

# Ermittlung urbaner Überwärmungsbereiche auf der Basis multitemporaler Satellitendaten am Beispiel der Hansestadt Rostock

GÖRRES GRENZDÖRFFER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Datengrundlage für die Ermittlung urbaner Überwärmungszonen ist eine langfristige Auswertung der Oberflächentemperaturen der Stadt. Dazu sind über einen Zeitraum von 20 Jahren 47 Satellitenszenen (Landsat 5,7,8) der Sommermonate (Ende März – Anfang September) ausgewählt worden. Der langfristige Datensatz gewährleistet, dass die daraus abgeleiteten Überwärmungszonen auch stabil und aussagekräftig sind. Der Vergleich verschiedener jeweils fünfjähriger Perioden zeigt die zwischenzeitliche Veränderung der Oberflächentemperaturen im Stadtgebiet von Rostock. Da die Bodenbedeckung, bzw. Landnutzung einen Großteil der Überwärmung ausmacht, wird zusätzlich auf den Zusammenhang zwischen der Landnutzung und der Überwärmung eingegangen. Als Werkzeug dient dazu der Vergleich zwischen dem NDVI, d.h. einem Vegetationsindex, der auch sehr gut zwischen versiegelter und nicht versiegelter Fläche unterscheiden kann.*

## 1 Einleitung – urbane Überwärmungsbereiche

Bei der laufenden Diskussion um Klimaerwärmung, die etwaige Zunahme von Hitzestreß auch im Hinblick auf außergewöhnlich warme Sommer, rücken auch die so genannten Überwärmungsbereiche einer Stadt in den Fokus der öffentlichen Diskussion. Diese haben aber nur wenig mit der konkreten Hitzebelastung auf die Stadtbewohner zu tun. Diese konkrete bzw. gefühlte Hitzebelastung hängt nämlich von vielen individuellen Faktoren ab, beispielsweise von der Lage bzw. Exposition der jeweiligen Wohnung zur Sonne (Süd- vs. Nordseite), der baulichen Umgebung, der Dämmung, der Klimatisierung, dem gesundheitlichen Allgemeinzustand der betroffenen Person etc. Diese Differenzierung kann und will dieser Beitrag nicht leisten.

Vielmehr untersucht der Artikel auf einer gröberen Maßstabsebene den Wärmeinseleffekt anhand eines Beispiels, der Hansestadt Rostock. Damit sollen Bereiche und deren Veränderungen über einen Zeitraum von 20 Jahren identifiziert werden, die sich bei entsprechenden Wetterlagen, d.h. sonnige Sommertage, besonders erwärmen. Auch soll an dieser Stelle auf die durchaus positiven Wirkungen städtischer Überwärmung hingewiesen werden. Dazu zählen z.B. das Vorhandensein vieler wärmeliebender Pflanzen in den innerstädtischen Gärten und Grünanlagen in den gemäßigten Klimazonen und eine allgemein verlängerte Vegetationsperiode, die als positive Auswirkungen der Wärmeinsel gelten. Noch dazu sind die winterliche Frostperiode, die Frostintensität und die Schneedeckendauer durch die höheren Temperaturen in Agglomerationen erheblich verkürzt, was sich wiederum auf die Vegetationsentwicklung vorteilhaft auswirkt. Nicht zuletzt reduzieren sich dadurch auch die Heizkosten der (Innen-) Stadtbewohner. Eine bioklimatisch extrem negative

---

<sup>1</sup> Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, J.-v.-Liebig Weg 6,  
D-18059 Rostock, E-Mail: goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de

Wirkung hat die Überwärmung, wenn sich in den Sommermonaten abends und in der Nacht in der Innenstadt die Hitze staut und durch eine enge Bebauung kein Luftaustausch stattfinden kann. Die erste Feststellung aller Bearbeiter von Satelliten-Thermalbildern ist, dass sich (große) Städte aufgrund der erhöhten Oberflächentemperaturen in Satelliten-Thermalbildern als „hot spots“ zeigen. Die urbane Überwärmung nimmt dabei mit der Größe der Städte grundsätzlich zu. So werden im Jahresmittel durchschnittlich 0,5 bis 1,5 °C mehr gemessen. An windschwachen, wolkenarmen Tagen kommen Differenzen von 2-6 °C vor. Die urbane Wärmeinsel variiert lokal allerdings sehr stark, wobei die Bebauung, bzw. die Landnutzung einen erheblichen Einfluss darauf hat, ZHOU ET AL., 2018. Mit der Überwärmung wird auch viel Energie umgesetzt, die auch in Form von Wärmeströmen quantifiziert werden können, z.B. KATO, S. UND YASUSHI, Y. (2005). Allerdings können jegliche Temperaturdifferenzen schnell durch aufkommenden Wind aufgelöst werden, was für die Küstenstadt Rostock häufig zutrifft.

## 2 Multitemporale Satellitenbildauswertung

Zur Ermittlung der thermischen Überwärmung wird üblicher Weise eine einzige Thermalszene, bzw. eine Kombination aus einer Tag- und Nachtszene verwendet. Aufgrund verschiedener Einflussfaktoren (z.B. Jahreszeit, Vorwitterung, nicht perfektes Wetter bei der Thermalbefliegung, Atmosphäreneinfluss etc.) kann diese unter Umständen nicht repräsentativ sein. Aus diesem Grund ist ein Mittelwert über mehrere Szenen repräsentativer und darüber hinaus auch valider, denn der Mittelwert einer Zeitreihe beschreibt die thermische Überwärmung über einen längeren Zeitraum und nicht nur zu einem einzigen Zeitpunkt. Aus diesem Grund wurde eine Zeitreihe von thermalen Tagaufnahmen 1998 – 2018 gebildet. Diese lange Zeitreihe lässt darüber hinaus auch Rückschlüsse über die Veränderungen innerhalb der letzten 20 Jahre zu.

Die Landsat Satelliten überfliegen die Hansestadt Rostock in den Orbits 193 und 194 etwa alle 8 Tage, so dass maximal für die Sommermonate (Ende März – Anfang September) ca. 15 Szenen pro Jahr aufgenommen werden können. Da Wolken sehr häufig den freien Blick zur Erdoberfläche behindern konnten für den Zeitraum von 1998 bis 2018 jedoch nur insgesamt 47 wolkenfreie Landsat-Szenen der Monate (Ende) März – (Anfang) September identifiziert werden. Auswahlkriterien waren in erster Linie Wolkenfreiheit, was auch Schleierwolken oder Nebel miteinschließt. So kann es passieren, dass in einem Jahr nur eine wolkenfreie Satellitenszene zur Verfügung steht und einem anderen Jahr fünf Szenen.

Über diesen langen Zeitraum sind Thermaldaten der Landsat Satelliten 5, 7 und 8 verwendet worden. Bei der Abtastung des Landsat 7 Satelliten, kam es im Jahr 2003 zu einem Ausfall der Scanwinkelkorrektur. Das bedeutet, dass in den nach dem Jahr 2003 aufgenommenen Szenen Daten fehlen und sich dies in Form von Streifen von 1 – 20 Pixel Breite bemerkbar macht. Aus diesem Grund wurden von diesem Satelliten so wenige Szenen wie möglich verwendet. Landsat 8 liefert seit 2013 Daten. Obwohl die an Bord der Satelliten befindlichen Thermalsensoren mit einer Bodenauflösung von 120 m bei Landsat 5, bzw. 60 m bei Landsat 7 und 100 m für Landsat 8 prinzipiell ähnliche Spezifikationen aufweisen, sind die Daten (Temperaturen) der drei Satelliten nicht direkt vergleichbar, bzw. müssen unterschiedlich aufbereitet werden, um aus ihnen vergleichbare Oberflächentemperaturen abzuleiten (PARASTATIDIS et al. 2017).

Der Download der bereits auf die Oberflächentemperatur korrigierten Thermaldaten erfolgte über die Webseite: [http://rslab.gr/downloads\\_LandsatLST.html](http://rslab.gr/downloads_LandsatLST.html). Diese Webseite greift auf die Google Earth Engine zu und nutzt die Metadaten zu den Satellitenszenen, um in wenigen Schritten die Grauwerte (DN) in Strahldichten umzurechnen, die Strahldichten anschließend in Strahlungstemperaturen umzuwandeln und unter Berücksichtigung der aus einem Vegetationsindex NDVI die Emissivität der Oberflächen (LSE) zu berechnen. Darauf aufbauend kann abschließend die Oberflächentemperatur (engl. LST, bzw. Land Surface Temperature) zuverlässig geschätzt werden. Die Abweichungen zwischen der berechneten Oberflächentemperatur und am Boden gemessenen Werten sind üblicher Weise  $< 3^{\circ}\text{C}$  (PARASTATIDIS et al. 2017).

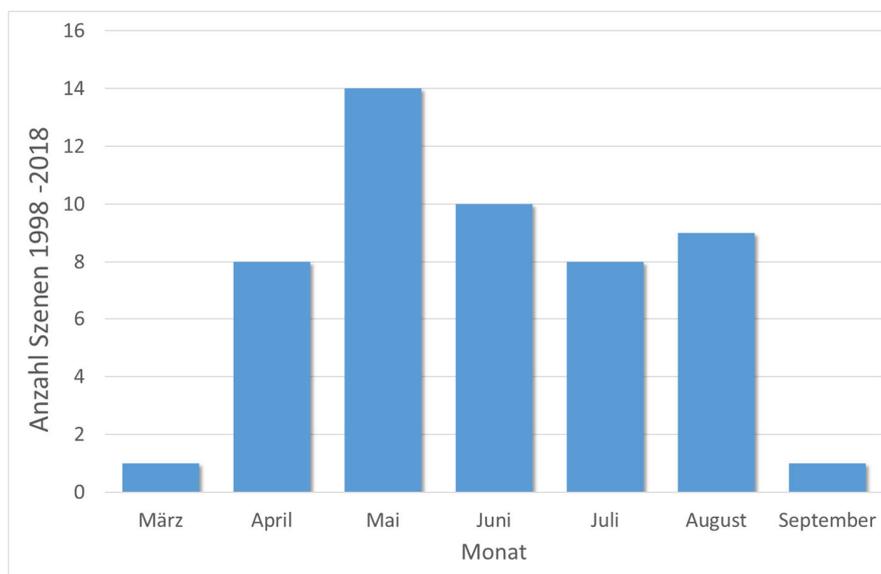


Abb. 1: Aufnahmemonate der 47 Thermalszenen der Zeitreihenanalyse von 1998 - 2018

Anhand der zeitlichen Verteilung der in die Analyse aufgenommenen Satellitenszenen über die Monate sieht man, dass in Rostock gerade der Mai häufig Wolkenfreiheit gewährleistet und der Juli normalerweise der Monat mit den meisten Wolkentagen ist, was dazu führt, dass in diesem Sommermonat die wenigsten Aufnahmen in die Zeitreihenanalyse aufgenommen werden konnten (Abb. 1).

Grundsätzlich sind die Oberflächentemperaturen, die aus der Satellitenperspektive gemessen werden, in erster Linie eine Funktion der Einstrahlung, die im Laufe des Jahres erheblich schwankt, vgl. Abb. 2. Wie aus der Abb. 3 ersichtlich ist, steigen aufgrund der geographischen Lage Rostocks, die Mittelwerte der Landoberflächen bei Sonnenschein, wie er auch auf den Satellitenbildern zu sehen ist, im Jahresgang ab dem Mai stark an. Wie aus Abb. 3 ebenfalls deutlich wird, können die Lufttemperaturen innerhalb eines Monats durchaus schwanken.

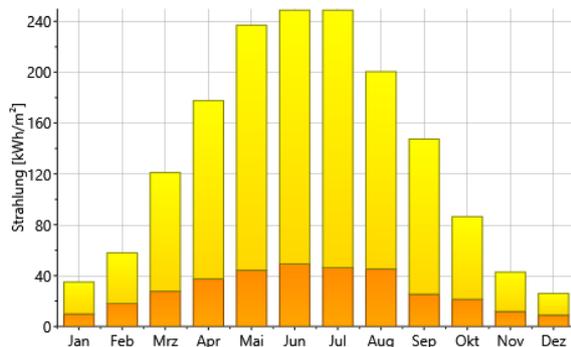


Abb. 2: Einstrahlung im Jahresverlauf bei Schönwetterlagen für Rostock (Meteonorm)



Abb. 3: Jahresgang der Lufttemperatur für Rostock bei Schönwetterlagen (30 Jahresmittel 1980 – 2010), Quelle DWD u. Meteonorm

Nun stellt sich die Frage, ob und inwieweit die in den Satellitenszenen gemessenen Oberflächentemperaturen auch mit dem Strahlungs- und Temperaturverlauf der Luft übereinstimmen. Um das zu untersuchen wurden jeweils 20 Punkte mit bekannter Landnutzung (Industrie, Innenstadt, Großwohnsiedlung, Grünland und Wald) bestimmt. Anschließend wurden die Oberflächentemperaturen aller Szenen abgegriffen und dem Datum nach sortiert (Abb. 4).

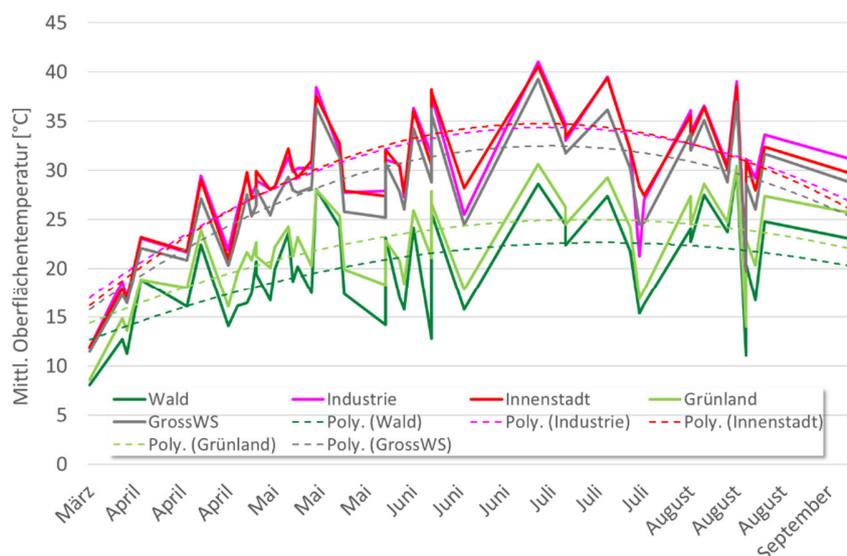


Abb. 4: Jahreszeitlicher Verlauf der Oberflächentemperaturen aus 47 Landsat Szenen von 1998 – 2018 in Abhängigkeit der Landnutzung

Wie aus der Abb. 4 gut zu erkennen ist, schwanken die gemessenen Oberflächentemperaturen im Jahresgang und zwischen den Szenen deutlich. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, da diese nicht nur von der Einstrahlung abhängen, sondern auch vom vorhergehenden Witterungsverlauf, der Feuchte, atmosphärische Bedingungen etc. Generell nehmen die gemessenen Oberflächentemperaturen erwartungsgemäß in den Sommermonaten zu und damit verbunden, wird der Unterschied zwischen den verschiedenen Landnutzungsklassen auch größer. Daher ist im Sommer der

Unterschied der Oberflächentemperaturen z.B. zwischen Wald und Industrieflächen größer als im Frühjahr oder Herbst. In Waldgebieten ist der Jahresgang wesentlich geringer ausgeprägt. Um den saisonalen Effekt zu minimieren und die Szenen untereinander besser vergleichbar zu machen, sind die Szenen normiert worden, d.h. die gemessenen Oberflächentemperaturen werden durch den Mittelwert der Szene geteilt und in Prozent umgerechnet. Da die Oberflächentemperaturen von Ackerflächen im Jahresgang sehr stark schwanken und damit auch den Mittelwert beeinflussen, werden diese Flächen nicht in die Mittelwertbildung mit einbezogen, bzw. ausmaskiert. Im Ergebnis der Normierung fällt der jahreszeitliche Effekt weg, wie die Abb. 5 sehr anschaulich verdeutlicht. Somit können alle Szenen gleichgewichtet in die Mittelwertbildung mit einbezogen werden.

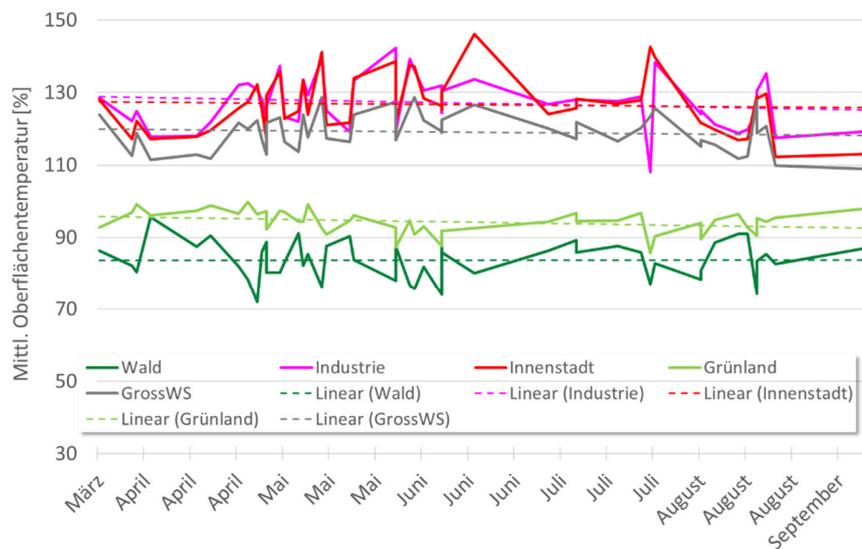


Abb. 5: Jahreszeitlicher Verlauf der Oberflächentemperaturen aus 47 Landsat Szenen von 1998 – 2018 in Abhängigkeit der Landnutzung, als Prozentangabe, normiert in Abhängigkeit der mittleren Oberflächentemperatur ohne Acker- und Wasserflächen

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Thermische Überwärmung

Die Berechnung der thermischen Überwärmung durch die vorliegende Zeitreihe wurde in zwei Varianten durchgeführt. Zum einen durch die Berechnung des Mittelwerts aus den Oberflächentemperaturen der 47 Szenen, in dem der Detailliertheitsgrad der Daten gezeigt werden soll. Hierbei ist anzumerken, dass durch den jahreszeitlichen Effekt die Aufnahmen aus den Sommermonaten stärker gewichtet werden, als die Frühjahrs- und Herbstaufnahmen. Zum anderen durch den Mittelwert der normalisierten Szenen. Hierbei werden alle Szenen gleich gewertet. Allerdings ist die Skala nicht in °C, sondern ein prozentualer Wert. In beiden Varianten kann die thermische Überwärmung der Stadt, bzw. der versiegelten Bereiche innerhalb der Stadt sehr gut beobachtet werden.

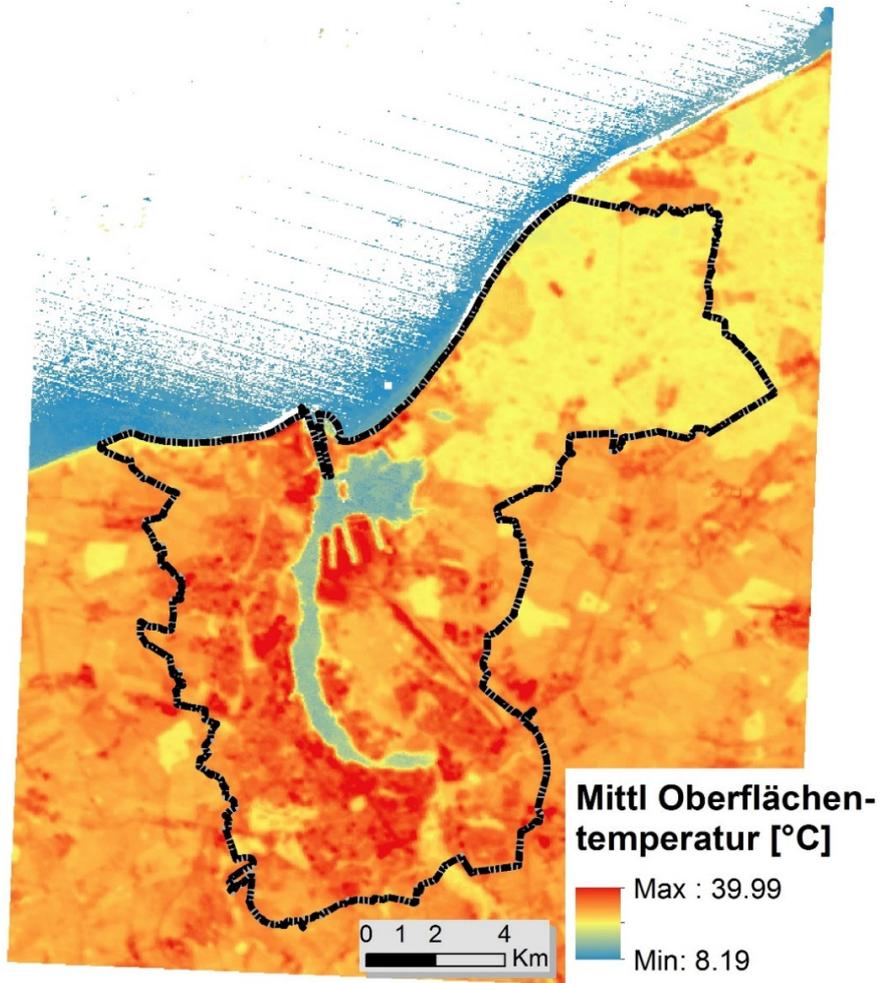


Abb. 6: Mittlere Oberflächentemperatur aus 47 Landsat-Szenen im Zeitraum von 1998 – 2018

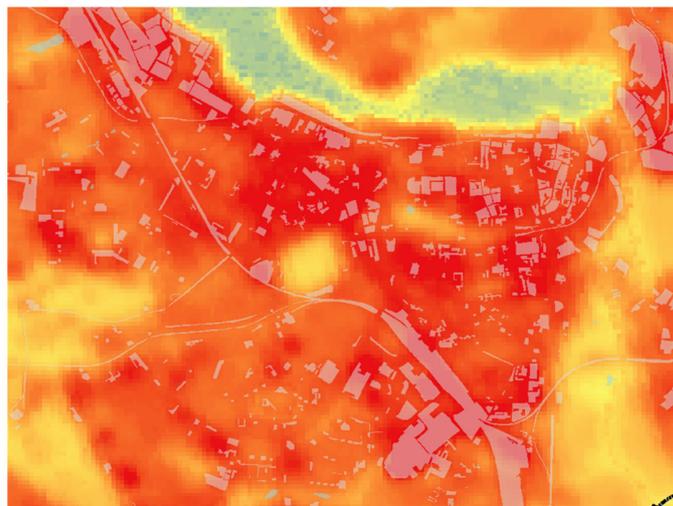


Abb. 7: Ausschnitt der Karte der mittleren Oberflächentemperatur aus 47 Landsat-Szenen im Zeitraum von 1998 – 2018 mit einer Überlagerung der versiegelten Flächen am Beispiel der Innenstadt Rostock

### 3.2 Ableitung einer Karte der thermischen Überwärmung

Die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel besitzt abgesehen von der Abhängigkeit vom Wetter sowohl einen Jahres- wie auch einen Tagesgang: Der Jahresgang der Temperaturdifferenzen ist nur schwach ausgeprägt, die Werte der Stadt liegen stets geringfügig über denen des Umlands. Maximale Werte werden im Sommer gemessen, da nachts durch die stark erwärmten Baukörper die langwellige Abstrahlung in den Vordergrund tritt. Das ganze Jahr über sind die Unterschiede zur Mitte des Tages relativ gering, wobei es aber im Sommer passieren kann, dass die Stadt dann durch erhöhte Konvektion und den Schattenwurf der Gebäude in der Innenstadt sogar geringfügig kühler wird als das Umland. Erst gegen Abend und in der Nacht (Sommer) und kurz vor Sonnenaufgang (Herbst/Frühling) werden die hohen Temperaturgegensätze gemessen. Durch diese Abschwächung des Temperaturminimums in der Nacht ergibt sich für die Stadt schließlich eine geringe Tagesamplitude der Temperatur.

Zur Erstellung der Karte der thermischen Überwärmung mit einem Zielmaßstab von 1:50.000, die sich aus der Auflösung der Thermaldaten ergibt, ist es notwendig die signifikanten und zusammenhängenden überwärmten Bereiche zusammenzufassen. Dazu wurde die Mittelwertkarte segmentiert. Die Segmente sollten eine Mindestfläche von 1 ha. haben und kompakter Natur sein. D.h. es sollten langgestreckte, bzw. vielförmige Polygone vermieden werden. Insgesamt wurden für das Gebiet der Hansestadt Rostock 284 Polygone gebildet. Da die Erfassung der Kaltluftproduktionsbereiche aus den Tagaufnahmen nicht möglich ist, wurden zusätzlich die durch das Gelände vorgegebenen Kaltluftproduktionsbereiche einschließlich der existierenden Kaltluftbahnen, die sich durch eine besonders niedrige abendliche Temperatur auszeichnen mit in die Berechnung der thermischen Überwärmung eingearbeitet. Dazu wurden diese Bereiche um eine Überwärmungsstufe herabgestuft, so dass diese in der Regel als starke Kaltluftproduktionsbereiche gelten. Eine Quantifizierung der Überwärmungszonen in °C ist nicht sinnvoll, da das tatsächliche Ausmaß der Überwärmung sowohl im Tagesgang als auch zwischen den sonnigen Tagen, in denen die Überwärmung auftritt stark schwanken kann. Insgesamt wurden 6 Stufen gebildet. Zwei Stufen, die sich auf die Kaltluftproduktionsbereiche beziehen. Wie aus der Abb. 8 ersichtlich, sind das in erster Linie Wälder und Grünlandbereiche. Die Überwärmung des Stadtkörpers wurde in vier Stufen vorgenommen, von keiner Überwärmung bis starker Überwärmung, je nach der Intensität der Versiegelung, bzw. Überbauung,

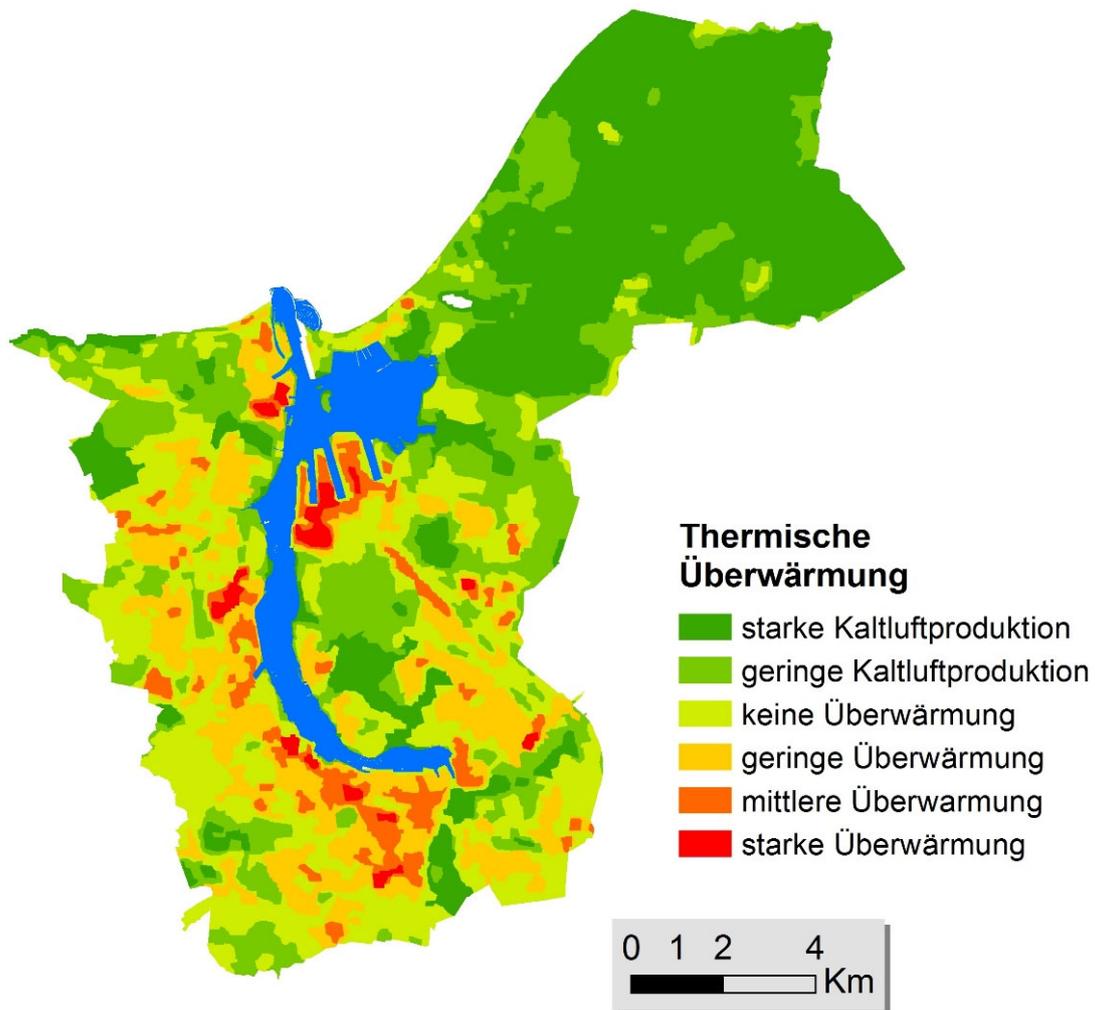


Abb. 8: Thermische Überwärmung der Hansestadt Rostock bei sonnigen Tagen auf der Grundlage langjähriger Thermalsatellitendaten

Zur Abschätzung der Bedeutung der thermischen Überwärmung und der ausgleichenden Kaltluftareale für die Hansestadt Rostock, stellt Abb. 9 diese bezogen auf das Gesamtgebiet der Hansestadt Rostock dar. Demnach tritt eine thermale Überwärmung nur auf 21 % der Stadtfläche auf. Der weit größere Teil des Stadtgebiets ist nicht von der städtischen Wärmeinsel betroffen.

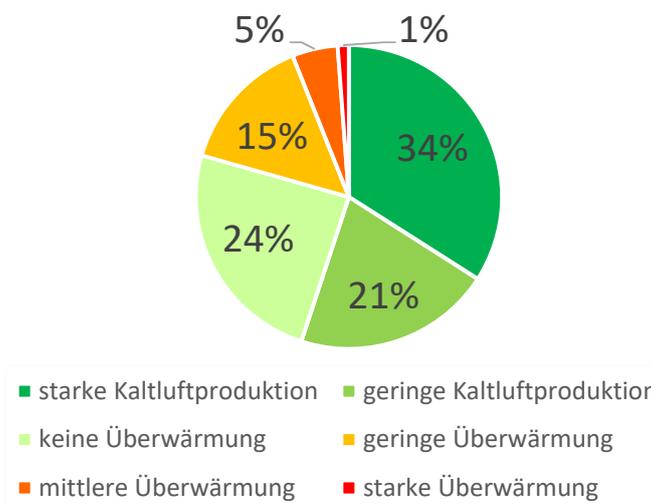


Abb. 9: Verteilung des Grads der thermischen Überwärmung, bezogen auf das gesamte Stadtgebiet

Bezogen auf die Bewohner der Stadt, die sich über das Ausmaß der thermischen Überwärmung informieren wollen, ist diese Statistik wenig zielführend. Vielmehr ist für die Bürger von Interesse, wie groß der Anteil der thermischen Überwärmung an dem urban geprägten Stadtraum ist. Dazu wurde aus der noch aktuellen Realnutzungskartierung von 2014 alle Siedlungs- und Freizeitflächen, inkl. Kleingartenanlagen mit einer Gesamtfläche von 45.7 km<sup>2</sup> zusammengefasst und mit der Karte der thermischen Überwärmung verschnitten. Danach ergibt sich folgendes Bild, Abb. 10. D.h. auf über 50 % der bewohnten und urbanen Fläche, ist bei sonnigem Wetter mit einer thermischen Überwärmung zu rechnen.

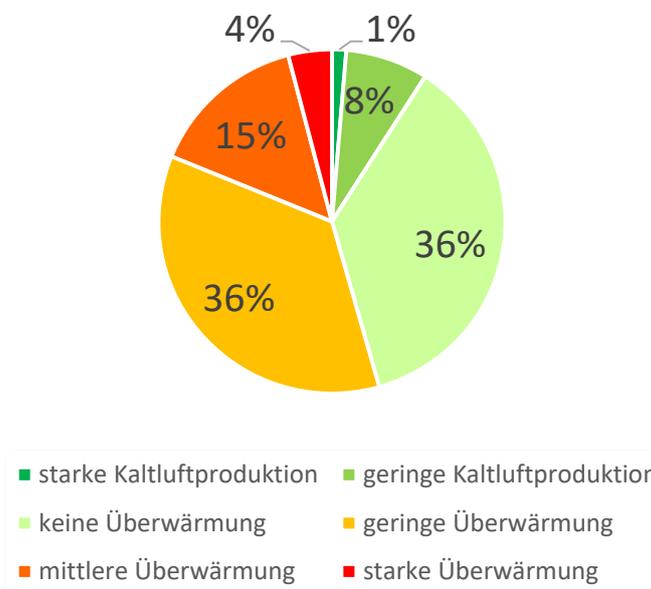


Abb. 10: Verteilung des Grads der thermischen Überwärmung, bezogen auf die teil und voll versiegelten Flächen gemäß der Realnutzungskartierung aus dem Jahr 2014

### 3.3 Bedeutung des Versiegelungsgrads an der urbanen Überwärmung

Wenn man die Überwärmungskarte betrachtet, wird rasch deutlich, dass die Bebauungsdichte, bzw. der Grad der Flächenversiegelung eng mit den Oberflächentemperaturen und der Temperaturamplitude zwischen Tag und Nacht korreliert. Die Flächenversiegelung lässt sich mit dem NDVI-Vegetationsindex recht zuverlässig beschreiben. Der dabei zugrundeliegende Gedanke ist, dass das Verhältnis zwischen roter und nahinfraroter von vegetationsbestandenen Flächen sich deutlich von unbedeckten vegetationsfreien, d.h. versiegelten Flächen unterscheidet. Diese Annahme ist korrekt, solange man ackerbaulich genutzte Flächen von der Berechnung ausschließt. Diese sind nämlich Ende August oftmals unbestellt und werden somit als versiegelte Flächen eingestuft (Abb. 11).

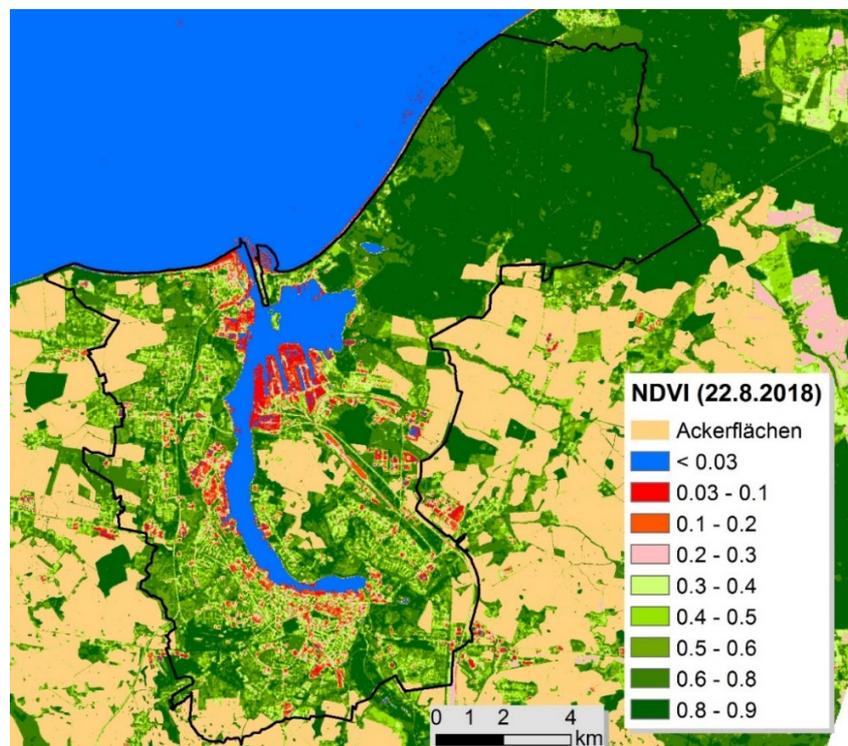


Abb. 11: Vegetationsindex NDVI – abgeleitet für das Landsat 8 Satellitenbild vom 22.08.2018. Ackerflächen sind maskiert

Um den Zusammenhang statistisch beschreiben zu können, wurde für jedes Bildelement der Satellitenszene der korrespondierende NDVI-Wert ermittelt und anschließend zusammengefasst. Grundsätzlich sind NDVI-Werte  $> 0$  Wasserflächen vorbehalten. Werte zwischen  $0 - 0.25$  sind, mit abnehmender Tendenz versiegelte, vegetationslose Bereiche, wie Straßen, Häuser etc. NDVI-Werte  $> 0.25$  stehen für Flächen auf denen vitale Vegetation zu finden ist. Dabei nimmt generell mit zunehmenden Werten der Blattflächenindex zu. So weisen in der Regel Grünland oder Getreideflächen die höchsten NDVI-Werte auf. Der NDVI von Nadelwäldern ist geringer als von Laubwäldern. Abb. 12 zeigt den Zusammenhang zwischen NDVI und Oberflächentemperatur.

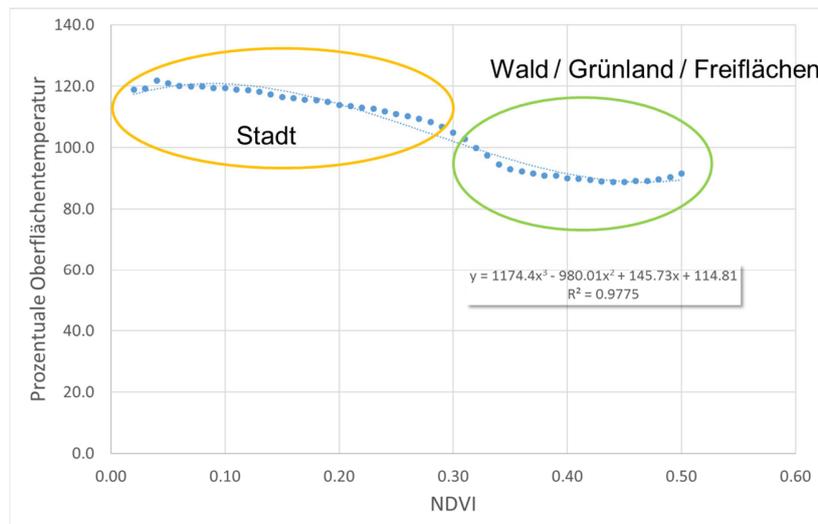


Abb. 12: Oberflächentemperatur in Relation zur Versiegelung (NDVI)

### 3.4 Oberflächentemperaturdifferenz 1998 – 2018

Um die Auswirkungen der Landnutzungsveränderungen der letzten 20 Jahre im Hinblick auf die städtische Überwärmung und die etwaige Beeinträchtigung von Kaltluftbahnen zu untersuchen, wurden die Satellitenbilder des Zeitraums von 1998 – 2002 mit dem prozentualen Mittel der Jahre 2013 – 2018 verglichen (Abb. 13).

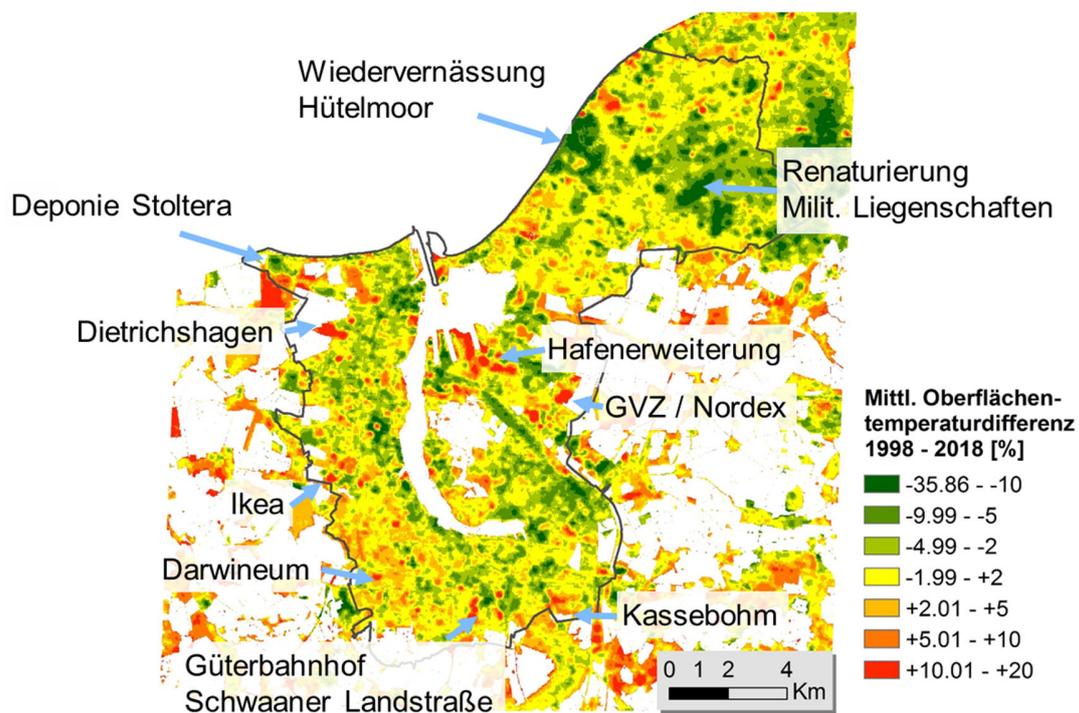


Abb. 13: Mittlere Oberflächentemperaturdifferenz für den Zeitraum 1998 – 2018 in Prozent für die Hansestadt Rostock und Umgebung

In Rostock ist im Beobachtungszeitraum viel gebaut und neue Flächen versiegelt worden. Das ist nicht neu und z.B. auch in der Realnutzungskartierung hinreichend dokumentiert. Dabei zeigt sich, dass größere Bauprojekte zu Veränderungen geführt haben. Wie aus der Karte ebenfalls deutlich wird, hat die Oberflächentemperatur nicht nur zugenommen, vielmehr ist die mittlere Oberflächentemperatur durch eine veränderte Landnutzung auch vielfach gesunken. Das trifft z.B. auf das Hütelmoor oder renaturierte militärische Liegenschaften in der Rostocker Heide zu. Auch sind in diesem Zeitraum die vorhandenen Bäume gewachsen und das städtische Grün hat in den letzten Jahren eher zugenommen als abgenommen. Das ist unter anderem ganz gut in den Großwohnsiedlungen zu beobachten, in denen die Oberflächentemperatur um einige Prozentpunkte zurückgegangen ist.

## 4 Fazit & Ausblick

Stichpunktartig können die Ergebnisse der multitemporalen Satellitenbilddatenauswertung zur Ermittlung der urbanen Überwärmung wie folgt zusammengefasst werden:

- Aus dem langjährigen Mittel der Oberflächentemperaturen zeichnet sich städtische Überwärmung der Hansestadt Rostock bei sonnigen Wetterlagen gegenüber ihrer Umgebung deutlich ab.
- Der Versiegelungsgrad bzw. die Bebauungsdichte bestimmen das Ausmaß der urbanen Überwärmung
- Bau- und Renaturierungsprojekte der letzten 20 Jahre haben die Oberflächentemperaturen, und damit auch das Stadtklima punktuell verändert.

## 5 Literaturverzeichnis

- KATO, S. & YASUSHI, Y., 2005: Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* **99**(1-2), 44-54, doi:10.1016/j.rse.2005.04.026.
- ISAYA NDOSSI, M. & AVDAN, U., 2016: Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: A PyQGIS Plugin. *Remote Sensing* **8**(5), 413, doi:10.3390/rs8050413.
- PARASTATIDIS, D.; MITRAKA, Z.; CHRYSOULAKIS, N. & ABRAMS, M., 2017: Online Global Land Surface Temperature Estimation from Landsat. In: *J Remote Sensing* **9**(12), 2072-4292, doi:10.3390/rs9121208.
- ZHOU, D, XIAO, J., BONAFONI, S., BERGER, C., DEILAMI, K. ZHOU, Y., FROLKIN, S. , YAU, R., QIAO, Z. & SOBRINO, J.A., 2018: Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing* **11**(1), 48, doi: 10.3390/rs11010048.