

Fernerkundliche Detektion und Dauerbeobachtung urbaner Hitze- und Kälteinseln

Remote Sensing Based Detection and Monitoring of Urban Heat and Cold Islands

Lucia Tyrallová, Harald Schernthanner, Jenny Tamm

Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam · lucia.tyrallova@uni-potsdam.de

Zusammenfassung: Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist die Auslotung des Potenzials satellitengestützter Fernerkundungsdaten zur Detektion urbaner Hitze- und Kälteinseln („urban heat and cool islands“). Urbane Hitze- und Kälteinseln sind ein seit den 1960er-Jahren bekanntes Problem, in den letzten 15 Jahren wurden Hitze- und Kälteinseln anhand verschiedener Fernerkundungsdaten analysiert (Chen et al., 2006). Das Phänomen tritt in dicht verbauten städtischen Gebieten auf, in denen versiegelte Oberflächen einen stärkeren Hitzespeicher darstellen als weniger dicht bebaute Flächen oder beispielsweise urbanes Grünland (Dousset & Gourmelon, 2003). Es gibt mittlerweile mehrere Sensoren an Bord von Satelliten, wie beispielsweise ENVISAT, die sich zur Detektion dieses Phänomens eignen. In diesem Beitrag wird der Fokus auf Sentinel-3 gerichtet. Mit den Sentinel-3-Satelliten wird ein neuer Standard in der operationellen Erdbeobachtung zur dauerhaften operationellen Gewinnung von Umweltdaten gesetzt. An Bord des 2016 gestarteten Sentinel-3A-Satelliten befindet sich ein Radiometer namens SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer); dieser dient zur Messung der Oberflächentemperaturen der Meere und des Festlands. Das Radiometer SLSTR, welches ein Nutzungspotenzial zur Detektion urbaner Hitze- und Kälteinseln aufweist, misst mit einer Genauigkeit bis auf 0,3 Grad Celsius (ESA, 2016; ESA, 2017).

Es wird im Rahmen des Beitrags ein Konzept eines Workflows zur Detektion und dem darauf aufbauenden Monitoring von städtischen Hitze- und Kälteinseln vorgestellt. Dieses Konzept wird umgesetzt und auf seine Praxistauglichkeit hin evaluiert; die Prozesskomponenten der vorgestellten Prozesskette laufen dabei großteils semi-automatisiert ab. Als Untersuchungsgebiet wird Tel Aviv und seine Umgebung gewählt. Kern des Beitrags ist der vorgestellte Workflow zur Generierung und Extraktion der Oberflächentemperaturdaten. Die Datenanalyse im Untersuchungsgebiet versteht sich als ein Best-Practice-Beispiel für deren Generierung.

Schlüsselwörter: Urbane Hitze- und Kälteinseln, Sentinel-3, Radiometer SLSTR, Fernerkundung

Abstract: *This paper evaluates the potential of Sentinel-3 remote sensing data for the detection of urban heat and cool islands. Urban heat and cool islands have been a known problem since the 1960s. Over the last 15 years, these islands have been analyzed using various remote sensing data. The phenomenon occurs in densely built urban areas, where sealed surfaces represent a greater heat store than less densely built areas or, for example, urban grassland. The article presents the concept of a workflow for the detection of such phenomena. This concept is implemented and evaluated for its practical suitability. The process components of the presented process chain are largely semi-automated. The exemplary area of investigation is Tel Aviv and its surroundings. The main focus of the article is the presented workflow for generating and extracting surface temperature data, which serve as the mean input to detect and map urban heat and cool islands.*

Keywords: *Urban heat and cool islands, Sentinel-3, SLSTR radiometer, remote sensing*

1 Motivation und Stand der Technik

Urbane Hitze- und Kälteinseln („urban heat and cool islands“) sind ein bekanntes Phänomen in dicht verbauten städtischen Gebieten, bei dem versiegelte Oberflächen einen stärkeren Hitzespeicher darstellen, als weniger dicht bebaute Flächen oder urbanes Grünland (Dousset & Gourmelon, 2003). Das Phänomen der urbanen Hitze- und Kälteinseln beschreibt den Unterschied der Lufttemperatur zwischen höher temperierten urbanen und niedriger temperierten ruralen Gebieten. Ursache dafür ist die Urbanisierung, die Strukturveränderung von Landoberflächen, sowie die Industrialisierung (Rizwan et al., 2008). Sensoren des Landsat-8-Satelliten, die Sensoren MODIS, ASTER sowie AVHRR werden für die satellitengestützte Detektion der Oberflächentemperatur (Land surface temperature – LST) verwendet. Die frei verfügbaren Daten des Copernicus-Programms (auch Sentinel) ermöglichen fast kontinuierliche Aufnahme der Erdoberfläche und großflächige Dauerbeobachtung. Der Sentinel-3A-Satellit ist im Februar 2016 gestartet, der Sentinel-3B wird für den Start in April 2018 vorbereitet und Sentinel-3C sollte vor 2020 starten (ESA, 2013). Ein im ESA (European Space Agency) SEN4LST¹-Projekt getesteter Prototyp nutzte den Übergang vom bisherigen Einzelinstrument-Algorithmus (1 TIR-Band) zum Algorithmus für mehrere Instrumente (2 TIR-Bänder) basierend auf dem Split-Window-Algorithmus (SW) und testete diesen unter der Nutzung von simulierten Daten und realen MERIS/AATSR-Daten (Sobrino, 2015). Im Beitrag wird der SW-Algorithmus für Sentinel-3-Sensoren umgesetzt, um das Potenzial von Sentinel-3 für die Detektion und das Monitoring von urbanen Hitze- und Kälteinseln zu testen. Der Sentinel-3A-Satellit liefert spektrale Daten über Land (Ocean and Land Color Instrument, OLCI) und Temperaturdaten (Sea and Land Surface Temperature Radiometer, SLSTR) und zeichnet sich durch eine hohe temporale Auflösung (OLCI: 1 – 4 Tage; SLSTR: 2 Tage) aus (Sobrino, 2015).

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

2.1 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde eine Großstadt gewählt, die eine zunehmende Bevölkerungsdichte aufweist sowie stark von urbanen Hitzeinseln beeinflusst ist. Tel Aviv, eine Großstadt in Israel, bildet das 70 km² umfassende Untersuchungsgebiet mit einer Einwohnerzahl von 438.818 und einer Bevölkerungsdichte von 6.269 Einwohnern pro km² (Israel Central Bureau of Statistics, Stand: 2016). Durch hohe Temperaturen und zunehmende Bevölkerungsdichte neigt Tel Aviv stark zur Entwicklung urbaner Hitzeinseln. Die beobachtete Durchschnittstemperatur ist in den letzten Jahrzehnten um 2 – 3 °C gestiegen und wird laut Klimamodellen nach dem Extremszenario bis 2060 um weitere 4.5 – 5 °C steigen (Shalom et al., 2008).

2.2 Datengrundlage

Im Untersuchungsgebiet Tel Aviv war die Datengrundlage (Sentinel-3A-Szenen und Referenzdatensatz der Wetterstationen) vorhanden. An Bord des 2016 gestarteten Sentinel-3A-

¹ ESA Projekt Synergistic: Use of The Sentinel Missions For Estimating And Monitoring Land Surface Temperature.

Satelliten befindet ein SLSTR(Sea and Land Surface Temperature Radiometer)-Gerät zur Messung der Oberflächentemperaturen der Meere und des Festlands. Das Radiometer SLSTR zeichnet 9 Spektralkanäle zwischen 550 nm und 12.000 nm Wellenlänge auf. Die räumliche Auflösung liegt im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot-Bereich bei 500 m, im mittleren und thermalen Infrarot-Bereich bei 1000 m. Ein weiteres Instrument an Bord von Sentinel-3A ist OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) mit 21 Bänder zur Beobachtung von Land und Ozeanen. Sehr breite Aufnahmestreifen – OLCI (1270 km), SLSTR (1420 km) – machen eine globale Abdeckung alle 48 Stunden möglich (ESA, 2016). Sentinel-3A-Szenen sind Level 1(L1)- und Level 2(L2)-Produkte des OLCI- und SLSTR-Sensors mit dem Aufnahmezeitpunkt August 2017 (Abb. 1).

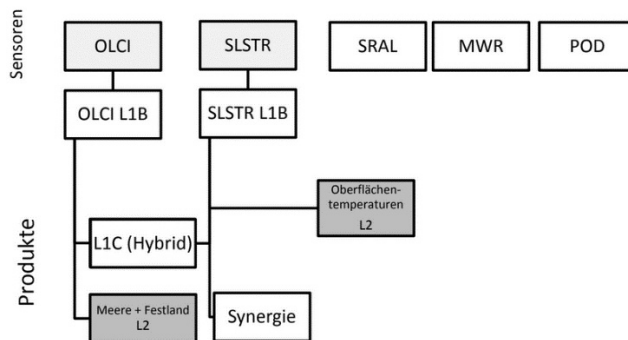


Abb. 1: Produktstruktur von Sentinel-3 (ESA Sentinel-3 User Handbook, 2013)

Als Referenzdaten werden Lufttemperaturdaten (Tair) an sechs Wetterstationen innerhalb Tel Aviv's zum Zeitpunkt der Satellitenbilddaufnahmen und alternativ MODIS und Daten des Landsat-8-Thermal-Infrared-Sensors (TIRS) in Betracht gezogen.

3 Generierung und Extraktion der Oberflächentemperatur-Daten: Konzept und Methodik

Das Konzept mit den einzelnen Prozesskomponenten, um die Temperaturdaten auszuwerten und deren Genauigkeit beurteilen zu können, ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Prozesskomponenten des vorgestellten Workflows erlauben eine großteils semi-automatisierte Prozessierung. Im Rahmen von Studienprojekten an der Universität Potsdam wurde von Tamm (2018) eine prototypische Umsetzung ausgearbeitet. Zunächst erfolgt die Abfrage der Oberflächentemperaturen (LST, Land Surface Temperatures) aus den Satellitenbildern nach zwei verschiedenen Herangehensweisen. In der ersten Herangehensweise werden die beiden Sensoren (OLCI und SLSTR) miteinander verknüpft, um anschließend unter Nutzung des Split-Window-Algorithmus (SW-Algorithmus) die Oberflächentemperaturen generieren zu können. Die Funktionsweise des SW-Algorithmus wird im folgenden Abschnitt näher erläutert. In der zweiten Herangehensweise wird der vom SLSTR-Sensor vollständig mitgelieferte LST-Standarddatensatz genutzt. Beide LST-Datensätze werden mittels linearer Regression

miteinander verglichen, um anschließend das geeignetere Verfahren in die weitere statistische Auswertung mit einzubeziehen.

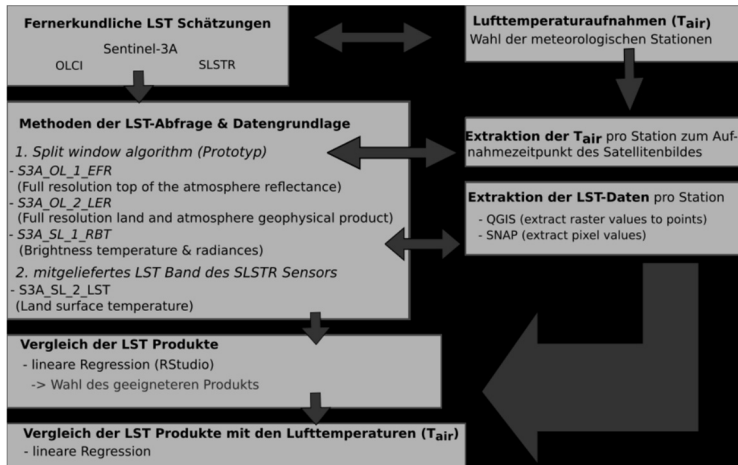


Abb. 2: Schematische Darstellung des Workflows für Generierung und Extraktion der Oberflächentemperaturdaten sowie den Vergleich mit Referenzdaten (Tamm, 2018)

Der Split-Window-Algorithmus (SW-Algorithmus) wurde wegen guter Leistungsfähigkeit sowie Einfachheit für die LST-Detektion ausgewählt. Weitere getestete Methoden zur LST-Detektion Single-Channel und Dual-Angle erwiesen sich als weniger zuverlässig (Ruescas et al., 2016). Der SW-Algorithmus nutzt 2 TIR-Bänder im atmosphärischen Fenster zwischen 10 und 12 μm . Der Algorithmus basiert auf der Annahme, dass die Strahlungsdämpfung der atmosphärischen Absorption proportional zur Differenz der Strahlungsdichte ist. Die Differenz der Strahlungsdichte ergibt sich aus simultanen Messungen mit jeweils zwei verschiedenen Wellenlängen, die unterschiedlichen atmosphärischen Absorptionismengen ausgesetzt sind. Die Formel von Sobrino et al. (2008) beschreibt den Algorithmus wie folgt:

$$T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4\omega)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6\omega)\Delta\varepsilon \quad (1)$$

T_i und T_j sind jeweils die am Sensor gemessenen Helligkeitstemperaturen der TIR-Bänder i und j (in K), e ist die mittlere Emissivität, $e = 0.5("i + "j)$, $\Delta\varepsilon$ ist die Differenz der Emissivität, $\Delta\varepsilon = ("i + "j)$, ω ist der totale atmosphärische Wasserdampfgehalt (g/cm) und c_0 bis c_6 sind die SW-Koeffizienten (Tabelle 1). Letzteres erhielt man durch lineare Regressionen unter Nutzung eines komplett simulierten Datensatzes (Sobrino et al., 2008). Der SW-Algorithmus basiert auf physikalischen Grundlagen, was vom großen Vorteil ist. Somit kann dieser direkt aus der Strahlungstransportgleichung gewonnen werden und beinhaltet explizit den atmosphärischen Wasserdampfgehalt (ω) sowie Oberflächenemissivität (LSE). Aufgrund des operativen Abrufs können leicht externe Quellen von ω und LSE mit einbezogen werden. Sobald verbesserte Produkte von ω und LSE vorliegen, kann das potenzielle LST-Produkt problemlos neu berechnet werden. Als Emissivitätsinput dient der NDVI-Schwellenwertansatz (Sob-

rino et al., 2008). Dieser benötigt weniger Rechenzeit und wird somit für eine Echtzeitimplementierung innerhalb des beschriebenen semi-automatisierten Workflows vorgeschlagen. Die Umsetzung erfolgte größtenteils mithilfe der Sentinel Application Platform (SNAP). Zunächst wurden die OLCI-L1- und L2-Datensätze zum Datensatz „OLCI_Coll“ zusammengefügt, um die Emissivitäten auf Grundlage des NDVI/OGVI berechnen zu können. Aus dem OLCI-L2-Datensatz wurde der integrierte Wasserdampf von kg/m^2 nach g/cm^2 umgewandelt. Die beiden TIR-Bänder zur Ermittlung der LST konnten über den SLSTR-L1-Datensatz gewonnen werden. Beide Datensätze (OLCI_Coll, SLSTR) wurden anschließend zu einem 1×1 km Rasterdatensatz verbunden, um den SW-Algorithmus auf gültige Pixel anzuwenden. Um die LST_SW-Daten pro Station extrahieren zu können, wurden die generierten Rasterdaten im 16 bit Format als GeoTIFF exportiert, in das Desktop-GIS QGIS eingepflegt und mit den Punktdaten der Wetterstationen überlagert. Temperaturdaten werden von K in $^{\circ}\text{C}$ umgerechnet, in UTM transformiert und LST_SW-Daten aller Stationen extrahiert. Da sich die Georeferenzierung in QGIS als ungenau erwies, wurde von Tamm (2018) eine Funktion in Matlab geschrieben, welche unter Eingabe der Koordinatenpunkte der einzelnen Stationen jeweils das zugehörige Pixel mit dem LST-Wert ausgibt. Im zweiten Fall wurde eine Extraktion der Oberflächentemperaturen aus dem SLSTR-Standardprodukt vorgenommen, dazu erfolgte eine Verarbeitung des LST-Datensatzes des SLSTR-Sensors in SNAP, anschließend konnten mit dem QGIS-Werkzeug „Extract pixel values“ die Daten pro Stationen auf Grundlage deren Koordinaten extrahiert werden; es wurde in QGIS weiterhin ein Offset von 290 addiert und ein Skalierungsfaktor von 0.002 mit den Rohdaten multipliziert, um die Oberflächentemperaturen zu gewinnen. Beide Konstanten sind unter den Eigenschaften des Datensatzes zu finden.

4 Ergebnisse, Diskussion und Fazit

Ziel des vorliegenden Beitrags ist eine Erörterung des Potenzials von Sentinel-3-Fernerkundungsdaten zur Detektion urbaner Hitze- und Kälteinseln. Das Projekt ist im jetzigen Stand noch nicht vollends abgeschlossen und befindet sich in der Validierungsphase. Eine Nutzung der Daten der Wetterstationen erweist sich durch die unterschiedliche Geometrie, 1-km-Temperatur-Raster vs. punktueller Messungen, als nicht möglich. Zum jetzigen Stand werden unabhängige MODIS-Szenen und Landsat-8-TIRS-Bänder gesucht, um diese als Referenz zur Güteabschätzung der aus Sentinel-3 abgeleiteten Oberflächentemperaturen zu verwenden. Parallel zur Arbeit an der Validierung erfolgt eine Adaption der Prozesskette auf den Großraum Berlin, als weiterer use case zur Anwendung der entwickelten Prozesskette.

Aktuell ist jedoch bereits ein Transfer in operationelle Anwendungen möglich. Der vorgestellte Workflow versteht sich als „Best practice“-Beitrag einer Übertragung von in der Forschung gewonnener Expertise der Sentinel-3-Datenprozessierung in eine Anwendungsdomäne und richtet sich an Akteure aus Wirtschaft und öffentlicher Hand, die Verarbeitungsstrategien dieser neuen Umweltsensordaten für ihre Anwendungen suchen. F&E-Projekte in Kooperation von Wissenschafts- und Wirtschaftspartnern bieten sich an. Diese Vorgehensweise wird von den Autoren vorgeschlagen; ein Antrag im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) wird derzeit vorbereitet. Neben der Validierung sind Folgearbeiten bei der Anpassung der Koeffizienten des Split-Window-Algorithmus notwendig. Vor allem die Winkelabhängigkeit bedarf näherer Betrachtung, da bisher nur der Zenitwinkel betrachtet wurde. Die im Beitrag verwendeten Koeffizienten wurden aus simulierten Daten,

unter Verwendung von 61 atmosphärischen Profilen unterschiedlicher Bedingungen, berechnet (Sobrino, 2016). Die Integration von Low-Cost-Sensoren zur Lufttemperaturmessung in den Analyseprozessfluss ist ein weiterer in Zukunft verfolgenswerter Ansatz. Als abschließendes Fazit ist zu sagen, dass die im Beitrag sehr ausführlich dargestellte Prozesskette ein erstes sehr gutes wissenschaftliches Fundament ist; sie ist generisch und lässt sich modular um weitere Sensoren wie den NOAA-AVHRR oder beispielsweise das Advanced Along Trac Scanning Radiometer (AATSR) an Bord von ENVISAT erweitern.

Literatur

- Dousset, B., & Gourmelon, F. (2003). Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 58(1-2), 43–54.
- Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., & Yin, Z. Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment*, 104(2), 133–146.
- ESA EO Missions Sentinel-3 (2013). *User Handbook*. Retrieved January 15, 2018, from https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685236/Sentinel-3_User_Handbook.
- ESA EO Missions Sentinel-3 News (2016). *Sentinel-3A takes Earth's temperature*. Retrieved January 15, 2018, from <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/sentinel-3/news/-/article/sentinel-3a-takes-earth-s-temperature>.
- ESA EO Missions Sentinel-3 (2017). *Sentinel-3 Missions Details*. Retrieved January 15, 2018, from <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/sentinel-3>.
- Israel Central Bureau of Statistics (2016). *Einwohner und Bevölkerungsdichte*. Retrieved January 15, 2018, from http://www.cbs.gov.il/reader/cw_usr_view_Folder?ID=141.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128.
- Ruescas, A. B., Danne, O., Fomferra, N., & Brockmann, C. (2016). The Land Surface Temperature Synergistic Processor in BEAM: A Prototype towards Sentinel-3. *Data*, 1(3), 18.
- Shalom, H. I. B., Samuels, R., Potchter, O., & Alpert, P. (2008). *The combined effect of global warming and the urban heat island and its impact on human heat stress increase in Israeli cities – current trends and future predictions*.
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Soria, G., Brockmann, C., Ruescas, A. B. et al. (2015). A Prototype Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Sentinel-3 Mission. *Sentinel-3 for Science Workshop* (Vol. 734, p. 38).
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L. et al. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316–327.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Ruescas, A. B., Danne, O., Brockmann, C. et al. (2016). Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data. *Remote Sensing of Environment*, 179, 149–161.
- Tamm, J. (2018). *Fernerkundliches Monitoring urbaner Wärme- und Kälteinseln* (unpublished study project). Universität Potsdam.