

Urbane Wärmeinseln im Untergrund deutscher Städte

Urban heat islands in the subsurface of German cities

Kathrin Menberg¹, Peter Bayer², Kai Zosseder³, Sven Rumohr⁴, Philipp Blum¹

¹ Dipl.-Geol. Kathrin Menberg, Jun.-Prof. Dr. habil. Philipp Blum, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), kathrin.menberg@kit.edu, philipp.blum@kit.edu

² Dr. Peter Bayer, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), bayer@erdw.ethz.ch

³ Dr. Kai Zosseder, Technische Universität München (TUM), kai.zosseder@tum.de

⁴ Dr. Sven Rumohr, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), sven.rumohr@hlug.hessen.de

Zusammenfassung

Das Phänomen der urbanen Wärmeinsel (UWI) beschränkt sich nicht nur auf die Atmosphäre. Auch unter den Städten entstehen weit ausgedehnte Temperaturanomalien, die zur Erwärmung urbaner Grundwasserleiter führen. Die Ursachen und Prozesse, die zu diesem Temperaturanstieg führen, sind vielfältig. Gebäudekeller, Abwasserkanäle, Fernwärmeleitungen sowie solare Einstrahlung auf versiegelte Flächen stellen mögliche Wärmequellen dar. In vorliegender Arbeit wird die räumliche Verteilung der oberflächennahen Grundwassertemperaturen unter sechs deutschen Städten (Berlin, München, Frankfurt, Köln, Karlsruhe und Darmstadt) detailliert untersucht. In jeder der in dieser Studie untersuchten Städte existieren ausgeprägte positive Temperaturanomalien im Grundwasser. Die Temperaturverteilungen erweisen sich als räumlich und zeitlich sehr variabel. Offensichtlich führen sehr standortspezifische und oft lokal relevante Faktoren zu einem erhöhten Wärmeeintrag in den Untergrund. Langfristig führt die Überlagerung vieler solcher Wärmequellen zu flächenhaften Temperaturerhöhungen um mehrere Grad. Lokal begrenzt können durch besondere Wärmequellen (Kühlwassereinleitungen, Untertagebaustellen, Deponien, usw.) auch Temperaturen von über 20°C im Untergrund entstehen.

Schlüsselworte: Urbane Wärmeinsel, urbane Hydrogeologie, Grundwassertemperatur, Urbanisierung, Geothermie

Abstract

The phenomenon of urban heat islands (UHI) is not limited to the atmosphere. Also in the subsurface of the cities there exist widespread temperature anomalies that yield urban aquifers with higher groundwater temperatures. The causes and processes that lead to this temperature increase are manifold. Basements of buildings, sewers, district heating networks, reinjections of thermal waste water as wells as solar irradiation on paved surfaces act as possible heat sources. In this study the spatial distribution of shallow groundwater temperatures in six German cities (Berlin, Munich, Frankfurt, Cologne, Karlsruhe and Darmstadt) were investigated. In all studied cities vast positive temperature anomalies in the shallow groundwater were detected. The temperature distributions turned out to be spatially and temporally highly variable. Obviously there are many local and very site-specific factors that influence the increased heat input into the subsurface. In the long-term the superposition of numerous heat sources leads to the extensive spatial increase of groundwater temperatures in urban aquifers. Dominant heat sources, such as reinjections of thermal waste water, subsurface construction works and landfill sites, can even cause local temperature anomalies up to 20°C.

Keywords: Urban heat island, urban hydrogeology, groundwater temperature, urbanization, geothermics

1 Einleitung

Das Klima in Großstädten unterscheidet sich meist deutlich von dem im ländlichen Umland. Das Zusammenspiel vieler Faktoren, wie z. B. fehlende Vegetation, Wärmeabstrahlung von Gebäuden und Versiegelung führt zu einem urbanen Mikroklima mit erhöhten Temperaturen in der Atmosphäre (z. B. OKE 1973, LANDSBERG 1981, KUTTLER 2011). Während dieses Phänomen der städtischen Wärmeinseln weitreichend bekannt und erforscht ist, betrachtet man fast ausschließlich die atmosphärischen Effekte. Jedoch auch im Untergrund entstehen weit ausgedehnte Temperaturano-

malien, die sich dynamisch über Jahrzehnte entwickeln und sich ausgehend vom Stadtzentrum sowohl lateral als auch vertikal in die Tiefe ausbreiten. So haben Studien in schnell wachsenden Megastädten in Asien (z. B. TANIGUCHI & UEMURA 2005, TANIGUCHI et al. 2007), sowie in nordamerikanischen Städten (z. B. FERGUSON & WOODBURY 2007), eine signifikante Erhöhung der Untergrundtemperaturen in dicht besiedelten Ballungsräumen nachgewiesen. In Deutschland zeigten beispielsweise Untersuchungen in Berlin (HENNING & LIMBERG 2012), Köln (BALKE & KLEY 1981, ZHU et al. 2010) und München (DOHR 1989) einen Temperaturanstieg des Grundwassers um bis 6 K.



Die Wärmeinseln im Untergrund können sowohl negative als auch positive Folgen nach sich ziehen. Zum einen haben anthropogene Temperaturveränderungen erheblichen Einfluss auf den chemischen Stoffhaushalt (z. B. ARNING et al. 2006). Sie können die mikrobiologische Aktivität verändern und können schließlich die gesamte Grundwasserökologie steuern, was zu einer Qualitätsverschlechterung im Grundwasser führen kann (z. B. BRIELMANN et al. 2009, 2011). Zum anderen haben ausgedehnte Temperaturanomalien auch eine bisher kaum erkannte positive Seite: Sie repräsentieren ein enormes zusätzliches geothermisches Energie- und Speicherpotential (ZHU et al. 2010). Es kann durch oberflächennahe Geothermie als Wärmeenergie zum Heizen von Gebäuden oder anderen Bauwerken, z. B. zur Eis- und Schneefreihaltung auf Bahngleisen, Brücken und Straßen, genutzt werden. In Deutschland ist die Nachfrage nach Geothermie in den letzten Jahren erheblich gestiegen, und sie stellt bei der Gebäudeheizung mittlerweile eine der wichtigsten regenerativen Energietypen dar (z. B. SANNER et al. 2003, LUND et al. 2011). In der vorliegenden Arbeit wird die räumliche Verteilung der oberflächennahen Grundwassertemperaturen unter sechs deutschen Städten (Berlin, München, Frankfurt, Köln, Karlsruhe und Darmstadt) detailliert betrachtet.

2 Material und Methoden

2.1 Standorte

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die statistischen Daten der untersuchten Städte. Bei der Auswahl der Städte wurde darauf geachtet, ein breites Spektrum bei der Einwohnerzahl und damit der Stadtgröße abzudecken. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Auswahl ist der (hydro)geologische Untergrund der Städte. Für die Untersuchung der urbanen Wärmeinsel im Untergrund bieten sich vor allem Städte mit oberflächennahen, ergiebigen Grundwasserleitern an, da hier die Untergrundtemperaturen auf einfache Weise als Grundwassertemperaturen gemessen werden können.

Tab. 1: Statistische Daten zu den untersuchten Städten (STATISTISCHES BUNDESAMT 2012; DEUTSCHER WETTERDIENST 2012).

Tab. 1: Statistical data of the studied cities (FEDERAL STATISTICAL OFFICE 2012; GERMAN WEATHER SERVICE 2012).

| Stadt | Einwohner | Einwohnerdichte [#/km ²] | Fläche [km ²] | durchschn. Lufttemperatur [°C] |
|-----------|-----------|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Berlin | 3.515.473 | 3.861 | 891,5 | 8,9 |
| München | 1.330.440 | 4.282 | 310,7 | 9,2 |
| Köln | 998.105 | 2.463 | 405,2 | 10,0 |
| Frankfurt | 679.664 | 2.737 | 248,3 | 10,1 |
| Karlsruhe | 291.959 | 1.683 | 173,5 | 10,7 |
| Darmstadt | 143.332 | 1.174 | 122,1 | 10,2 |

2.2 Untersuchung der räumlichen Temperaturverteilung

Alle untersuchten Städte verfügen über ein dichtes Netzwerk von Grundwassermessstellen, die eine regionale Betrachtung der Grundwassertemperaturen ermöglichen. Für

die Analyse der räumlichen Verteilung der Grundwassertemperaturen in den einzelnen Städten wurden hauptsächlich schon vorhandene Messdaten verwendet. In Karlsruhe konnte auf Daten von täglichen Temperaturmessungen von Datenloggern, die in 82 Messstellen vom Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe betrieben werden, zurückgegriffen werden. Da die Messungen in einer Tiefe von 9-12 m durchgeführt wurden, unterliegen die erhobenen Grundwassertemperaturen aufgrund des Einflusses der variierenden Lufttemperatur jahreszeitlichen Schwankungen. In Abhängigkeit von der thermischen Diffusivität des Untergrundes sind diese saisonalen Schwankungen gewöhnlich bis in Tiefen von 15-20 m messbar (z. B. TAYLOR & STEFAN 2009). Daher wurden als möglichst repräsentative Werte zum Städtevergleich in der vorliegenden Studie die jährlichen Mittel der einzelnen Messstellen bestimmt (MENBERG et al. 2013). In Köln wurden die Daten aus 52 Messstellen aus der Studie von ZHU et al. (2010) übernommen. In München wurden Daten einer Messkampagne von 2009 verwendet. Die Grundwassertemperatur wurde dabei jeweils 1 m unterhalb der Wasseroberfläche gemessen, daher schwankt die Mess-tiefe unter Geländeoberkante entsprechend zwischen 2 m im Norden und circa 20 m im Süden des untersuchten Gebietes. In Berlin wurden 2010 Messungen der Grundwassertemperatur in 123 Messstellen von der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz durchgeführt (HENNING & LIMBERG 2012). Für den Raum Frankfurt wurden Temperaturdaten von insgesamt 27 Brunnen vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie zur Verfügung (HLUG) gestellt. In Darmstadt wurden Grundwassertemperaturen während einer Untersuchung der urbanen Hydrochemie von BEIER (2008) gemessen. Diese Messungen wurden in unterschiedlichen Tiefen zwischen 5 und 25 m durchgeführt. Deshalb wurden für die Studie nur Werte von 16 Brunnen mit einer Mindestdiefe von 20 m verwendet.

Um die Verbreitung der Grundwassertemperaturen räumlich darzustellen, wurden die Messdaten mit Hilfe von Geoinformationssoftware (ESRI® ArcGIS™, Version 10.0) interpoliert (MENBERG et al. 2013) und als Isothermenkarten dargestellt. Dabei kam die Interpolationsmethode „Kriging“ zum Einsatz (z. B. KITANIDIS 1997).

3 Ergebnisse und Diskussion

Die räumliche Verteilung der oberflächennahen Grundwassertemperaturen in den untersuchten Städten für unterschiedliche Jahre ist in Abbildung 1 dargestellt. Die angegebene Tiefe bezieht sich auf die Geländeoberkante. In allen Städten ist die Grundwassertemperatur in der betrachteten Tiefe räumlich sehr variabel. Die regionalen Unterschiede in den Temperaturen betragen dabei zwischen 4 K für Karlsruhe und im Falle von München bis zu 8 K. Jedoch zeigt sich in jeder Stadt ein klarer Trend der Erwärmung zur Innenstadt hin. Die niedrigsten Temperaturen wurden jeweils im Umland der Städte in Waldgebieten oder unter Ackerflächen gemessen. Mit 8-11°C liegen die Grundwassertemperaturen hier nahe des Jahresmittels der Lufttemperatur (Tabelle 1), was darauf schließen lässt, dass direkte anthropogene Einflüsse in diesem Bereich minimal sind.

In den Stadtrand- und Wohngebieten liegen die Temperaturen wenige Grad über dem Hintergrundwert. Das gleiche gilt für innerstädtische Grünanlagen und größere Freiflächen, wie z. B. das Flughafengelände Tegel in Berlin. Die höchsten Temperaturen mit 13-16°C werden in den meisten Städten (z. B. Köln, Berlin und München) im Bereich der Innenstadt gemessen. Eine Ausnahme bilden dabei die Städte Karlsruhe und Darmstadt.

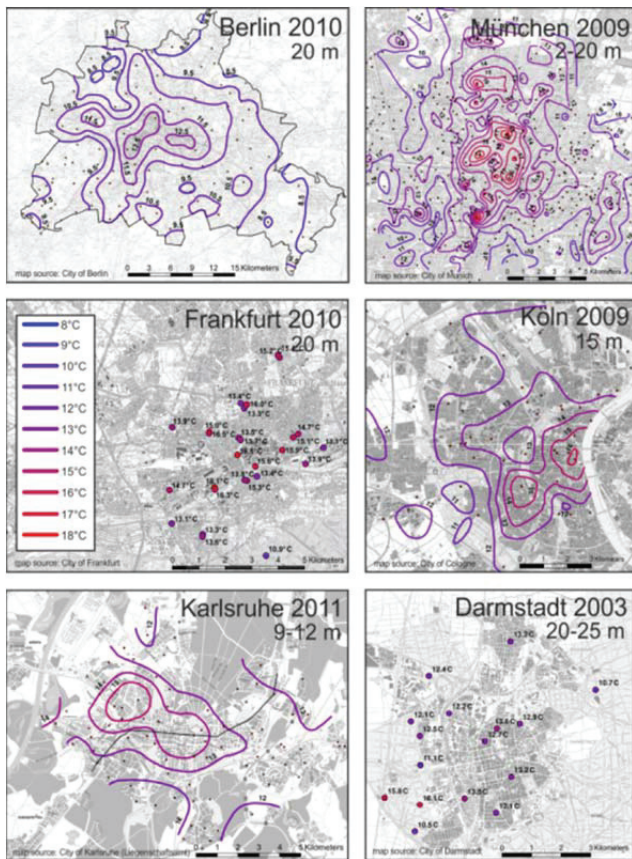


Abb. 1: Isothermen der Jahresdurchschnittstemperatur des Grundwassers in den untersuchten Städten. Die angegebene Tiefenlage der Isothermen bezieht auf die Geländeoberkante (nach MENBERG et al. 2013).

Fig. 1: Isotherm maps of the annual mean groundwater temperature in the studied cities. The indicated depths of the isotherms refer to the surface level (after MENBERG et al. 2013).

In Karlsruhe finden sich die höchsten Temperaturen mit über 15°C in einem Industriegebiet im Nordwesten der Stadt, in dem es mehrere bekannte Einleitungen von Kühlwasser ins Grundwasser gibt (MENBERG et al. 2013). Die gleiche Beobachtung kann auch im Westen von Berlin gemacht werden. Auch hier liegt eine lokale Erwärmung des Grundwassers im Bereich eines Industriegebiets, in dem sich außerdem ein großes Heizkraftwerk befindet. In Darmstadt wurden die höchsten Grundwassertemperaturen außerhalb des Stadtgebietes im Abstrom einer Mülldeponie gemessen (MENBERG et al. 2013).

Generell sind die in Abbildung 1 dargestellten Temperaturverteilungen ungleichförmig, was unter anderem durch die räumliche Dichte und die Tiefe der gemessenen Messstellen beeinflusst wird. Dieser Effekt ist in München am deutlichsten, da hier die Dichte an Messstellen deutlich höher ist als

in den anderen betrachteten Städten. Dies führt dazu, dass oft unterschiedliche Temperaturen eng beieinander gemessen werden, was die Interpolation der Daten und die bildliche Darstellung stark beeinflusst. Ein weiterer Grund für die Heterogenität der Temperaturverteilung im Untergrund sind die unterschiedlichen Wärmequellen, die zur Erwärmung des Untergrunds beitragen. Neben möglichen natürlichen Ursachen für lokale Temperaturanomalien, wie z. B. Unterschiede im geothermischen Wärmefluss oder lokale Grundwasserfließsysteme (z. B. TANIGUCHI & UEMURA 2005), gibt es eine Vielzahl an oberirdischen und unterirdischen Wärmequellen im urbanen Bereich, die sich auf die Temperaturverteilung im Grundwasser auswirken. Am häufigsten werden erhöhte Oberflächen- bzw. Lufttemperaturen (z. B. TANIGUCHI et al. 2007, TAYLOR & STEFAN 2009), sowie Wärmeverluste aus Gebäudekellern (FERGUSON & WOODBURY 2004) als mögliche Wärmequellen betrachtet. MENBERG et al. (2013) diskutieren weitere Wärmequellen im Zusammenhang mit der Stadtentwicklung und Bebauung, wie z. B. U-Bahn-Tunnel, Kanalisationssysteme, Leitungsverluste aus Fernwärmenetzwerken und auch Einleitungen von Kühlwasser.

4 Fazit

Die Untersuchung der räumlichen Verteilung von Grundwassertemperaturen hat gezeigt, dass in den untersuchten deutschen Städten ausgeprägte Temperaturanomalien im oberflächennahen Grundwasser mit lokal bis zu 20°C vorliegen. Der regionale Temperaturunterschied zwischen Umland und Innenstadt beträgt je nach Stadt bis zu 8 K. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturanomalien ist sehr heterogen, was darauf schließen lässt, dass viele lokale und standortspezifische Faktoren zu der Erwärmung beitragen. Die Überlagerung vieler solcher Wärmequellen führt schließlich zu einer flächenhaften Erwärmung des Grundwassers.

Literatur

- ARNING, E., KÖLLING, M., PANTELEIT, B., REICHLING, J. & SCHULZ, H. (2006): Einfluss oberflächennaher Wärmege-
 winnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. –
 Grundwasser **11**: 27-39.
- BALKE, K.-D. & KLEY, W. (1981): Die Grundwassertemperaturen
 in Ballungsgebieten. – Forschungsbericht, 91 S.,
 Bundesministerium für Forschung und Technologie, Köln.
- BEIER, M. (2008): Urbane Beeinflussung des Grundwassers:
 Stoffemissionen und -immissionen am Beispiel Darmstadts.
 – Dissertation. 291 S., Technischen Universität, Darmstadt.
- BRIELMANN, H., GRIEBLER, C., SCHMIDT, S. I., MICHEL, R. &
 LUEDERS, T. (2009): Effects of thermal energy discharge on
 shallow groundwater ecosystems. – FEMS Microbiology
 Ecology **68**: 242- 254.
- BRIELMANN, H., LUEDERS, T., SCHREGLMANN, K., FERRARO, F.,
 AVRAMOV, M., HAMMERL, V., BLUM, P., BAYER, P. &
 GRIEBLER, C. (2011): Oberflächennahe Geothermie und ihre
 potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. –
 Grundwasser **16**: 77-91.



- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2012): WebWerdis. Weather Request and Distribution System. <http://werdis.dwd.de/werdis> (zuletzt besucht am 02.08.2012).
- DOHR, F. (1989): Die Grundwassertemperatur im oberflächennahen Grundwasser des Stadtgebiets München. – Dissertation. 162 S., Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- FERGUSON, G. & WOODBURY, A. D. (2004): Subsurface heat flow in an urban environment. – *J. Geophys. Res. B Solid Earth* **109**: B02402 1-9.
- FERGUSON, G. & WOODBURY, A. D. (2007): Urban heat island in the subsurface. – *Geophys. Res. Lett.* **34**: L23713.
- HENNING, A. & LIMBERG, A. (2012): Veränderungen des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. – *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* **19**: 81-92.
- KITANIDIS, P. K. (1997): Introduction to geostatistics — applications to hydrogeology, 249 S., Cambridge (Cambridge University Press).
- KUTTLER, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich: Teil 1, Wirkungen. – *Environ. Sci. Europe* **23**: 1-12.
- LANDSBERG, H. E. (1981): The urban climate. – *International Geophysics Series* 28, 275 S., New York (Academic Press).
- LUND, J. W., FREESTON, D. H. & BOYD, T. L. (2011): Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. – *Geothermics* **40**: 159-180.
- MENBERG, K., BAYER, P., ZOSSEDER, K., RUMOHR, S. & BLUM, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. – *Sci. Total Environ.* **442**: 123-133.
- OKE, T. R. (1973): City size and the urban heat island. – *Atmos. Environ.* **7**: 769-779.
- SANNER, B., KARYTSAS, C., MENDRINOS, D. & RYBACH, L. (2003): Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. – *Geothermics* **32**: 579-588.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012): GENESIS Online Datenbank. <https://www.destatis.de> (zuletzt besucht: 20.07.2012).
- TANIGUCHI, M. & UEMURA, T. (2005): Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan. – *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **152**: 305 – 313.
- TANIGUCHI, M., UEMURA, T. & JAGO-ON, K. (2007): Combined Effects of Urbanization and Global Warming on Subsurface Temperature in Four Asian Cities. – *Vadose Zone J.* **6**: 591-596.
- TAYLOR, C. A. & STEFAN, H. G. (2009): Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. – *J. Hydrol.* **375**: 601 – 612.
- ZHU, K., BLUM, P., FERGUSON, G., BALKE, K.-D. & BAYER, P. (2010): The geothermal potential of urban heat islands. – *Environ. Res. Lett.* **5**: art. no. 044002.