodelle. Auf diese Weise könnten die Ergebnisse solcher Untersuchungen in optisch ansprechender Form visualisiert werden. Zusätzlich können solche Darstellungen dazu beitragen den Bürgern einfache stadtklimatische Zusammenhänge und deren Auswirkungen auf den Menschen zu erläutern.

Eine entsprechende technische Infrastruktur vorausgesetzt könnten diese Visualisierungen durch Echtzeitdaten erzeugt bzw. unterstützt werden. Hierzu müssten allerdings einige Anforderungen, z. B. ein dichtes Sensorenetz, zur Temperaturerfassung, Echtzeitdatenübertragung und –aufbereitung, erfüllt werden.

5 FAZIT

Urbanen Böden weisen bzgl. ihres Temperaturverhaltens ein eigenes ihnen typisches, standortspezifisches Verhalten auf. Vergleichbar mit den Jahresmittelwerten unterschiedlicher Klimatope (starke anthropogene Überprägung u. a. durch Zunahme der Flächenversiegelung = starke Erwärmung; Naturnähe = kühlere Temperaturen). Dementsprechend deckt sich die Bodentemperatur größtenteils mit der Lufttemperatur der Klimatope an deren Oberfläche. Aufgrunddessen muss trotz der Heterogenität von Böden dementsprechend von einer Beeinflussung des Temperaturverhaltens des Bodens durch die Klimatope ausgegangen werden. Denn hieraus entwickelt sich letzten Endes die meist gut ausgeprägte Wärmeinsel des urbanen Untergrundes.

Im Trinkwasserleitungsniveau erreichen die Bodentemperaturen Amplituden > 20 K. Bodentemperaturen von mehr als 20°C werden unter stark versiegelten Standort bzw. Oberflächen erfasst. Ein hoher Versiegelungsgrad offenbart somit aus thermischer Sicht potentielle Risikostandorte für eine daraus ableitbare Erhöhung der Trinkwassertemperatur. Da sich im Umkehrschluss ein Großteil der der Trinkwasserleitungen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur (Oberflächenversiegelung durch z. B. Asphalt, Stein, Schotter) befindet, sind solche Räume am stärksten von einer sommerlicher Erwärmung tangiert und bilden v. a. im Hinblick auf eine trinkwasserhygienische Fragestellung die Standorte mit einem erhöhten Gefahrenpotential für die Gesundheit der Bevölkerung.

Mit Blick auf die steigenden Anforderungen an eine klimaangepasste Stadtplanung ist die „thermische Verschmutzung“ des urbanen Bodens sicherlich ein weiterer Aspekt, der gegenwärtig und in der nahen Zukunft aufgegriffen und behandelt werden sollte. Nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund, dass durch den erwärmten Untergrund die Möglichkeit besteht u. a. die unterirdische Wärmegewinnung für eine geothermische Nutzung in Betracht zu ziehen (u. a. Miyakoshi et al., 2009).

6 LITERATUR

- ASEADA, T. & V. Ca: The subsurface transport of heat and moisture and its effects on the environment: a numerical model. In: *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 65, pp. 159-179, 1993.
- CHOW, T.T., Long, H., Mok, H.Y. & K.W. Li: Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables. In: *Energy and Buildings*, 43, pp. 3568-3575, 2011.
- DROSTE, A. M., Pape, J. J., Overeem, A., Cabrera, A. N., Zander, M., Steeneveld, G. J., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., & A. V. Delden: Exploring the Potential of Smartphone Temperature Measurements: Pushing into Finer Scales. In: *10th International Conference of Urban Climate*, 6. – 10. August 2018, New York, USA, 2018.
- ESPRESSO Project: Smart City pilot activity report (Rotterdam and Tartu), 2018.
- HALVERSON, H. & G. Heisler: Soil Temperatures under Urban Trees and Asphalt. In: *US Department of Agriculture, Forest Service: Research Paper NE-481*, 1981.

- HENNINGER, S.: Das Klima der Stadt. In: Henninger, S. [Hrsg.]: Stadtökologie. Bausteine des Ökosystems Stadt. Schöningh Verlag, Paderborn, 2011.
- HENNINGER, S. & S. Weber: Stadtklima. Schöningh Verlag, Paderborn, 2019.
- KUTTLER, W., Püllen, H., Düttemeyer, D. & A.B. Barlag: Unterirdische Wärmeinsel in Oberhausen – Untersuchung subterranner Wärme- und Energieflüsse in verschiedenen Klimatopen. In: dynaklim-Publikation, Vol. 23, 2012.
- MADELIN, M.: Intensity and Delimitation of the Night Urban Heat Island over the Paris Metropolitan Area from Crowdsourced and Remote Sensing Data. In: 10th International Conference of Urban Climate, 6. – 10. August 2018, New York, USA, 2018
- MIYAKOSHI, A., Hayashi, T., Kawai, M., Kawashima, S. & S. Hachinohe: Subsurface thermal environment change due to artificial effects in the Tokyo Metropolitan Area, Japan. In: 7th International Conference of Urban Climate, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan, 2009.
- MÜLLER, N., Kuttler, W. & A.B. Barlag: Analysis of the subsurface urban heat island (SUHI) in Oberhausen, Germany. In: Climate Research, Vol. 58, pp. 247-256, 2013a.
- MÜLLER, N., Kuttler, W. & A.B. Barlag: Counteracting urban climate change: adaption measures and their effects on thermal comfort. In: Theoretical and Applied Climatology, Vol. 115 (1-2), pp. 243-257, 2013b.
- ZHU, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.D. & P. Bayer: The geothermal potential of urban heat islands. In: Environmental Research Letters, Vol. 5, pp. 1-6, 2010.