

2.2 Einsatz von Satelliten zur Analyse des Stadtklimas

BENJAMIN BECHTEL, SUSANNE A. BENZ & ANDREAS WICKI

Die Entwicklung der satellitenbasierten Fernerkundung hat zu unserem Verständnis des Stadtklimas beigetragen und die Möglichkeiten zur flächendeckenden Erfassung revolutioniert. Dabei werden insbesondere zwei Arten von Satellitendaten verwendet. Zum einen können Oberflächentemperaturen und somit die städtische Oberflächenwärmeinsel mit thermaler Fernerkundung direkt vermessen werden. Zum anderen werden multispektrale Satellitenbilder und aktive LIDAR-Daten zur Charakterisierung der Stadtstruktur in verschiedenen Skalen genutzt. Diese Daten bieten relevante Informationen zur Modellierung des Stadtklimas.

Using Satellites to Analyse the Urban Climate. *The development of satellite based Earth Observation contributed to our understanding of urban climate and revolutionized the possibilities of large scale monitoring. Particularly two types of satellite data are used. Firstly, thermal infrared (TIR) sensors allow the direct observation of surface temperatures and therefore surface urban heat islands. Secondly, multispectral satellite images and active LIDAR sensors are used to observe the characteristics of urban surfaces at different scales. These data provide crucial information for urban climate models.*

Stadtklimatologische Studien zeichnen sich durch eine große Methodenvielfalt aus, wobei die Ansätze sich gegenseitig ergänzen und gemeinsam zu unserem Verständnis beitragen (Oke et al. 2017). Oft geht es dabei darum die spezifischen urbanen Effekte zu isolieren, weshalb andere Effekte ausgeblendet und kontrolliert werden müssen. Grundlegend können zwei Methodenkomplexe voneinander abgegrenzt werden: Beobachtung und Modellierung. Letztere zeichnet sich durch eine simplifizierte Repräsentation der urbanen Oberfläche in einem Miniaturmodell (physikalische Modellierung) oder im Computer (numerische Modellierung) (s. Kap. 2.1 SCHLÜNZEN et al. - in diesem Band) aus.

Modelle sind geeignet das Prozessverständnis zu fördern und Szenarien experimentell zu untersuchen. Sie geben in der Regel aufgelöste Informationen über die gesamte Domäne und können vergleichsweise leicht wiederholt und modifiziert werden. Gleichzeitig stellen Modelle nur eine Annäherung an die Realität dar und benötigen daher stets einer Evaluation sowie einer kritischen Betrachtung, ob sie für den jeweiligen Untersuchungszweck geeignet sind.

Beobachtungen sind dagegen näher an der Realität, haben jedoch zwangsläufig Messfehler und sind stets exemplarisch und lückenhaft. Für Messungen stehen eine große Anzahl unterschiedlicher Sensoren zur Verfügung, die in der Regel auf verschiedenen Plattformen (z.B. Stativ, Mast, Kran, Automobil, Fahrrad, Ballon) montiert sind, und die Atmosphäre unmittelbar vor Ort (= *in-situ*) beproben können. Diese Messungen können dabei fest installiert (= stationär) oder bewegt (= mobil) sein. Messnetze in Städten unterscheiden sich dabei von offiziellen meteorologischen Messstationen nach WMO-Standard, da Kriterien wie 2 m Messhöhe, Rasenfläche oder großer Abstand zu Gebäuden für die Stadt nicht repräsentativ sind und auch oft nicht eingehalten werden können. Häufig wird in Städten daher auf Messtürmen und/oder über Vertikalprofile gemessen, um der dreidimensionalen Stadtstruktur Rechnung zu tragen.

Neben den *in-situ*-Messungen kann ein gesamtes Stadtgebiet oder Teile davon aus der Ferne vermessen werden. Diese Technik nennt sich Fernerkundung und wird entweder von Satelliten oder erdnahen Flugobjekten wie Flugzeugen, Hubschraubern und zunehmend Drohnen betrieben. Es gibt dabei ebenfalls eine große Vielfalt von Verfahren, die sich in ihrer zeitlichen, spektralen und räumlichen Auflösung unterscheiden. Hier betrachten wir jedoch vorrangig bildgebende Verfahren, die von der Erde reflektierte oder abgestrahlte (= emittierte) elektromagnetische Strahlung räumlich aufgelöst messen. Damit können Oberflächeneigenschaften wie bspw. die Albedo (Rückstrahlvermögen) oder die Oberflächentemperatur bestimmt werden. Die Vorteile der Fernerkundung im Vergleich zu *in-situ*-Messungen sind die große Flächenabdeckung und die Gleichzeitigkeit. Nachteile sind die fehlende Kontinuität bzw. notwendige Kompromisse zwischen räumlicher und zeitlicher Auflösung und störende atmosphärische Einflüsse (besonders bei Wolkenbedeckung). Die Kosten für die Satellitenfernerkundung sind hoch, viele Erdbeobachtungsdaten sind jedoch frei verfügbar. Im Folgenden werden exemplarisch zwei wichtige Anwendungen von Fernerkundung in der Stadtklimatologie skizziert: die Verwendung thermaler Fernerkundung zur Messung der städtischen Wärmeinsel und die Verwendung multispektraler Fernerkundung zur Charakterisierung der Stadtstruktur.

Fernerkundung der städtischen Wärmeinsel

Physikalische Prinzipien

Thermale (engl. *thermal infrared*, TIR) Fernerkundung beschreibt die bildgebende und kontaktlose Messung der Erdoberflächentemperatur und spielt eine besondere Rolle in der Stadtklimatologie. Diese Messungen werden typischerweise in bestimmten Wellenlängenbereichen (3-5 oder 8-14 μm) durchgeführt. In diesen

»atmosphärischen Fenstern« kann ein großer Teil der terrestrischen Wärmestrahlung die Atmosphäre passieren. Grundsätzlich bestimmen das Emissionsvermögen ϵ und die Temperatur einer Oberfläche, wie viel Energie sie emittiert. Das spektrale Emissionsvermögen entspricht dabei dem spektralen Absorptionsvermögen – gute Strahler sind also auch gute Absorber. Wärmere Körper emittieren kürzere Wellenlängen. Sehr heiße Strahler wie Schmiedeeisen oder Glühlampen können sogar vom menschlichem Auge wahrgenommen werden. Temperaturen außerhalb dieses Bereichs können nur mit Messtechnik beobachtet werden.

Unterschiedliche TIR-Fernerkundungssysteme

Für die thermale Betrachtung von Landoberflächen werden in der Fernerkundung üblicherweise Sensoren auf polumlaufenden Satelliten wie NOAA-AVHRR, Sentinel-3 (COPERNICUS), ASTER, MODIS (beide auf den Satelliten Terra und Aqua) oder Landsat (momentan aktiv: Landsat 7 und 8) verwendet. Diese Satelliten befinden sich ca. 600-800 km über der Erdoberfläche und sehen daher jeweils nur einen kleinen Ausschnitt. Aufgrund der regelmäßigen Verfügbarkeit und der Kontinuität der Missionen bieten sie aber die Möglichkeit Untersuchungen zu reproduzieren und Veränderungen zu überwachen.

Diese Systeme betrachten unterschiedlich breite Streifen der Erdoberfläche (= Schwadbreite). MODIS erlaubt vier Betrachtungen eines Ortes pro Tag in ca. 1 km räumlicher Auflösung. Aus der enormen Schwadbreite von 2.330 km (entspricht der Strecke von Barcelona bis Istanbul) resultieren jedoch sehr flache Betrachtungswinkel an den Rändern. Systeme mit hoher Auflösung von rund 100 m wie ASTER oder Landsat haben dagegen eine nahezu senkrechte Ansicht und können auch in heterogenen Städten eingesetzt werden. Der Nachteil ist dabei die lange Dauer zwischen zwei Überflügen von 16 Tagen.

Eine andere Möglichkeit zur TIR-Fernerkundung sind geostationäre Wettersatelliten wie GOES-E/W oder Meteosat, die in einer Höhe von rund 36.000 km scheinbar ortsfest über dem Äquator stehen. Sie verfügen bei einer hohen zeitlichen Auflösung nur über eine grobe räumliche Auflösung (1-5 km) und haben in mittleren und hohen Breiten einen flachen Einfallswinkel.

Oberflächenwärmeinsel

Seit TIR-Daten verfügbar sind, stehen Städte im Fokus des Interesses. RAO erforschte bereits 1972 die thermale Eigenschaften der Städte an der US-Ostküste mit einer Auflösung von 7,4 km. ROTH et al. (1989) nutzten den polumlaufenden amerikanischen Wetter-

satelliten NOAA-AVHRR, um die Oberflächentemperatur der Städte Vancouver, Seattle und Los Angeles zu untersuchen. Trotz der eher groben Auflösung von 1 km erkannten sie einen Zusammenhang der Oberflächentemperatur mit der Landnutzung: Industriegebiete waren typischerweise wärmer als bewachsene Flächen, Küstengebiete oder Flussläufe.

Beschaffenheit urbaner Oberflächentemperaturen

Oberflächen wandeln die ankommende Energie entsprechend ihrer thermischen Eigenschaften verschieden um und erwärmen sich dadurch unterschiedlich stark. Asphalt und Beton nehmen bspw. bei gleicher Einstrahlung mehr Energie auf als vegetationsbedeckte Oberflächen. Wasser fließt auf versiegelten Flächen ab statt zu verdunsten, wodurch weniger Energie als latente Wärme abtransportiert wird (vgl. Kap. 1.1 KUTTLER - in diesem Band). Dadurch ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Oberflächentemperaturen einer Stadt und ihres Umlands, welcher als städtische Oberflächenwärmeinsel (engl. *surface urban heat island, SUHI*) bezeichnet wird.

Die feinskaligen Muster von Oberflächenwärmeinseln sind auf unterschiedliche Baumaterialien und die Bebauungsstruktur zurückzuführen. Helle Flächen mit hoher Albedo nehmen weniger Energie auf, entsprechend sind Hausfassaden in mediterranen Ländern oftmals weiß gestrichenen. Raue Oberflächen geben mehr Wärme an die Luft ab, glatte Oberflächen erwärmen sich hingegen stark. Zudem bestimmen Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme oder Wärmekapazität die Geschwindigkeit der Erwärmung sowie der Abkühlung. Die Temperatur einer Oberfläche ist dabei nicht mit der gespeicherten Energie gleichzusetzen. Eine sehr dünne Oberfläche erwärmt sich schnell, da sich die Energie auf ein kleines Volumen konzentriert. Auch bei einer Oberfläche mit geringer Wärmeleitfähigkeit wird wenig Energie an die unteren Schichten weitergegeben und sie erwärmt sich stark. Diese Oberflächen kühlen folglich in der Nacht relativ schnell aus, da sie nicht mit Energie aus dem Untergrund versorgt werden. Versiegelte Flächen mit einer hohen Wärmekapazität sind hingegen tagsüber nicht die heißesten Bereiche, bleiben jedoch nachts lange warm. Durch diese unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von künstlichen Oberflächen ergeben sich innerhalb des städtischen Raums ausgeprägte räumliche und zeitliche Muster der Oberflächentemperatur.

Die wärmsten Oberflächen einer Stadt sind tagsüber meist größere Industriekomplexe mit dünnen und oft metallischen Dächern sowie breite Gleisbetten.

Freie Dachflächen werden in der Regel nur wenig beschattet und sind der solaren Einstrahlung am stärksten ausgesetzt. Nach Sonnenuntergang können sie ungehindert ausstrahlen und somit abkühlen, was zu einer sehr großen Temperaturamplitude zwischen Tag und Nacht führt. Straßen weisen einen viel flacheren Tagesgang der Oberflächentemperatur auf, da sie tagsüber nicht den maximal möglichen Strahlungsinput erhalten und nachts durch umgebende Gebäude thermisch abgeschirmt werden (OKE et al. 2017). Gleiches gilt für das kleinteilige Stadtgefüge, welches sich typischerweise aus einer Vielzahl an Oberflächen und Formen zusammensetzt (Abb. 2.2-1). Die Umwandlung der Sonnenenergie ist dabei stark von der spezifischen städtischen Geometrie abhängig: in Richtung der Sonne orientierte Fassaden sowie Schrägdächer erwärmen sich stärker als schattige Nordwände.

Grenzen der urbanen TIR-Fernerkundung

Polumlaufende Satelliten mit hoher Auflösung geben ein vergleichsweise detailliertes Bild der Oberflächentemperaturen und thermalen Eigenschaften einer Stadt. Die meisten Gitterpunkte einer urbanen Satellitenaufnahme im TIR-Bereich setzen sich jedoch aus

unterschiedlichen Oberflächen zusammen (WICKI & PARLOW 2017). Ein weiteres Problem der TIR-Fernerkundung ist die Reduktion der Stadt auf eine zweidimensionale Fläche, die oft auch noch schräg gesehen wird (MITRAKA & CHRYSOULAKIS 2014). Die gemessene Oberflächentemperatur ist außerdem vor allem tagsüber stark richtungsabhängig (= anisotrop), da je nach Blickwinkel unterschiedliche Anteile von besonnten und schattigen Hauswänden, Dächern, Straßen etc. aufgenommen werden. Eine Stadt (auf der Nordhalbkugel) erscheint daher von Süden betrachtet wärmer als von Norden.

Unterflurwärmeinsel

Beschaffenheit urbaner Grundwassertemperaturen

Die Temperatur des Untergrunds nimmt in ungestörtem Zustand mit zunehmender Tiefe entsprechend des geothermischen Gradienten und geologischer Schichten zu (in Deutschland etwa 2,5 bis 3,5 K pro 100 m) (AGEMAR et al. 2012). Periodische Temperaturschwankungen sind nur nahe der Oberfläche erkennbar, mit zunehmender Tiefe schwächt sich die Amplitude ab und eine Phasen-

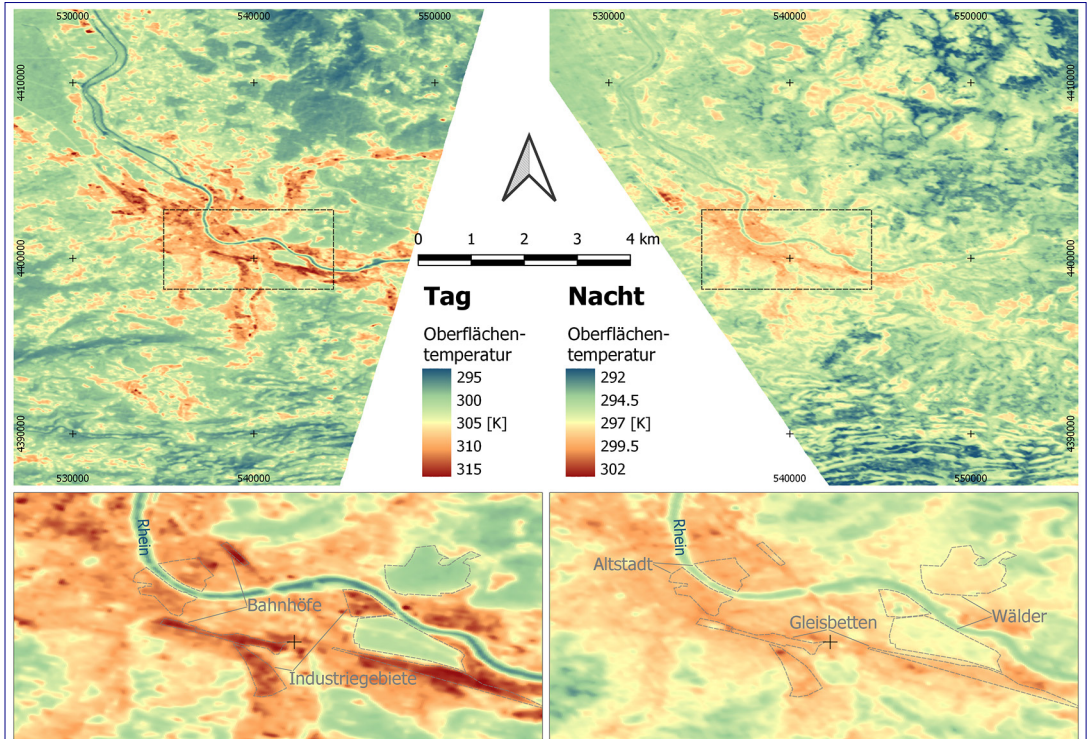


Abb.2.2-1: Oberflächentemperaturen der Stadt Basel und ihres Umlands (oben) vom 29. Juni 2019 (12 Uhr, links) und 26. Juni 2019 (23 Uhr, rechts), aufgenommen von Landsat 8 während einer ausgeprägten Hitzewelle. Die unteren Detailausschnitte zeigen das unterschiedliche thermische Verhalten einzelner Oberflächen.

verschiebung ist zu beobachten. Tageszeitliche Schwankungen sind oft schon ab wenigen cm Tiefe nicht mehr auszumachen, jahreszeitliche Schwankungen hingegen reichen bis in etwa 20 m Tiefe, abhängig von ihrer Stärke und der geologischen Zusammensetzung des Erdreichs. Daneben beeinflussen vertikaler und horizontaler Grundwasserfluss die Temperaturverteilung durch advektiven Wärmetransport. In Städten ist dieses Bild gestört. Temperaturen werden nicht allein von natürlichen Prozessen geprägt, sondern sind stark von anthropogenen Wärmequellen beeinflusst.

Dies führt zu einer Umkehrung des Tiefenprofils, in dem die Temperaturen nahe der Oberfläche deutlich erhöht sind (vgl. TANIGUCHI et al. 2005). Wie tief die Temperaturanomalie reicht, ist dabei neben Geologie und vertikalem Grundwasserfluss hauptsächlich vom Alter einer Stadt abhängig: Je älter die Stadt ist, desto tiefer reicht die Erwärmung. Bei horizontaler Betrachtung zeigen sich die sogenannten städtischen Wärmeinseln im Untergrund (engl. *subsurface urban heat islands*, *SubSUHI* in Kap. 1.1 *SUHI*). Temperaturen im Untergrund der Stadt sind meist deutlich höher als Temperaturen unter der ländlichen Umgebung, in deutschen Großstädten etwa um 1-3 K. Lokale Temperaturanomalien fallen jedoch deutlich höher aus – neben Tiefgaragen sind die Grundwassertemperaturen oft um mehr als 5 K erhöht (TISSEN et al. 2019). Diese können die Wasserqualität beeinträchtigen und verringern den Nutzen von Grundwasser zur Kühlung – eine in der Industrie häufig verwendete Methode. Allerdings bietet die im Grundwasser gespeicherte Wärme auch eine Chance auf nachhaltige Energiegewinnung durch Wärmerecycling. Mithilfe von oberflächennahen Geothermieanlagen könnte die urbane Wärme genutzt werden, um den winterlichen Heizbedarfs von Wohngebäuden in einer Stadt nachhaltig zu decken.

Ursache der *SubSUHI* ist eine Vielzahl anthropogener Wärmeflüsse in den Untergrund, die u.a. von den erhöhten Oberflächentemperaturen (siehe oben), Gebäudekellern, Fernwärme- und Abwassernetzen sowie Straßen- und U-Bahntunneln verursacht werden. Besonders große Wärmeflussdichten erzeugen lokale Wärmequellen wie etwa Fernwärmeleitungen, die Wärmeflussdichte aus erhöhten Oberflächentemperaturen ist dagegen vergleichsweise gering: Im stadtweiten Durchschnitt und Jahresmittel fließen etwa 0,2 Watt pro Quadratmeter unbebauter Oberfläche in den Untergrund. In Grünanlagen und unter Rasenflächen wird Wärme dagegen nicht von der Oberfläche an das Grundwasser abgegeben, sondern das Grundwasser heizt die Oberfläche auf. Auf die gesamte Stadtfläche bezogen stammt dennoch ein Großteil der im Unter-

grund gespeicherten Wärmeenergie von Gebäuden und versiegelten Oberflächen und damit der Oberflächenwärmeeinseln. Diese Wärmequellen erzeugen zwar einen kleinen Wärmefluss (pro Quadratmeter), in der Summe dominieren sie aber durch die hohe Anzahl an versiegelten und bebauten Flächen (BENZ 2016).

Fernerkundung von Grundwassertemperaturen

Eines der größten Probleme bei der Erforschung der *SubSUHI* ist der Mangel an Messdaten. Die Temperatur des Untergrunds wird vorwiegend als Grundwassertemperatur bestimmt und in Brunnen gemessen. Die bestehende Infrastruktur ist hierbei oft unzureichend oder nur schwer zugänglich und Neubohrungen sind vor allem im komplexen Untergrund von Städten teuer. Aus diesem Grund werden Grundwassertemperaturen in der Praxis oft anhand von Oberflächentemperaturen abgeleitet. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten.

Zum einen können Temperaturtiefenprofile anhand von Oberflächentemperaturzeitreihen modelliert werden. Diese detaillierte Analyse des Tiefenprofils ist in Städten durch die Vielzahl an komplexen Wärmequellen erschwert. Nur wenn Geologie, Hydrogeologie, langjährige Oberflächentemperaturen, langjährige Landnutzung, sowie Temperaturen und Alter der Gebäude bekannt sind, können auch Temperaturen in urbanen Gebieten verlässlich modelliert werden (bspw. RIVERA et al. 2015).

Zum anderen werden Grundwassertemperaturen flächendeckend mithilfe von Fernerkundung abgeschätzt. Nahe der Oberfläche kann der geothermische Gradient vernachlässigt werden und die Jahresdurchschnittstemperaturen gelten als tiefenunabhängig, d.h., dass in einem geschlossenen System Temperaturen an und unter der Oberfläche im Jahresmittel gleich sind. In einem offenen System sind Grundwassertemperaturen im Durchschnitt höher als durch *TIR*-erfasste Oberflächentemperaturen (Abb. 2.2-2). Der Offset beider Temperaturen wird im ländlichen Raum maßgeblich durch die Verdunstung (Evapotranspiration) und die Isolation des Untergrunds durch eine geschlossene Schneedecke bestimmt. Anhand dieses Zusammenhangs können globale Grundwassertemperaturen mit einem Fehler von 1,4 K bestimmt werden (BENZ et al. 2017). In Städten ist zusätzlich der Einfluss der oben genannten anthropogenen Wärmeflüsse zu beachten. Dabei werden bisher kleinskalige Wärmequellen oft vernachlässigt und die *SubSUHI* wird anhand von *TIR*-Daten und Gebäudedichte sowie ggf. Evapotranspiration und Schnee (BENZ 2016, HEMERLE et al. 2019) abgeschätzt. Diese Modelle erreichen eine Genauigkeit von etwa 1 K und ergeben damit oft ein re-

alistischeres Bild der innerstädtischen Variabilität als die einfache Interpolation der gemessenen Grundwassertemperaturen (Abb. 2.2-2).

Wärmeinsel der Stadthindernisschicht

Städte generieren durch ihre dreidimensionale Struktur, den hohen Versiegelungsgrad und die geringe Zahl von Grünflächen ihr eigenes Mikroklima. Typischerweise weisen Städte nachts eine mehrere Grad Celsius höhere Lufttemperatur auf als ihre ländliche Umgebung – auch bekannt als städtische Wärmeinsel (engl. *urban heat island*, *UHI*). Diese ist innerhalb der Stadt sehr heterogen verteilt. Die nächtlichen Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Land können im Mittel über das ganze Jahr hinweg beobachtet werden. Ihre stärkste Ausprägung weisen sie während langanhaltender Hitzewellen mit wolkenlosen Nächten, ausgeprägtem Strahlungsinput am Tag und wenig Wind (vgl. Kap. 1.1 KUTTLER - in diesem Band) auf.

Im Gegensatz zur Oberflächenwärmeinsel bildet sich die Wärmeinsel der Stadthindernisschicht (Luftschicht zwischen Boden und mittlerer Gebäudehöhe, engl. *canopy layer*) vorwiegend in der Nacht aus. Am Tag ist sie dagegen schwach ausgeprägt und verwan-

delt sich vereinzelt sogar in eine leichte Kälteinsel. Dies hat seine Ursache in den unterschiedlichen Energiebilanzen der urbanen und ruralen Umgebung (vgl. Kap. 1.1 KUTTLER - in diesem Band).

Fernerkundung der Lufttemperatur

Aufgrund dieser komplexen Prozesse müsste für die Bestimmung der Lufttemperatur mittels Satellitendaten eigentlich die komplette Energiebilanz gelöst werden. Wie bereits bekannt, darf die Oberflächentemperatur einer Stadt keineswegs mit der Lufttemperatur gleichgesetzt werden, sondern kann bestenfalls als Indiz für die tagsüber gespeicherte Energie dienen.

Ein wichtiger Proxy für die *canopy layer UHI* ist die Morphologie der Stadt, also ihre dreidimensionale Form. Eine offene, versiegelte Fläche erwärmt sich bspw. tagsüber sehr stark, gibt die Wärme jedoch abends auch rasch wieder ab. Dagegen speichert eine dichte innerstädtische Umgebung die Energie durch die Abschirmung und Gegenstrahlung von Häuserfassaden sehr gut. In Gebieten mit einem hohen Grünflächenanteil wird tagsüber mehr Energie für die Verdunstung aufgewendet und damit weniger gespeichert. Es besteht also ein konkreter Zusammenhang zwischen städtischer

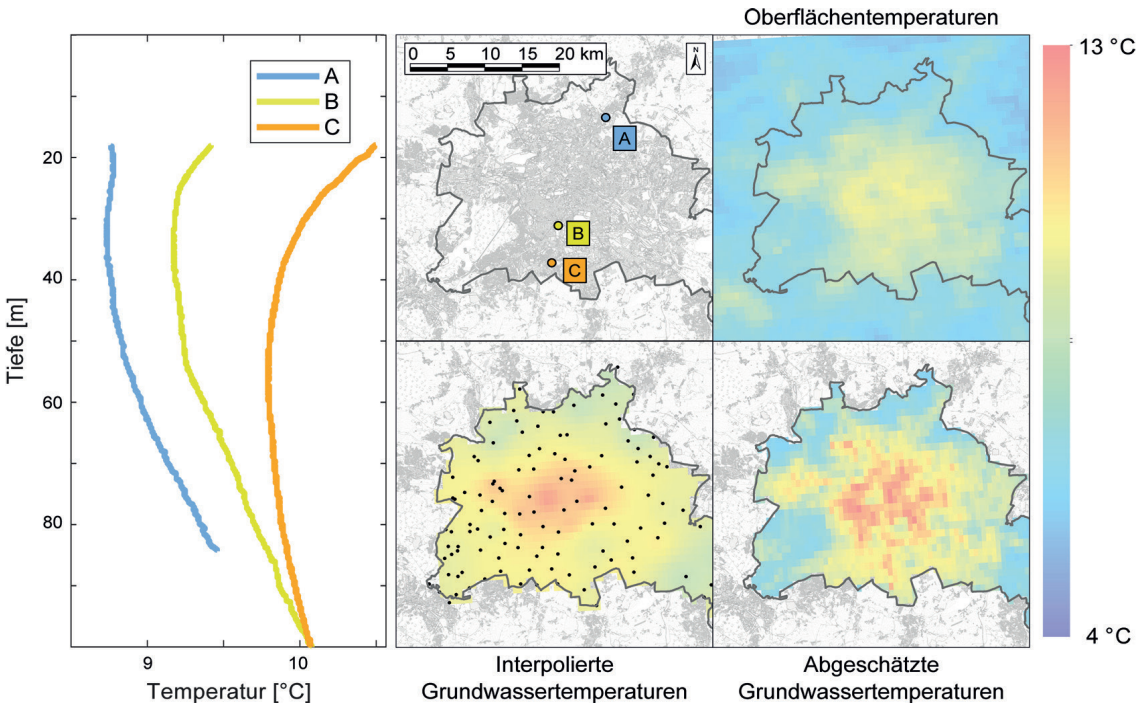


Abb.2.2-2: Grundwassertemperaturen im Stadtgebiet Berlin. Gezeigt werden drei Tiefenprofile A, B und C, sowie mehrjährige Mittel der Oberflächentemperatur, interpolierte Grundwassertemperaturen (schwarze Punkte: Brunnen) und anhand von Oberflächentemperaturen, Gebäudedichte, Schneedecke und Evapotranspiration abgeschätzte Grundwassertemperaturen (nach BENZ 2016, verändert).

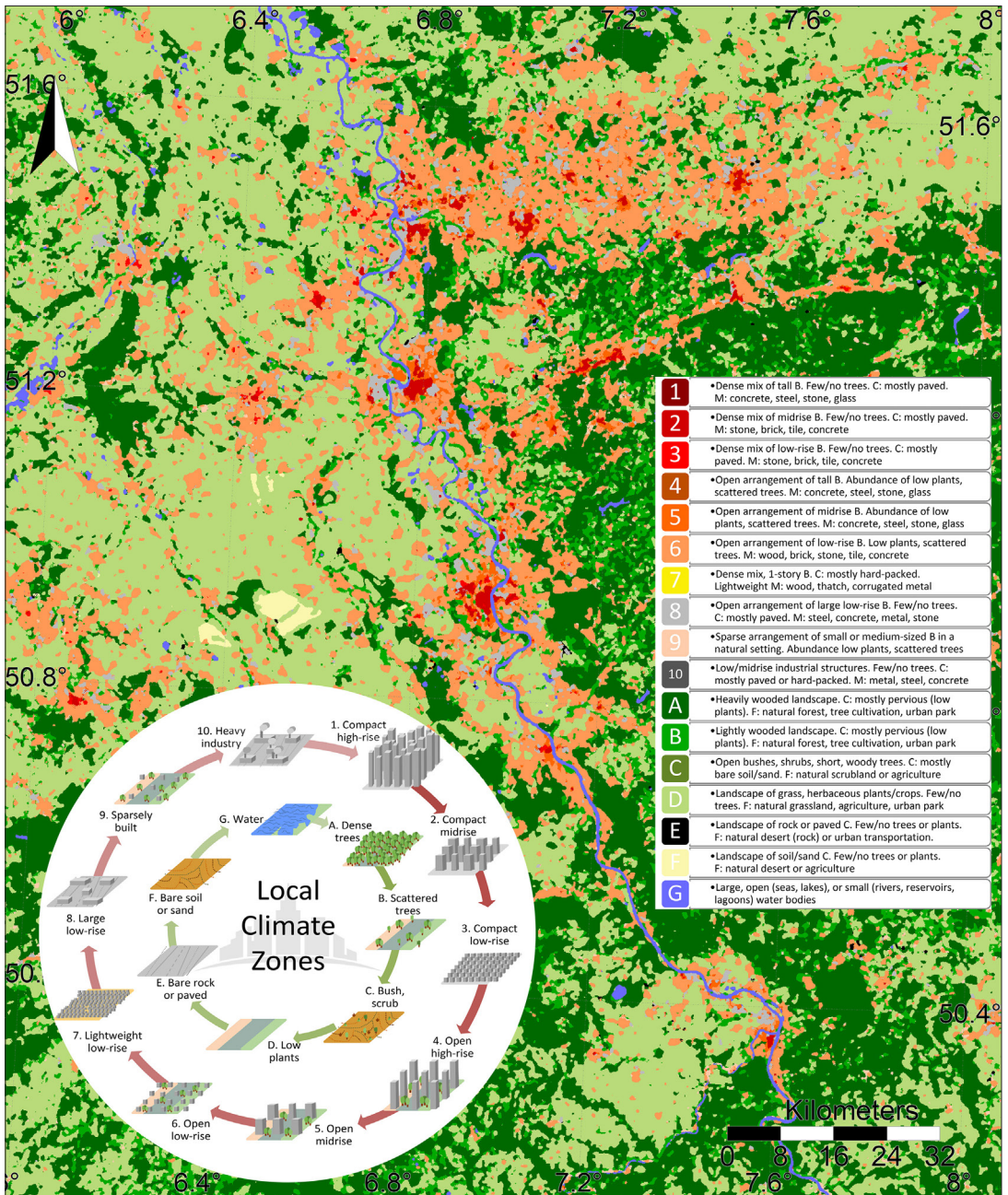


Abb. 2.2-3: Local Climate Zone (LCZ) Karte der Region Rhein-Ruhr. Städtische (1-10) und natürliche (A-G) LCZ-Typen und ihre Eigenschaften; B: Gebäude; C: Landbedeckung; M: Materialien; F: Funktion; nach BECHTEL et al. (2017). Daten aus DEMUZERE et al. (2019), gefiltert.

Bebauung und nächtlicher Temperaturverteilung (WICKI et al. 2018). Die Stadtstruktur wird dabei in Stadtklimamodellen durch Stadthindernisparameter (engl. *urban canopy parameters*, *UCP*) charakterisiert. Dazu gehören bspw. die Horizontüberhöhung oder Himmelssicht (engl. *sky view factor*), das Verhältnis von Höhe zu Breite einer Straßenschlucht, die komplette Oberfläche pro Grundeinheit, die Gebäudedichte, der Anteil an Grün- und sonstigen Versickerungsflächen, der Versiegelungsgrad, die Gebäudehöhe und die Rauigkeit. Im folgenden Abschnitt wird darauf eingegangen, wie diese Größen mittels Fernerkundung erhoben werden können.

Fernerkundung der Stadtstruktur

Ein zweites bedeutendes Feld zum Einsatz von Fernerkundungsdaten in der Stadtklimatologie ist die Charakterisierung städtischer Oberflächen. Während es mittlerweile eine große Anzahl von Stadtklimamodellen verschiedener Komplexität gibt, sind die benötigten Eingangsdaten oft nicht vorhanden oder inkonsistent. Dies ist besonders in der Mikroskala der Fall, in der jedes einzelne städtische Element (insbesondere Häuser, aber auch Bäume und Straßenmöblierung) in weitere Teile oder Facetten (engl. *facets*) wie Wände, Fenster, Dächer, etc. zerfällt und durch unzählige physikalische Eigenschaften charakterisiert ist. Daneben ist relevant wie die Stadt genutzt wird, um den Metabolismus und die Flüsse von Energie und Materie in die städtische Atmosphäre zu bestimmen. Stadtklimamodelle erfordern also hochwertige Informationen über Form und Funktionen der Stadt. Form bezieht sich dabei sowohl auf die Morphologie als auch auf die Baumaterialien und deren physikalischen Eigenschaften. Die Funktion bezieht sich auf die Nutzung der Gebäude und der Freiflächen und beinhaltet Informationen über anthropogene Emissionen von Wärme und Stoffen.

Stadtklimamodelle benötigen daher eine Datenbank mit Informationen zur Lage der physikalischen Elemente der urbanisierten Landschaft (Gebäude, Bäume, Parks, Straßen usw.) und den dazugehörigen anthropogenen Emissionen. Weiterhin müssten die räumlichen und zeitlichen Schwankungen berücksichtigt werden, die aus den tageszeitlichen, wöchentlichen und jahreszeitlichen Veränderungen der Vegetation und menschlicher Verhaltensweisen (z.B. des Heizverhaltens) resultieren. Diese Daten müssten in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen vorgehalten und für bestimmte Modelle maßgeschneidert werden, wobei diese stark vom Zweck und dem Design des numerischen Modells abhängen. Solche Daten sind aber in der Regel nicht aus amtlichen Quellen verfügbar und – falls doch – meistens inkonsistent.

Um diese Daten bereitzustellen, wurde daher die *World Urban Database and Access Portal Tools* (*WUDAPT*) Initiative gegründet. Sie verfolgt das Ziel, klimarelevante Informationen über städtische Gebiete zu erstellen, zu speichern und zu verbreiten (CHING et al. 2018). Dies geschieht in verschiedenen Detailstufen, die mit den Skalen stadtklimatischer Analyse in Zusammenhang stehen. Diese Stufen beginnen mit einer groben Beschreibung von Nachbarschaften (Level 0, Nachbarschaftsskala) und führen zu detaillierten, flächendeckenden und gerasterten *urban canopy parameters* (Level 1 und 2, Mikroskala). Die urbane Fernerkundung bietet gute Voraussetzungen, um solche Daten kostengünstig und flächendeckend zu erheben. Neben der Fernerkundung werden in *WUDAPT* weitere Methoden wie crowd sourcing und mobile Kartierung eingesetzt, die hier nicht näher betrachtet werden. Im Folgenden werden exemplarisch fernerkundungsbasierte Ansätze für die Nachbarschafts- und Gebäudeskala vorgestellt.

Local Climate Zone Kartierung

Auf der Nachbarschaftsskala kann die Stadt mithilfe von Satellitendaten und maschinellen Lernverfahren der künstlichen Intelligenz in lokale Klimazonen (engl. *Local Climate Zones*, *LCZ*, STEWART & OKE 2012) kartiert werden (BECHTEL et al. 2015). Diese Zonen sind generische Beschreibungen der Stadtlandschaft auf Nachbarschaftsskala (siehe *Abb. 2.2-3*).

Zur Bestimmung dieser Stadtstrukturen werden vor allem multispektrale Satellitendaten und teilweise Radardaten verwendet. In der *WUDAPT* Standardmethode (BECHTEL et al. 2015) werden dazu von lokalen Expert*innen Beispiele aller vorhandenen Zonen in der jeweiligen Stadt identifiziert. Mit diesen »Trainingsdaten« sowie multispektralen Satellitendaten von Landsat 8 oder Sentinel-2 »lernt« der Algorithmus spezifische spektrale Eigenschaften der einzelnen *LCZ*-Typen und verwendet diese anschließend, um eine vollständige Karte zu erzeugen. Diese wird anschließend mehrfach verbessert. Diese Karten können direkt in flächendeckende Stadtstrukturparameter wie Albedo, Gebäudehöhe oder Rauigkeit überführt werden. Zuletzt gab es eine sehr dynamische Entwicklung bei der Weiterentwicklung der Kartierungsmethoden mit modernen machine learning Verfahren (YOKOYA et al. 2018; YOO et al. 2019), die zu einer Verbesserung der Qualität und der Abdeckung großer Regionen führte (DEMUZERE et al. 2019).

3D-Stadtmodelle

Komplexere morphologische Parameter können flächendeckend aus 3D-Stadtmodellen abgeleitet werden. Der gebräuchlichste Ansatz zur Erstellung von Ge-

bäudemodellen ist die Vermessung mit Laserstrahlen (LIDAR) von Flugzeugen oder Hubschraubern (HAALA & BRENNER 1999). Dieses aktive Fernerkundungsverfahren liefert zunächst eine dreidimensionale Wolke von Oberflächenpunkten, woraus in zwei Schritten Gebäude extrahiert werden: Gebäudedetektion und Gebäuderekonstruktion. Die Gebäudedetektion wird häufig an gerasterten Gittern der Punktwolken durchgeführt, indem ein digitales Oberflächenmodell, ein Geländemodell und ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell erstellt werden. Daraus werden die offenen und erhöhten Bereiche abgegrenzt. Bäume und Gebäude werden entweder mithilfe von Form- oder Rauheitsparametern oder durch zusätzliche Informationen aus optischen Daten (Farbe, Textur) unterschieden. Die Gebäuderekonstruktion optimiert die digitale Darstellung jedes Gebäudes und rekonstruiert die Geometrie des Gebäudegrundrisses und des Daches. Typischerweise wird dafür eine Reihe von Annahmen getroffen, z. B. dass Wände vertikal sind und Dächer aus ebenen Flächen bestehen. Oft wird auch eine vordefinierte Bibliothek bekannter Dachformen verwendet, die an die Punktwolke angepasst werden (LI & GUAN 2011).

Fazit

Generell sind die Stadtstruktur und in Folge das Stadtklima durch eine hohe räumliche Heterogenität gekennzeichnet. Daher sind Messungen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erforderlich, um die kleinräumigen Unterschiede zu erfassen. Die Fernerkundung von Satelliten und Flugzeugen bietet dafür einen vielversprechenden Ansatz. Relevante stadtklimatische Effekte wie die Oberflächenwärmehinseln lassen sich direkt durch Fernerkundung beobachten. Die Überwärmung der städtischen Lufttemperatur lässt sich dagegen nur indirekt und daher sehr eingeschränkt von Satelliten messen. Dafür können durch Fernerkundung jedoch wichtige Informationen über die Stadtstruktur in verschiedenen Skalen (etwa *Local Climate Zones* oder 3D-Stadtmodelle) gewonnen werden, die als Eingangsdaten für Stadtklimamodelle dienen.

Literatur

- AGEMAR T., R. SCHELLSCHMIDT & R. SCHULZ (2012): Subsurface temperature distribution in Germany. - *Geothermics*, 44, 65-77.
- BECHTEL B., P. J. ALEXANDER, J. BÖHNER, J. CHING et al. (2015): Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. - *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 199-219.
- BECHTEL B., M. DEMUZÈRE, P. SISMANIDIS, D. FENNER et al. (2017): Quality of Crowdsourced Data on Urban Morphology. The Human Influence Experiment (HUMINEX). - *Urban Science*, 1(2), 15.

- BENZ S. A. (2016): Human Impact on Groundwater Temperatures. 155 S. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Bibliothek, Karlsruhe.
- BENZ S. A., P. BAYER & P. BLUM (2017): Global patterns of shallow groundwater temperatures. - *Environmental Research Letters*, 12(3), 034005.
- CHING J., G. MILLS, B. BECHTEL, L. SEE et al. (2018): WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. - *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(9), 1907-1924.
- DEMUZÈRE M., B. BECHTEL, A. MIDDEL & G. MILLS (2019): Mapping Europe into local climate zones. *PLOS ONE*, 14(4), e0214474.
- HAALA N. & C. BRENNER (1999): Extraction of buildings and trees in urban environments. - *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 130-137.
- HEMMERLE H., S. HALE, I. DRESSEL, S. A. BENZ et al. (2019): Estimation of Groundwater Temperatures in Paris, France. - *Geofluids*, 2019, 1-11.
- LI J. & H. GUAN (2011): 3D building reconstruction from airborne lidar point clouds fused with aerial imagery. - In: YANG X. (ed.): *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. 75-92.
- MITRAKA Z. & N. CHRYSOULAKIS (2014): Advanced satellite image fusion techniques for estimating high resolution land surface temperature time series. - *12th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, 2, 267-271.
- OKE T. R., G. MILLS, A. CHRISTEN & J. A. VOOGT (2017): *Urban climates*. 525 S. Cambridge University Press, Cambridge.
- RAO P. K. (1972): Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. - *Bulletin American Meteorological Society*, 53, 647-648.
- RIVERA J. A., P. BLUM & P. BAYER (2015): Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers. - *Applied Energy* 146, 421-433.
- ROTH M., T. R. OKE & W. J. EMERY (1989): Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. - *International Journal of Remote Sensing*, 10(11), 1699-1720.
- STEWART I. D. & T. R. OKE (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. - *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- TANIGUCHI M., T. UEMURA & Y. SAKURA (2005): Effects of urbanization and groundwater flow on subsurface temperature in three megacities in Japan. - *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(4), 320-325.
- TISSEN C., S. A. BENZ, K. MENBERG, P. BAYER & P. BLUM (2019): Groundwater temperature anomalies in central Europe. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104012.
- WICKI A. & E. PARLOW (2017): Multiple regression analysis for unmixing of surface temperature data in an urban environment. - *Remote Sensing*, 9(7), 684.
- WICKI A., E. PARLOW & C. FEIGENWINTER (2018): Evaluation and modeling of urban heat island intensity in Basel, Switzerland. - *Climate*, 6(3), 55.
- YOKOYANA, P. GHAMISI, J. XIA, S. SUKHANOV et al. (2018): Open Data for Global Multimodal Land Use Classification: Outcome of the 2017 IEEE GRSS Data Fusion Contest. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5), 1363-1377.
- YOO C., D. HAN, J. IM & B. BECHTEL (2019): Comparison between convolutional neural networks and random forest for local climate zone classification in mega urban areas using Landsat images. - *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 157, 155-170.

Kontakt

Prof. Dr. Benjamin Bechtel
 Geographisches Institut - Urban Climatology Group
 Ruhr-Universität Bochum - benjamin.bechtel@rub.de

Dr. Susanne A. Benz
 School of Global Policy and Strategy, Big Pixel Initiative,
 University of California San Diego
 sabenz@ucsd.edu

Dr. Andreas Wicki
 MCR Universität Basel und GEO Partner AG
 wicki@geopartner.ch

Bechtel B., S. A. Benz & A. Wicki (2019): Einsatz von Satelliten zur Analyse des Stadtklimas. In: Lozán, J. L. S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Städte*. pp. 66-73. Online: www.klimawarnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.10.