

Philipps-Universität Marburg

Fachbereich 19 Geographie

Sommersemester 2021

Bachelorthesis

**Quantitative Analyse der städtischen Wärmeinsel im
Stadtgebiet Marburgs mittels Landsat 8 Satellitendaten
für die Sommer 2013-2020**

Erstkorrektur: Dr. Boris Thies

Zweitkorrektur: apl. Prof. Dr. Stefan Harnischmacher

vorgelegt von:

Martin Monkos

stud. geogr. (B.Sc.), 12. Fachsemester

Matrikelnummer 2743361

Kontakt: Monkos@students.uni-marburg.de

Abgabedatum: 30.09.2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Daten	3
2.1 Untersuchungsgebiet	3
2.2 Landsat 8 Daten	4
2.3 CORINE Land Cover	6
3. Methoden	7
3.1 Landsat 8 Prozessierung	9
3.2 CORINE Land Cover Prozessierung	12
3.3 Quantifizierung der städtischen Wärmeinsel	14
4. Ergebnisse	15
5. Diskussion	21
6. Fazit	23
 Literaturverzeichnis	 24

1. Einleitung

Die städtische Wärmeinsel wird allgemein als eine Anomalie beschrieben, in der die Temperatur innerhalb des Gesamttraums urbaner Flächen im Vergleich zu ihren angrenzenden nicht-urbanen Flächen signifikant erhöht ist (OKE 1982, S. 1ff.). Dieser in der wissenschaftlichen Literatur allgemein als „urban heat island“ (UHI) bezeichnete Effekt (UHIE) kann dabei weiter differenziert werden (ZHOU ET AL. 2019, S.2). Die UHI wird im Speziellen nach der Landoberflächentemperatur („surface“, SUHI) und den atmosphärischen Temperaturen („air“, air UHI) innerhalb urbaner Räume differenziert (ebd.). Dabei wird der UHIE weltweit beobachtet (ZHOU ET AL. 2017, S.1) und fand seine erste Erwähnung auf Grundlage von Satellitendaten im Jahr 1972 (Rao 1972, S.647). OKE (1973, S.775ff.) hat den positiven Zusammenhang von Stadtgröße und UHI Intensität anhand von Lufttemperaturmessungen nachweisen können. ZHOU ET AL. (2017, S. 2ff.) haben diesen Zusammenhang durch Auswertung von Satellitendaten hinsichtlich der SUHI ebenfalls nachweisen können. Bereits für die unmittelbare Umgebung einzelner Gebäude kann eine mikroklimatische Veränderung eintreten (LANDSBERG 1981, S.84). So kann die UHI einen „negativen Einfluss auf den Energiehaushalt in Gebäuden und ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Gesundheit des Menschen, insbesondere ältere Menschen“ (SEEBACHER ET AL. 2018, S.1) haben. Ein positiver Zusammenhang zwischen der UHI und der atmosphärischen Konzentration von Stickstoffoxiden und Ozon konnte von SARRAT ET AL. (2006, S.1755f.) für den Großraum Paris nachgewiesen werden. Desweiteren haben WENG & SHIHONG (2006, S.485) in ihrer Untersuchung von Guangzhou (China) eine positive Korrelation zwischen urbaner Bebauungsdichte und Luftschadstoffen im Zusammenhang mit dem UHIE nachweisen können, wobei die Korrelation in Sommermonaten stärker ausgeprägt war. Erhöhte Temperaturen, Stickstoffoxid- und Ozonkonzentrationen in urbanen Räumen, insbesondere Städten, werden in zeitlichen Zusammenhang mit einer erhöhten Sterblichkeitsrate gebracht (BASU & SAMET 2002, S.198f.). Als Folge einer intensiveren Ausprägung der UHI in Zeiträumen außergewöhnlich hoher Lufttemperaturen (sog. „Heat Waves“) kann ebenfalls eine erhöhte Sterblichkeitsrate beobachtet werden (ELLIS ET AL. 1975, S.1ff.).

Der direkt beobachtbare Eingriff des Menschen in die Landoberfläche und ihrer inhärenten Wechselwirkungen, führt zu einer umfangreichen Transformation der

natürlichen Landoberfläche, in landwirtschaftlich und urban genutzte Flächen (DEFRIES 2008, S. 370ff.). Die Aktualität wissenschaftlicher Forschung zu UHIs wird aufgrund von Annahmen der Verdreifachung globaler urbaner Flächen für die Jahre 2000 bis 2030 (ANGEL ET AL. 2011, S.3) deutlich. Dabei werden im Jahr 2030 voraussichtlich 60% der Weltbevölkerung in urbanen Räumen leben (UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION 2019, S.23).

In der vorliegenden Untersuchung wird die UHI und ihre Intensität für die Universitätsstadt Marburg der Jahre 2013 bis 2020 quantifiziert. Hierfür wurde jeweils ein Zeitpunkt innerhalb der Sommermonate Juni bis August ausgewählt. Die Untersuchung basiert auf der Berechnung der Landoberflächentemperatur („land surface temperature“, LST) und ist somit eine Analyse der SUHI (im Folgenden als UHI benannt). Hierzu werden Satellitendaten der „Landsat 8 Mission“ (L8) (U.S. GEOLOGICAL SURVEY o.J.a) genutzt. Zur Ermittlung der UHI ist die Differenzierung der LST in urbane und nicht-urbane Flächen notwendig. Hierfür wird die Landnutzungsklassifikation der „CORINE Land Cover“ Daten (CLC) (COPERNICUS PROGRAMME 2021) verwendet.

Ziel dieser Arbeit ist (1) der Nachweis, dass es einen signifikanten Unterschied der LST in urbanen und nicht-urbanen Gebieten innerhalb des Untersuchungsgebiets gibt. Es wird die Annahme getroffen, dass (2) die Intensität der UHI im Verlauf der Zeitreihe relativ konstant bleibt. Desweiteren wird angenommen, dass (3) es jedoch innerhalb nicht-urbaner Klassen „Landwirtschaft“ und „Wald“ einen signifikanten Unterschied der LST gibt.

2. Daten

Im nachfolgenden wird der Untersuchungsraum präzisiert und die Datenauswahl und -vorbereitung der Landsat 8 und CORINE Land Cover Daten erläutert.

2.1 Untersuchungsgebiet

Für die Untersuchung der UHI wurde die Stadt Marburg im Landkreis Marburg-Biedenkopf (Hessen/Deutschland) gewählt (Abbildung 1). Marburg liegt in den gemäßigten Breiten (50.81173°N 8.77577°E) und hat ein warm-humides Kontinentalklima. Die mittlere Jahrestemperatur der Jahre 1981 bis 2010 beträgt ungefähr 9,7°C und der mittlere vieljährige Niederschlag derselben Bezugsperiode beträgt näherungsweise 668 mm (DEUTSCHER WETTERDIENST o.J.). Da der Deutsche Wetterdienst (DWD) keine Wetterstation in Marburg betreibt, wurde auf Daten der nächstgelegenen Wetterstation des DWD in der ca. 25 km entfernten Nachbarstadt Gießen (Wetterstation Gießen/Wettenberg) zurückgegriffen.

Die Stadt Marburg erstreckt sich überwiegend in einer Nord-Süd verlaufenden Tallage des Lahntals mit Höhen um 180 m ü. NN. und wird östlich und westlich von Anhöhen bis ca. 370 m ü. NN. flankiert. Dabei befinden sich die zum Stadtzentrum gehörenden Stadtteile im Tal, während die äußeren, überwiegend als Wohngebiete zu bezeichnenden Stadtteile in Hang- und Hochlagen liegen. Zum 31.12.2020 zählte Marburg 76.401 Einwohner und war somit die siebtgrößte Stadt Hessens (LAND HESSEN o.J.).

Der Untersuchungsraum zur Quantifizierung der UHI (Abbildung 1, links) wurde so gewählt, dass er die größte zusammenhängende Stadtfläche umfasst. Hierfür wurden die im späteren Verlauf (siehe Kapitel 3) reklassifizierten CLC Daten verwendet. Dabei wurde das zusammenhängende Stadtgebiet um einen Puffer von 500 Metern (m) erweitert, um eine gleichmäßige Fläche nicht urbaner Gebiete abzubilden. Die Nord-Süd-Ausdehnung des Untersuchungsgebiets beträgt ca. 10 Kilometer (km), die Ost-West-Ausdehnung annähernd 5,5 km. Der gesamte Untersuchungsraum umfasst eine Gesamtfläche von ca. 35 km².

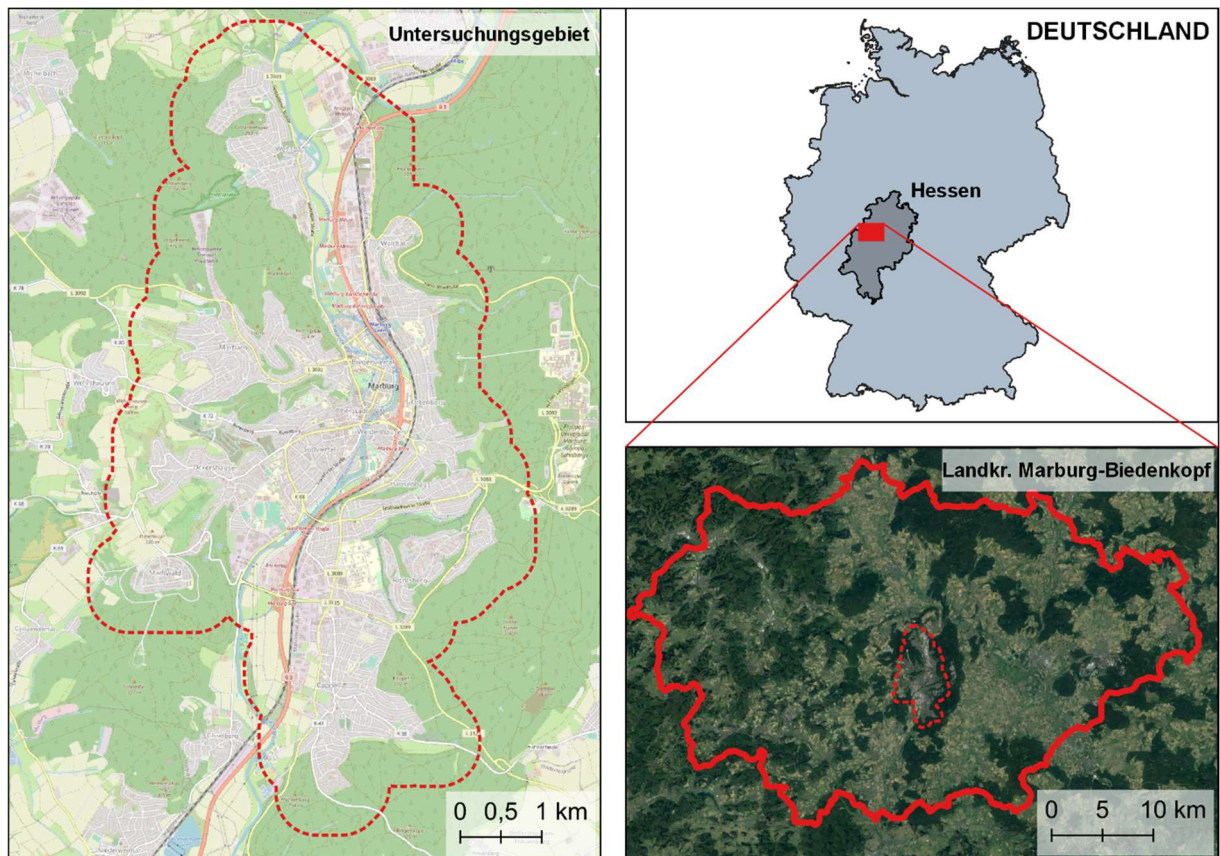


Abbildung 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets; Datengrundlage: Google Satellite (GOOGLE WEB MAP SERVICE o.J.), OpenStreetMap-Data (OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS o.J) (eigene Darstellung).

2.2 Landsat 8 Daten

Zur Berechnung der LST wurden *Landsat 8* (L8) Daten (U.S. GEOLOGICAL SURVEY o.J.a) kostenlos von U.S. Geological Survey (ebd.) bezogen.

Ein L8 Datensatz setzt sich insgesamt aus elf Kanälen zusammen (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2019, S.9ff.). Nachfolgend werden die Kanäle in Anlehnung an die englischsprachige Bezeichnung „band“ als „Band“ bezeichnet. Die Bänder 1 bis 4 und 8 umfassen das sichtbare Lichtspektrum („visible“, VIS) im Wellenlängenbereich 0,435-0,676 μm und werden vom *Operational Land Imager Instrument* (OLI) aufgenommen (ebd.). Band 5 beinhaltet Aufnahmen des 0,851-0,879 μm -Bereichs des Nahinfrarots („near infrared“, NIR) (ebd.). Das kurzwellige Infrarot („shortwave infrared“, SWIR) des Bereichs 1,566-1651 μm und 2,107-2,294 μm ist in den Bändern 6 und 7 zu finden (ebd.). Band 9 dient der Erfassung von Wolkenreflektionen im Bereich 1,363-1,384 μm (ebd.). Der *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) nimmt die Bänder 10 und

11 im langwelligen Infrarot bei 10,6-11,19 μm und 11,5-12,51 μm auf (ebd.). Die räumliche Auflösung der OLI-Bänder beträgt 30 m, die der TIRS-Bänder 100 m (ebd.); wobei letztere in Level-1-Datensätzen auf eine Gitterweite von 30 m vorprozessiert sind (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2019, S.50). Die zeitliche, globale Abdeckung umfasst eine Aufnahmezeit von 16 Tagen (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2019, S.5). Die L8 Daten liegen als georeferenzierte Raster (GeoTIFF-Format) in der Projektion *WGS84/UTM32* (EPSG 32632) vor.

Datenauswahl und -vorbereitung

Die L8 Daten basieren auf Messungen optischer Sensoren (DEMMLER & HENSOLD 2012, S.359f. und U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2019, S.30). Somit mussten möglichst wolkenfreie Aufnahmen (Szenen) für den Untersuchungsraum und den Betrachtungszeitraum akquiriert werden, damit eine möglichst lückenlose und durch Wolkenreflektionen unverfälschte Berechnung der LST ermöglicht wird. Die in Tabelle 1 dargelegten L8 Szenen wurden semi-automatisiert auf Wolkenfreiheit mit positivem Ergebnis überprüft. Hierzu wurde die *Landsat Quality Assessment ArcGIS Toolbox* (U.S. GEOLOGICAL SURVEY o.J.b) in *ArcMap* (ESRI 2017) verwendet um aus den *Quality Assessment* (QA) Bändern der L8 Datensätze Wolkenmasken zu generieren. Anschließend wurden die Wolkenmasken der jeweiligen Szenen visuell mit dem Untersuchungsraum abgeglichen.

Nr.	LANDSAT_PRODUCT_ID	Datum d. Szene
1.	LC08_L1TP_196025_20130714_20200912_02_T1	14. Jul. 2013
2.	LC08_L1TP_195025_20140726_20200911_02_T1	26. Jul. 2014
3.	LC08_L1TP_196024_20150821_20200908_02_T1	21. Aug. 2015
4.	LC08_L1TP_196025_20160823_20200906_02_T1	23. Aug. 2016
5.	LC08_L1TP_195025_20170718_20200903_02_T1	18. Jul. 2017
6.	LC08_L1TP_195025_20180822_20200831_02_T1	22. Aug. 2018
7.	LC08_L1TP_195025_20190825_20200826_02_T1	25. Aug. 2019
8.	LC08_L1TP_195025_20200811_20200918_02_T1	11. Aug. 2020

Tabelle 1: Genutzte L8 Szenen (eigene Darstellung).

2.3 CORINE Land Cover

Für eine Differenzierung des Untersuchungsraums in Urban-, Landwirtschafts- und Waldflächen wurden (ebenfalls) kostenlos verfügbare *CORINE Land Cover* (CLC) Daten (COPERNICUS PROGRAMME 2021) bezogen. Bei den CLC Daten handelt es sich um eine „visuelle Interpretation von hochaufgelösten Satellitenbildern“ (ebd.). Zudem werden für die Erstellung der Daten „semi-automatisierte Lösungen angewandt, unter Nutzung nationaler in-situ Daten, Satellitenbildprozessierung, GIS-Integration und Generalisierung.“ (ebd.). Die CLC Daten liegen als georeferenzierte Raster in der flächentreuen Projektion ETRS 1989 LAEA (EPSG 3035) vor (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2021, S. 25). Die bezogenen Level-3-Daten der CLC beinhaltet 44 Klassen (ebd., S.67).

Datenauswahl und -vorbereitung

Die CLC Daten wurden auf Klassenänderungen zwischen den Jahre 2012 und 2018 untersucht. Die Veränderungen im Untersuchungsraum waren geringfügig und sind für diese Arbeit vernachlässigbar. Die Veränderungen fanden innerhalb der gleichen, übergeordneten Level-2-Klasse statt. Da im Folgenden eine eigene Klassifizierung durchgeführt wird, wurden die Daten für den gesamten Untersuchungszeitraum genutzt – und es wird unterstellt, dass es in den Jahren 2013 bis 2020 keine Änderungen der Landnutzung im Untersuchungszeitraum gab.

3. Methoden

Die nachfolgend beschriebenen Methoden zur Quantifizierung der UHI basieren im Wesentlichen auf der Berechnung der LST aus L8 Daten. Eine solche Berechnung wurde von AVDAN & JOVANOVSKA (2016) vorgeschlagen und u.a. in der Fallstudie für Skopje (Nordmazedonien) von KAPLAN ET AL. (2018) angewandt. In abgewandelter, jedoch im Grundsatz erhaltener Form hat JEEVALAKSHMI ET AL. (2017) die Methode von AVDAN & JOVANOVSKA (2016) für Chittoor (Indien) angewandt. Die Studie von JEEVALAKSHMI ET AL. (2017) ist grundlegend für die nachfolgende LST-Berechnung. Da eine Differenzierung der Landnutzung in urbane und nicht urbane Flächen durchgeführt werden muss, um eine Berechnung der UHI zu ermöglichen, wurde eine Landnutzungsklassifikation verwendet, ähnlich wie bei ZHOU ET AL. (2017). Die Berechnung der LST folgt dem in Abbildung 2 dargestellten Arbeitsfluss und kann ausschließlich auf L8 Daten angewandt werden (AVDAN & JOVANOVSKA 2016, S.1). Die Datenprozessierungen und Berechnungen wurden mit *R* (R CORE TEAM 2021) durchgeführt.

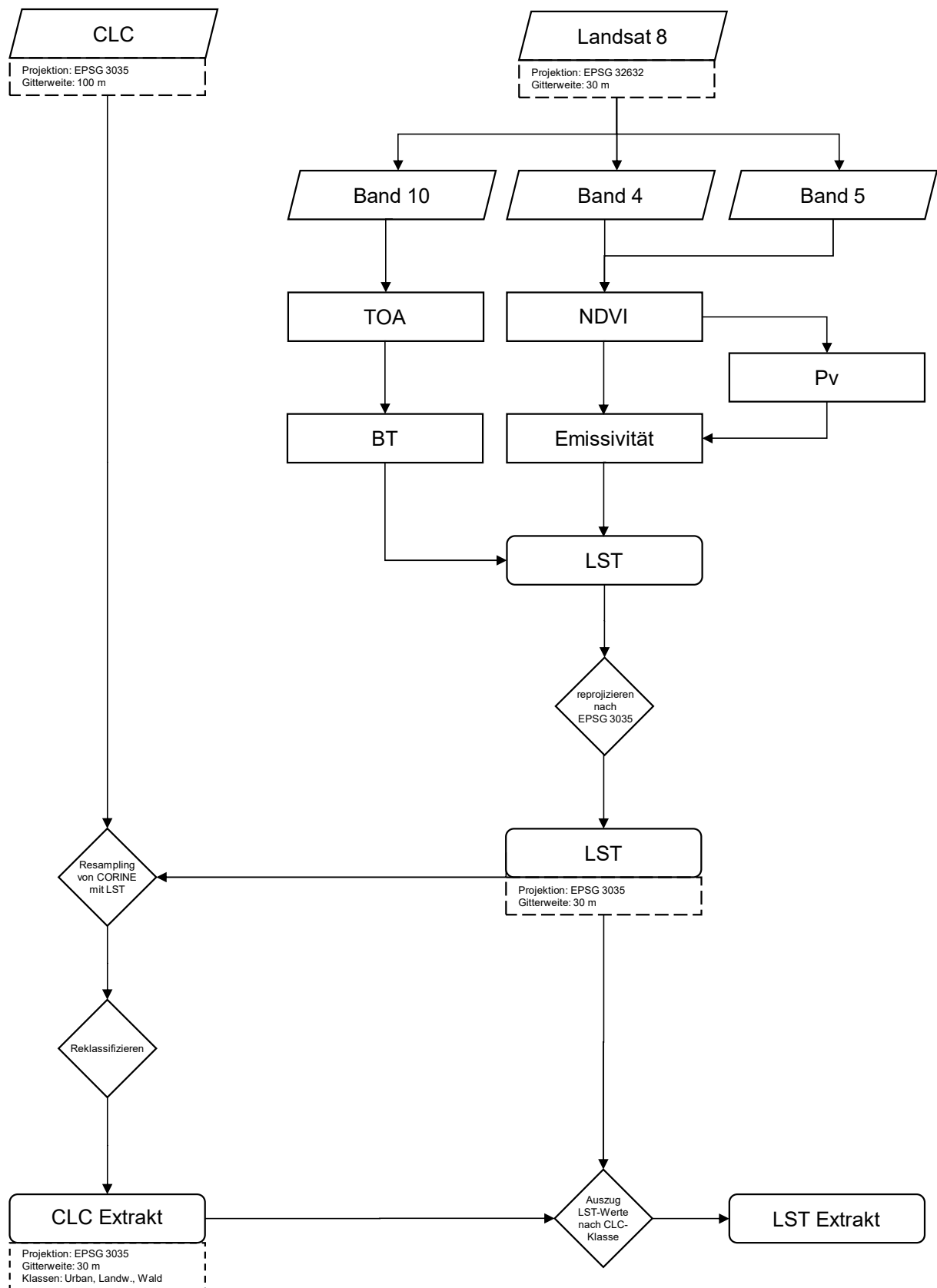


Abbildung 2: Flussdiagramm zur Berechnung und Klassifizierung der LST (verändert nach: KAPLAN ET AL. 2018, S. 3) (eigene Darstellung).

3.1 Landsat 8 Prozessierung

Zur Berechnung der LST wurden die Bänder 4, 5 und 10 der L8 Datensätze, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind, verwendet.

Schritt 1:

Das Datenformat des Bands 10 entspricht den ursprünglichen, numerischen Aufnahmewerten der Sensoren, welche allgemein als „digital numbers“ (DN) bezeichnet werden (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2019, S.47). Sie mussten zunächst in die am Sensor aufgenommene Strahlungsdichte L_λ (*at-sensor spectral radiance*) umgerechnet werden (JEEVALAKSHMI ET AL. 2017, S.9680). Hierfür wurde folgende Formel verwendet:

$$(1) \quad L_\lambda = \frac{(L_{\max} - L_{\min}) * Q_{cal}}{(Q_{cal\max} - Q_{cal\min})} + L_{\min} ,$$

wobei die Variablen

L_{\max} der Wert der maximalen Strahlungsdichte ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}$),

L_{\min} der Wert der minimalen Strahlungsdichte ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}$),

Q_{cal} die Werte der DNs,

$Q_{cal\max}$ der Maximalwert der DN und

$Q_{cal\min}$ der Minimalwert der DN sind (ebd.).

Der von JEEVALAKSHMI ET AL. (2017) genannte Streulicht-Korrekturwert O_i für Band 10 muss nicht mehr angewendet werden, da er bereits in den Level 1 Daten prozessiert ist (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 2019, S.67).

Die Werte für die jeweiligen Variablen können den L8 Daten beiliegenden Metadaten entnommen werden und sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Variable	Wert
L_{\max}	22,0018
L_{\min}	0,10033
Q_{calmax}	65535
Q_{calmin}	1
K_1	774,8853
K_2	1321,0789

Tabelle 2: Landsat 8 Metadaten (JEEVALAKSHMI ET AL. 2017, S.9681) (eigene Darstellung).

Schritt 2:

Als nächstes wurde die Strahlungstemperatur BT („brightness temperature“) mit folgender Formel direkt in °C berechnet:

$$(2) \quad BT = \frac{K_2}{\ln \left[\left(\frac{K_1}{L\lambda} \right) + 1 \right]} - 273.15 ,$$

wobei die Variablen K_1 und K_2 die thermalen Konstanten des Bands 10 sind (JEEVALAKSHMI ET AL. 2017, S.9681), und für die Berechnung die Werte aus Tabelle 2 verwendet wurden. Der Effekt des atmosphärischen Wasserdampfs auf die Strahlungstemperatur BT wurde nicht weiter betrachtet (ebd.).

Schritt 3:

In diesem Schritt wurde der normalisierte differenzierte Vegetationsindex („Normalized Difference Vegetation Index“, NDVI) berechnet. Der NDVI wird für die Berechnung des Anteils der Vegetation P_v („Proportion of Vegetation“, *Schritt 4*) und der Emissivität ε (*Schritt 5*) benötigt (ebd.). Folgende Formel wurden dafür genutzt:

$$(3) \quad NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} ,$$

wobei die Variablen *NIR* Band 5 und *RED* Band 4 der L8 Daten entsprechen (ebd.). Die Werteskala des NDVI liegt im Bereich von -1 bis +1, ist dimensionslos und ermöglicht die Differenzierung der Oberflächenbeschaffenheit bzw. Oberflächenobjekten (ebd.).

Schritt 4:

Aus den NDVI Werten wurde der Anteil der Vegetation P_V berechnet und dafür die Formel:

$$(4) \quad P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2,$$

angewandt (ebd.). Dabei wurde für die Variable $NDVI_S$ der Wert 0,2 und für $NDVI_V$ 0,5 verwendet (ebd.). Diese Grenzwerte definieren den Übergang innerhalb des dimensionslosen NDVI von vegetationsfreiem Lockerboden, zu leicht bewachsener Oberfläche („soil“, $NDVI_S$ -Grenzwert), sowie von leicht bewachsener Oberfläche zu rel. stärker bewachsener Oberfläche („vegetation“, $NDVI_V$ -Grenzwert) (ebd.). Die P_V wird benötigt um die Emissivität ε hinsichtlich der Schwarzkörperstrahlung der Oberflächenobjekte zu korrigieren (Schritt 5) (ebd.).

Schritt 5:

Die mit nachfolgender Formel berechnete Emissivität ε wird in Schritt 6 verwendet, um die BT um die abweichende Reflektion der Oberflächenobjekte korrigieren (ebd.).

$$(5) \quad \varepsilon_\lambda = \varepsilon_{V\lambda} P_V + \varepsilon_{S\lambda} (1 - P_V) + C_\lambda,$$

wobei für die Emissivität der Vegetation ε_v der Wert 0,973 und für die Emissivität des „soil“ ε_s der Wert 0,996 verwendet wurde (JEEVALAKSHMI ET AL. 2017, S.9681 und S.9682). Die Oberflächenrauhigkeit wird mit dem konstanten Wert $C_\lambda=0,005$ berücksichtigt (JEEVALAKSHMI ET AL. 2017, S.9681). Die Formel (5) ergibt sich aus der Definition der NDVI-Grenzwerte; wobei ein $NDVI < 0$ für Wasseroberflächen, 0 bis 0,2 für „soil“, 0,2 bis 0,5 für Mischflächen aus „soil“ und Vegetation steht und wie folgt zusammengefasst werden kann:

$$(6) \quad \varepsilon_\lambda = \begin{cases} \varepsilon_{S\lambda}, & NDVI < NDVI_S \\ \varepsilon_{S\lambda} P_V + \varepsilon_{S\lambda} (1 - P_V) + C_\lambda, & NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V \\ \varepsilon_{S\lambda} + C_\lambda, & NDVI > NDVI_V \end{cases}$$

(ebd.).

Schritt 6:

Schließlich wurde die LST in °C wie folgt berechnet:

$$(7) \quad LST = \frac{BT}{\{1 + [(\lambda BT / \rho) \ln \epsilon_\lambda]\}},$$

wobei die Variable λ dem mittleren Wellenlängenwert des Bands 10 (10,895 μm) entspricht und ρ wie folgt berechnet wird:

$$(8) \quad \rho = h \frac{c}{\sigma},$$

wobei hier gilt: h ist die Plancksche Konstante, c ist die Lichtgeschwindigkeit und σ ist die Boltzmann-Konstante (JEEVALAKSHMI ET AL. 2017, S.9682).

Das berechnete LST-Raster wurde anschließend in die flächentreue Projektion der CLC Daten (EPSG 3035) überführt.

Validierung der LST Werte

Zur Prüfung der berechneten LST-Werte auf Plausibilität wurden diese mit einer Szene des „AST_08 Surface Kinetic Temperature“ (U.S. GEOLOGICAL SURVEY o.J.c) verglichen. Hierbei wurde die Datenskalisierung verglichen und als plausibel bewertet.

3.2 CORINE Land Cover Prozessierung

Die Gitterweite der CLC Daten wurde auf Grundlage des erzeugten LST-Rasters von 100 m auf 30 m verfeinert („Resampling“). Hierzu wurde die *resample*-Funktion des *raster-Pakets* (HIJMANS 2021) in *R* verwendet und als Interpolationsmethode „nearest neighbor“ gewählt, da die Klassifizierung der CLC Daten einer diskreten Datenverteilung folgt. Die Klassen des verfeinerten CLC-Rasters wurden anschließend reklassifiziert (Tabelle 3).

CLC Code	Original CLC Klassenname	Reklassifizierung
111	Continuous urban fabric	} Urban
112	Discontinuous urban fabric	
121	Industrial or commercial units	
211	Non-irrigated arable land	} Landwirtschaft
222	Fruit trees and berry plantations	
231	Pastures	
311	Broad-leaved forest	} Wald
312	Coniferous forest	
313	Mixed forest	

Tabelle 3: Original CORINE Land Cover Klassen und Reklassifizierung (eigene Darstellung).

Die Reklassifizierung beinhaltet die zur Berechnung der UHI benötigte Differenzierung nach urbanen und nicht-urbanen Flächen. So wurden die Klassen „Landwirtschaft“ und „Wald“ als Ausdruck nicht-urbaner Flächen gebildet. Dies lässt eine spätere Betrachtung dieser ausdifferenzierten Flächen zu. Mithilfe dieser reklassifizierten CLC Daten werden im finalen Arbeitsschritt die LST-Werte extrahiert und zur Berechnung der UHI verwendet. Die reklassifizierten CLC Klassen sind in Abbildung 3 den original CLC Klassen gegenübergestellt. Die Klassennamen des original CLC Codes sind in Tabelle 3 aufgelistet.

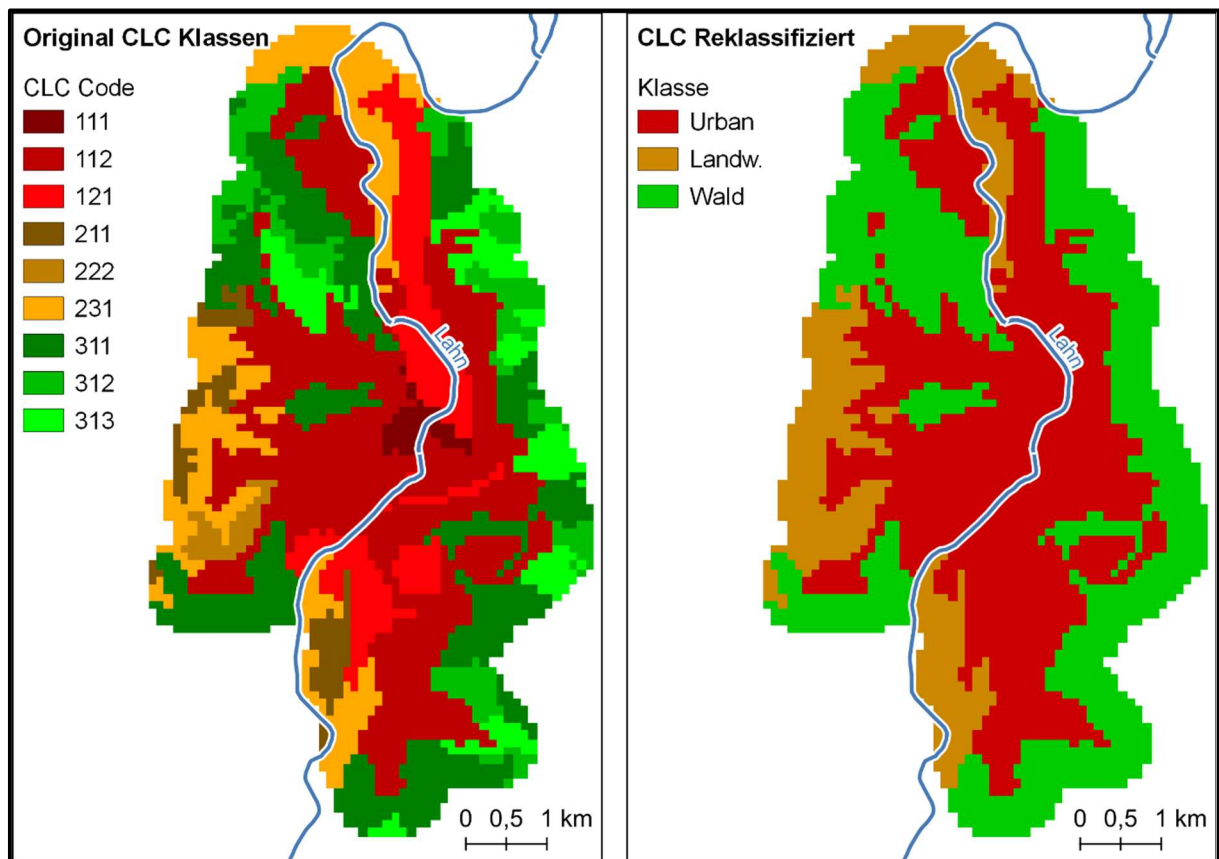


Abbildung 3: Original CLC Klassen (links) und reklassifizierte CLC Klassen (rechts) (eigene Darstellung).

3.3 Quantifizierung der städtischen Wärmeinsel

Zur Quantifizierung der UHI wurden zunächst LST-Mittelwerte aller reklassifizierten CLC Klassen gebildet. Desweiteren wurde der LST-Mittelwert der nicht-urbanen Flächen gebildet (reklassifizierte CLC Klassen „Landwirtschaft“ und „Wald“) (ZHOU ET AL. 2017, S.2). Schließlich wurden die Mittelwerte der urbanen und nicht-urbanen Flächen gegenübergestellt, indem die Differenz gebildet wurde (ebd.). Somit ergibt sich ein durchschnittlicher Temperaturwert der beschreibt, um wieviel °C das als urbane Fläche ausgewiesene Gebiet vom durchschnittlichen Temperaturwert der als nicht-urbane Fläche ausgewiesenen Gebiets abweicht (ebd.). Somit handelt es sich um einen Intensitätswert in °C zur Beschreibung der UHI und ihres Effekts (UHIE) (ebd.).

Um die räumliche Ausdehnung der UHI zu quantifizieren wurden Ellipsen der einfachen Standardabweichung („Standard Deviatonal Ellipse“, SDE) für die LST-Werte der urbanen Flächen mit dem *Tool* „Directional Distribution“ in *ArcMap* berechnet (ESRI (o.J.)). Die Ellipsen beinhalten ca. 63% aller in die Berechnung einfließenden Temperaturwerte (ebd.). Weiterhin die Zentroide als Ausdruck des Mittelpunkts der UHI ermittelt.

4. Ergebnisse

Eine Übersicht der berechneten mittleren LST-Werte über alle Klassen für die Jahre 2013 bis 2020 ist in Tabelle 4 dargestellt. Die mittlere Temperaturdifferenz der Klasse „Urban“ und der kumulierten Klasse „Landwirtschaft und Wald“, im Sinne nicht-urbaner Flächen, wird ebenfalls als Temperaturwert in Tabelle 4 gelistet. Dabei handelt es sich um die Kenngröße zur Beschreibung des UHIE. Ergänzt wird diese Ergebnisdarstellung durch die Größenangabe der SDE in km².

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Jahr
Ø LST reklassifizierter CLC Klassen	Urban	23,64	24,04	24,06	24,11	26,8	28,71	27,39	27,86	°C
	Landwirtschaft	21,83	19,68	23,39	24,34	24,77	29,39	27,45	28,25	
	Wald	18,05	18,82	19,48	20,49	21,91	24,35	23,75	24,25	
	Landw. + Wald	19,26	19,09	20,74	21,73	22,83	25,97	24,94	25,54	
	UHIE	4,38	4,94	3,32	2,38	3,97	2,74	2,45	2,32	
	SDE	15,65	14,65	15,36	15,59	15,35	15,37	15,32	15,33	qkm

Tabelle 4: Die mittleren klassifizierten LST, der UHIE und die Größe der SDE für die Jahre 2013 bis 2020 (eigene Darstellung).

Die maximal ermittelte LST beträgt 35,27°C und die minimale 10,1°C (vgl. Temperaturskala der Abbildungen 4 bis 7). Insgesamt steigen die mittleren LST-Werte aller klassifizierten Flächen von 2013 bis 2020 an, während der UHIE im selben Zeitraum an Intensität verliert (Tabelle 4, Diagramm 1 und 2). Die Größe der UHI unterliegt nur geringfügigen Schwankungen und kann als konstant angesehen werden (SDE, Tabelle 1).

Bei genauerer Betrachtung ist die mittlere LST der urbanen Fläche in den Jahren 2013 bis 2015 um 0,42°C nur geringfügig gestiegen, während in den Folgejahren 2016 bis 2020 ein Anstieg um 3,75°C beobachtet werden kann (Tabelle 4, Diagramm 1 und 2).

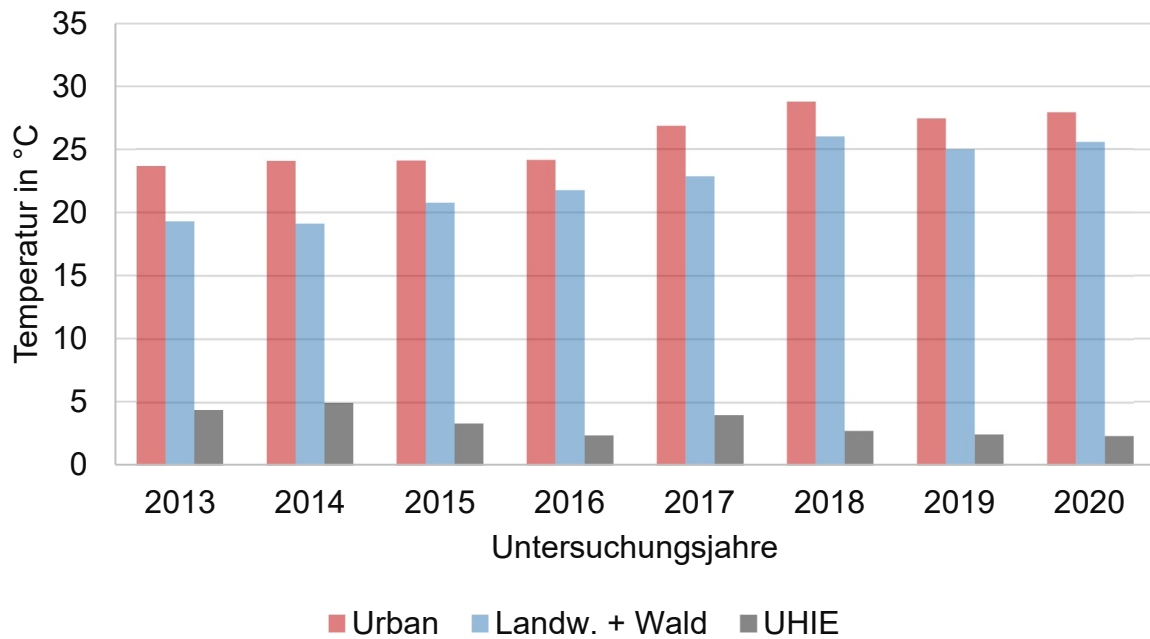


Diagramm 1: Gegenüberstellung der mittleren urbanen LST und der kumulierten Klassen „Landwirtschaft“ und „Wald“, sowie des UHIE (eigene Darstellung).

Die mittlere Temperaturveränderung der urbanen Fläche der Jahre 2013 und 2020 beträgt $+4,22^{\circ}\text{C}$. Für die nicht-urbane Fläche (Landw.+Wald) kann für die selben Vergleichsjahre eine Veränderung von $+6,28^{\circ}\text{C}$ festgestellt werden. Zusammengefasst bedeutet dies, dass sich die nicht-urbane Fläche in Relation zur urbanen Fläche um $2,06^{\circ}\text{C}$ stärker erwärmt hat (Diagramm 1). Abbildungen 4 bis 7 verdeutlichen diesen Effekt. Während für alle Jahre eine deutliche Abgrenzung der Temperaturwerte zwischen urbanem und nicht-urbanem Gebiet erkennbar ist, nimmt deren Temperaturdifferenz im Verlauf der Zeitreihe bis 2020 zunehmend ab. Dies ist ebenfalls anhand der abnehmenden Temperaturdifferenzen in Diagramm 1 erkennbar. Eine differenzierte Betrachtung der mittleren LST der nicht-urbanen Fläche zeigt, dass sich die landwirtschaftlichen Flächen in den Jahren 2016 und 2018 bis 2020 stärker erwärmten als die mittlere LST urbaner Fläche (Tabelle 4, Diagramm 2).

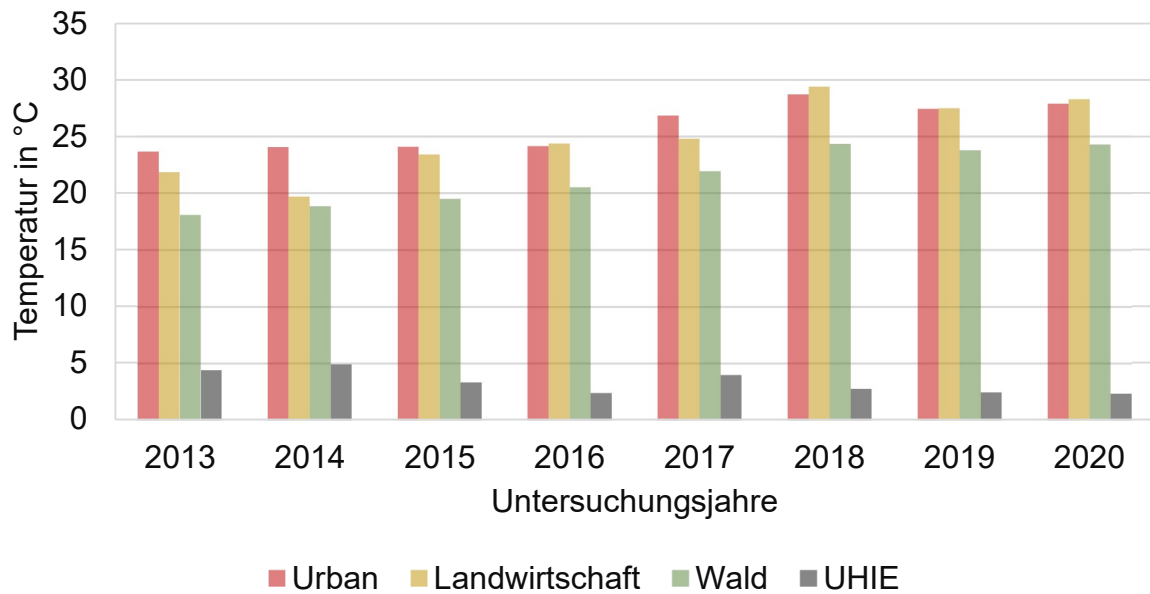


Diagramm 2: Gegenüberstellung der mittleren LST aller Klassen, sowie des UHIE (eigene Darstellung).

Für Waldflächen tritt dieser Effekt nicht ein, obwohl auch diese einer stetigen Erwärmung im Untersuchungszeitraum unterlagen. Die mittlere Temperaturdifferenz der Jahre 2013 und 2020 beträgt für Waldflächen 6,2°C und für landwirtschaftliche Flächen 6,42°C. Dies wird ebenfalls in den Abbildungen 4 bis 7 deutlich. Der östliche Bereich des Untersuchungsraums beinhaltet als „Wald“ klassifizierte Flächen und der westliche Bereich als „Landwirtschaft“ klassifizierte Flächen (vgl. Abbildung 3). Dabei ist in den Abbildungen 4 bis 7 ein deutlicher Anstieg der mittleren LST im westlichen Untersuchungsraum gegenüber dem Anstieg im östlichen Teil erkennbar.

Einzeln betrachtet haben sich Waldflächen in den Vergleichsjahren 2013 und 2020 gegenüber urbanen Flächen um 1,98°C stärker erwärmt, und landwirtschaftliche Flächen um 2,2°C.

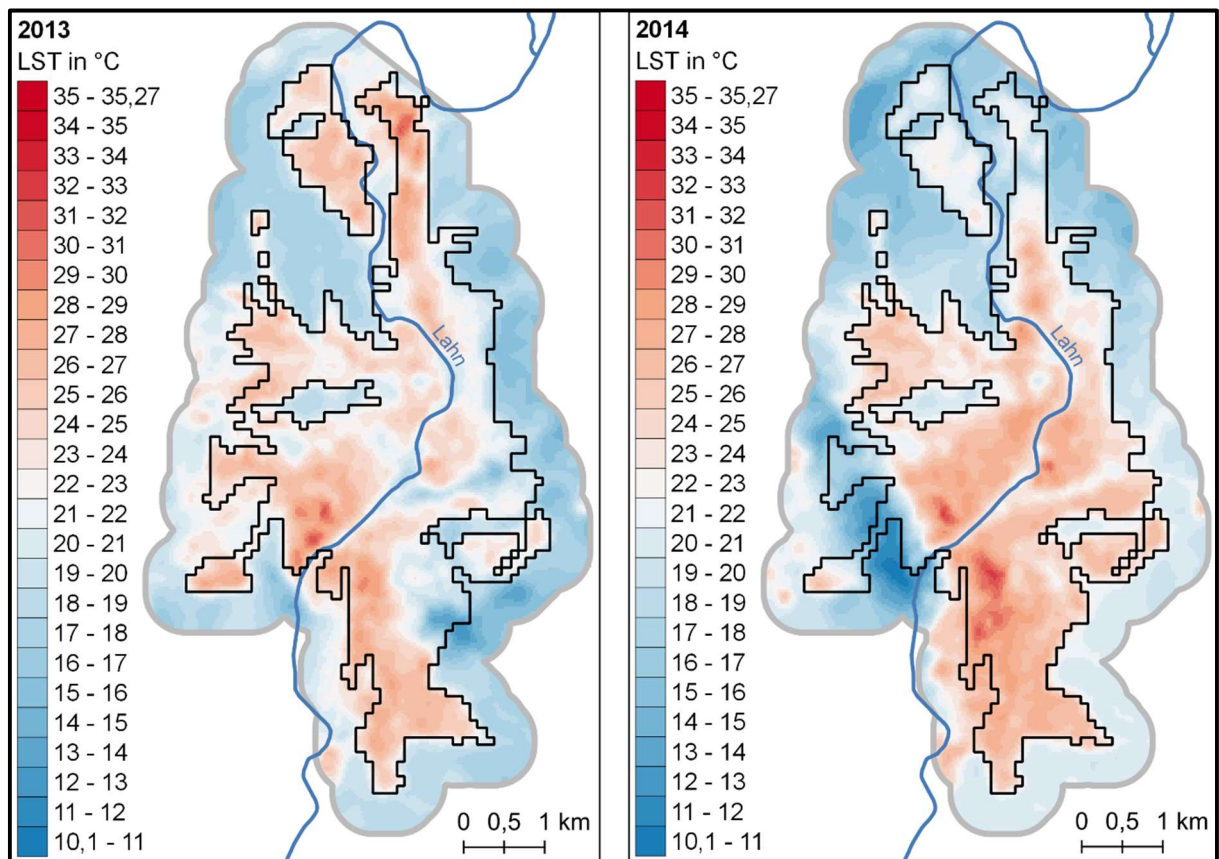


Abbildung 4: Die LST im Untersuchungsraum (2013 und 2014) (eigene Darstellung).

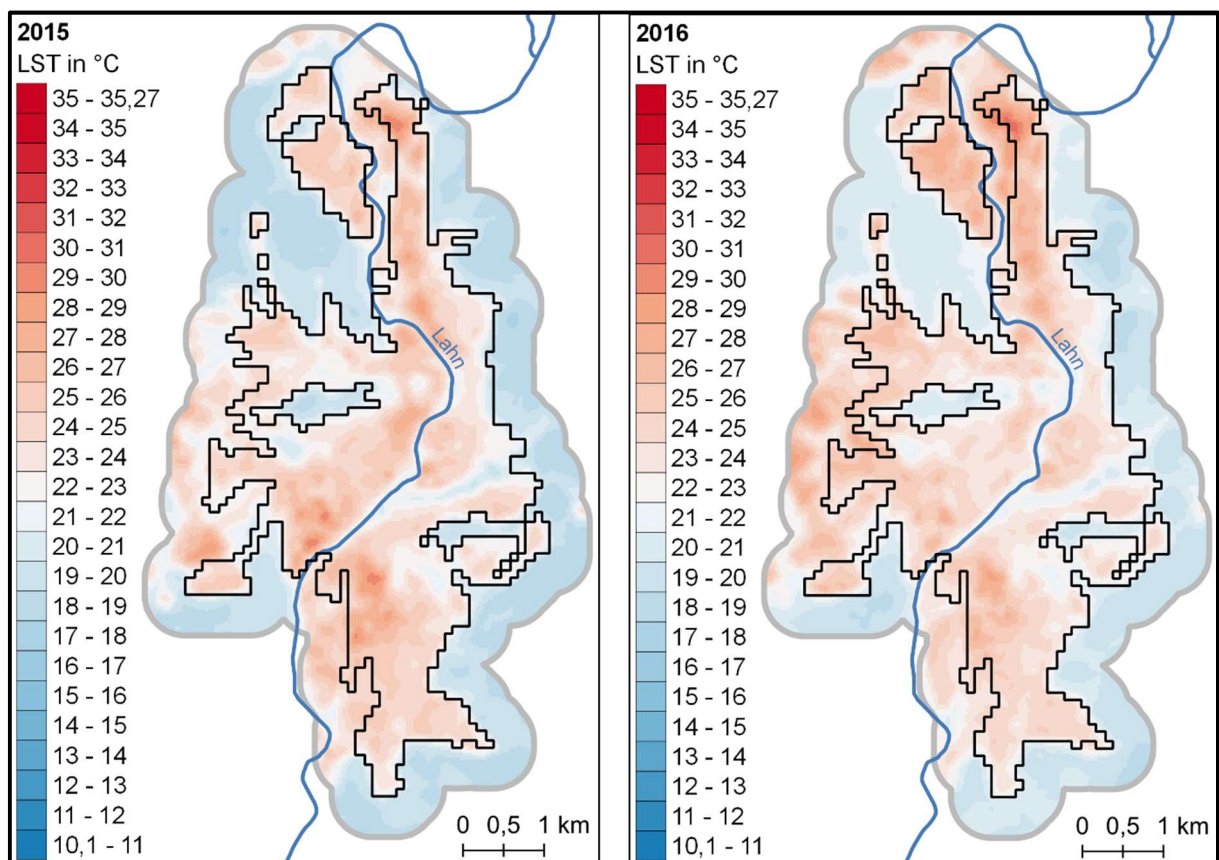


Abbildung 5: Die LST im Untersuchungsraum (2015 und 2016) (eigene Darstellung).

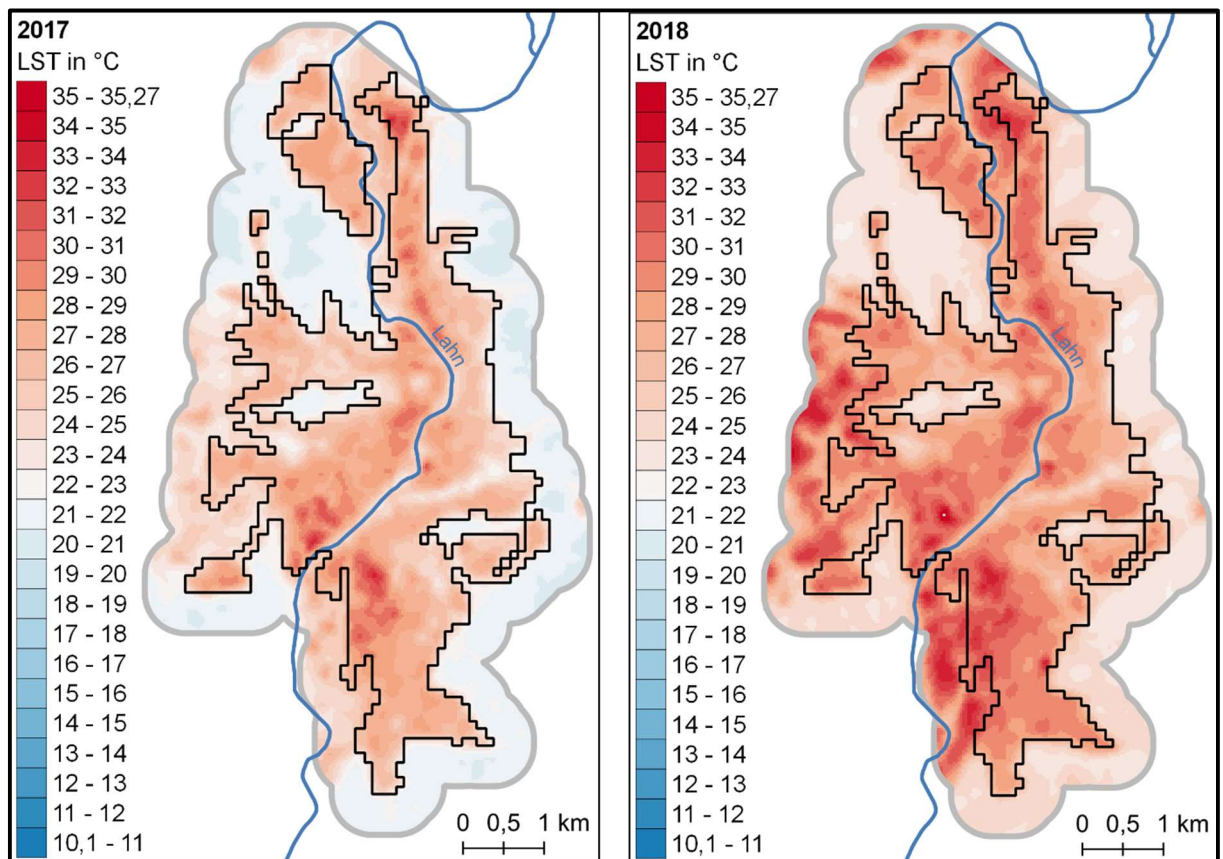


Abbildung 6: Die LST im Untersuchungsraum (2017 und 2018) (eigene Darstellung).

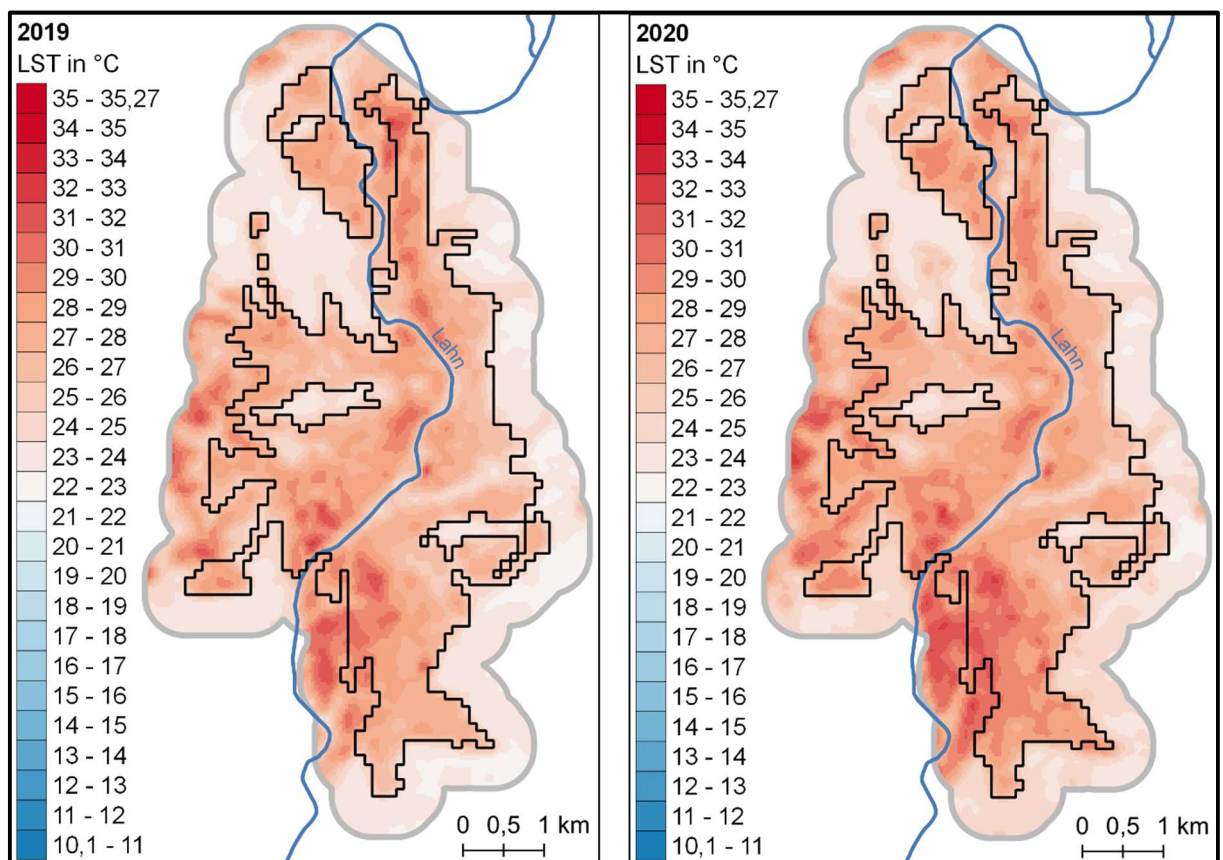


Abbildung 7: Die LST im Untersuchungsraum (2013 und 2014) (eigene Darstellung).

Die räumliche Verteilung der UHI, ausgedrückt durch die SDE sowie ihrer Zentroide, ist in Abbildung 8 dargestellt. Insgesamt ist erkennbar, dass es kaum eine räumliche Veränderung der UHI im Untersuchungszeitraum gibt.

Einzig das Jahr 2014 bildet eine Ausnahme und weicht in Relation zur Änderung der übrigen Jahre unverhältnismäßig ab. Dies spiegelt sich in der mittleren LST der landwirtschaftlichen Flächen des Jahres 2014 wieder, ist aus den Werten der anderen Klassen jedoch nicht ersichtlich (Tabelle 4, Diagramm 2). Mit 19,68°C liegt der Wert deutlich unter denen der übrigen Jahre.

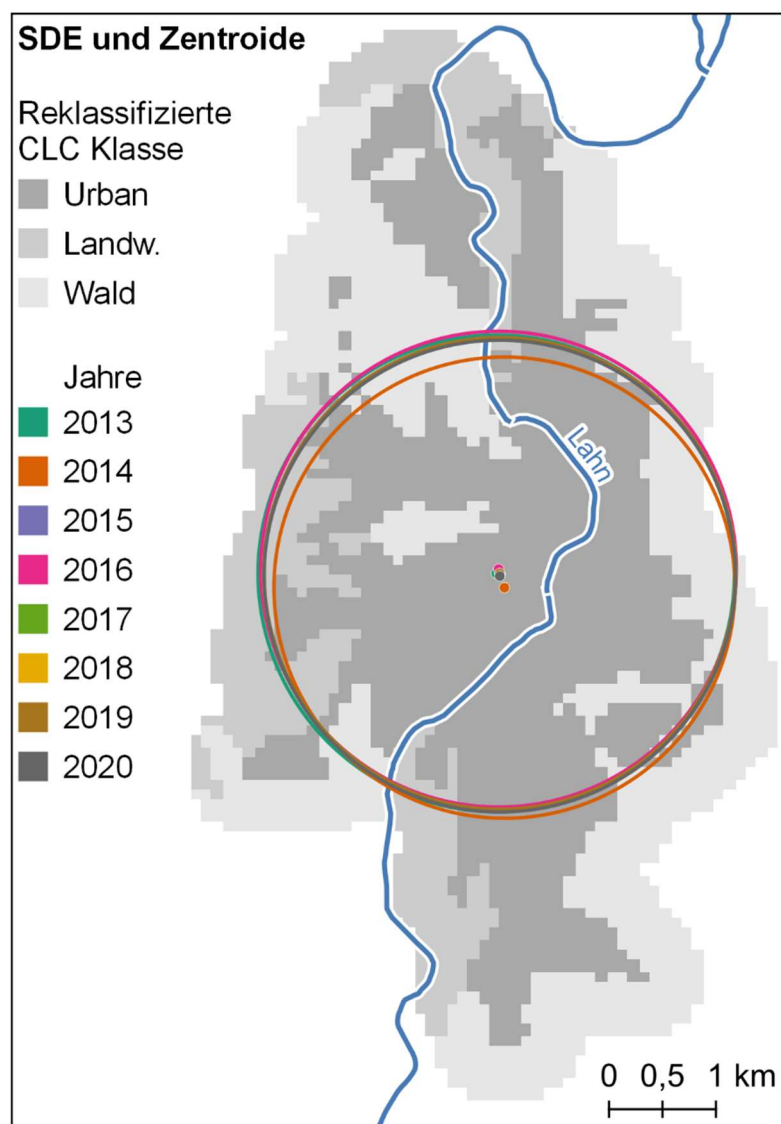


Abbildung 8: SDE und Zentroide – die UHI im Untersuchungsraum (eigene Darstellung).

5. Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit ist der Nachweis, dass es einen signifikanten Unterschied der LST in urbanen und nicht-urbanen Gebieten innerhalb des Untersuchungsgebiets gibt. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen diese signifikanten Unterschiede, welche sich in deutlich abgrenzbaren Temperaturen der Klassen ausdrücken.

Ferner wurde die Annahme getroffen, dass im Verlauf der Zeitreihe die Intensität der UHI relativ konstant bleibt. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass der UHIE innerhalb des Untersuchungszeitraums Schwankungen unterliegt und insgesamt abnimmt. Diese Schwankungen resultieren aus einer unterschiedlich starken Veränderung der durchschnittlichen LST-Werten urbaner und nicht-urbaner Flächen.

Darüberhinaus wurde vermutet, dass es deutliche Unterschiede der LST-Werte innerhalb der nicht-urbanen Klassen „Landwirtschaft“ und „Wald“ gibt. Obwohl die Gesamtveränderung des mittleren LST in den Vergleichsjahren 2013 und 2020 lediglich einen Unterschied von $0,22^{\circ}\text{C}$ zwischen landwirtschaftlichen und Waldflächen aufweist, zeigen die Ergebnisse in Diagramm 2 deutlich, dass die mittlere LST landwirtschaftlicher Flächen stärkeren Schwankungen unterliegt. Während die mittlere LST der Waldflächen insgesamt ansteigt, verhält sich der mittlere LST der landwirtschaftlichen Flächen insbesondere in den Jahren 2014 und 2018 abweichend. Somit kann die Hypothese angenommen werden.

Sowohl in Abbildung 4 (rechts), als auch in Diagramm 2, zeigt sich eine Auffälligkeit für das Untersuchungsjahr 2014. Bei räumlicher Betrachtung (Abbildung 4, rechts) zeigt sich im Südwesten ein deutlich kälterer Bereich; mit den geringsten Werten über den gesamten Untersuchungszeitraum. Diese Anomalie zeigt sich ebenfalls darin, dass im Jahr 2014 (Diagramm 2) der mittlere LST der landwirtschaftlichen Fläche das einzige Mal annähernd so hoch ist, wie die mittlere LST der Waldflächen. Dies ist ebenfalls in der Abweichung der SDE und ihres Zentroids für das Jahr 2014 erkennbar (Abbildung 8). Es wird vermutet, dass diese Anomalie auf einen Fehler in der Datenauswahl der L8 Daten zurückzuführen ist, da es sich möglicherweise um einen Wolkenschatten handelt, der seinen Ursprung außerhalb des auf Wolkenfreiheit überprüften Untersuchungsraums hat. Diese Annahme erscheint valide, da sich in den Jahren 2015 bis 2020 im Bereich dieser abweichenden LST-Werte durchgehend höhere Werte feststellen lassen, als in der direkten Umgebung.

Der in Abschnitt 3.1 behandelte Berechnungsprozess der LST wurde Schritt für Schritt nach JEEVALAKSHMI ET AL. (2017) durchgeführt. Ein alternativer Berechnungsweg der LST führt über das *R-Paket RStoolbox* (LEUTNER ET AL. 2019). Dieses bietet die Möglichkeit die Korrekturen der L8 Daten funktionsgesteuert durchzuführen. Desweiteren steht das *R-Paket LST* (DAS ET AL. 2021) zur Verfügung, welches unter anderem diverse Funktionen zur Berechnung einzelner Abschnitte der Methode in Abschnitt 3.1 umfasst. Jedoch geht aus der Dokumentation nicht ausreichend klar hervor, welche Formeln und Arbeitsschritte den Funktionen zugrunde liegen. Daher wurde für eine nachvollziehbare Durchführung die schrittweise Berechnung nach JEEVALAKSHMI ET AL. (2017) ausgewählt.

Für das Untersuchungsgebiet wurde das größte zusammenhängende Stadtgebiet gewählt, um die Ergebnisse nicht durch die umliegenden Siedlungen zu verfälschen. Um eine annähernd gleichmäßige Vergleichsfläche nicht-urbaner Gebiete zu erhalten, wurde ein Puffer von 500 m gewählt. Allerdings befinden sich einige Siedlungen direkt am Rand des Puffers. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Siedlungen für eine geringfügig erhöhte Temperatur innerhalb der angrenzenden nicht-urbanen Gebiete verantwortlich sind. Ferner grenzt unmittelbar im Norden des Untersuchungsraums die Gemeinde Cölbe an die nördlichsten Ausläufer urbaner Flächen des Untersuchungsgebiets. Daher war eine Pufferung in diesem Bereich nicht möglich.

Für die Differenzierung von urbanen und nicht-urbanen Flächen wurden CLC Daten verwendet. Diese bieten für großskalige Untersuchungsräume eine möglicherweise ausreichend hohe Genauigkeit, jedoch zeigen sich bei genauem Abgleich mit hochaufgelösten Überfliegerdaten, bspw. mit einer Hintergrundkarte in *ArcMap*, geringfügige, aber doch häufige Abweichungen. Dies ist der minimalen Kartiergröße der original CLC Daten (COPERNICUS PROGRAMME 2021) geschuldet. Somit ist es möglich, dass vereinzelt Flächen der falschen Klasse zugeordnet werden. Darüberhinaus wurden die original CLC Daten der Gitterweite 100 m zu Berechnungszwecken auf die Gitterweite der LST-Daten von 30 m verfeinert („Resampling“). Da die Gitterweiten nicht exakt übereinanderliegen und 100 m nicht durch 30 m, mit ganzzahligem Ergebnis, teilbar sind, kann es bei der verwendeten Interpolationsmethode „nearest neighbor“ ebenfalls zu Fehlklassifikationen kommen.

Diese möglichen Klassifizierungsfehler sind jedoch insgesamt für die Untersuchung tolerierbar.

6. Fazit

Für das Untersuchungsgebiet innerhalb der Universitätsstadt Marburg lässt sich eine städtische Wärmeinsel mittels „Landsat 8“ und „CORINE Land Cover“ Daten eindeutig nachweisen, da es einen signifikanten Unterschied der Landoberflächentemperatur zwischen urbanen und nicht-urbanen Flächen gibt.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum ist die Intensität der städtischen Wärmeinsel rückläufig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die nicht-urbanen Flächen in Relation zu den urbanen Flächen des Untersuchungsgebiets stärker erwärmt haben.

Hierbei ist auffällig, dass landwirtschaftliche Flächen sich gegenüber Waldflächen insgesamt geringfügig stärker erwärmen. Jedoch bei räumlicher Betrachtung stärkeren Schwankungen unterliegen.

Literaturverzeichnis

- ANGEL, S., PARENT, J., CIVCO, D. & A. BLEI (2011): Making Room for a Planet of Cities. Policy Focus Report. Lincoln Institute of Land Policy. Cambridge.
- AVDAN, U. & G. JOVANOVSKA (2016): Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. Journal of Sensors Volume 2016. ArticleID 1480307. 8 pages. DOI: 10.1155/2016/1480307.
- BASU, R. & J. SAMET (2002): Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence. Epidemiologic Reviews Vol. 24. No. 2. DOI: 10.1093/epirev/mxf007.
- COPERNICUS PROGRAMME (2021): CORINE Land Cover.
<<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>>. (Zugriff: 11.09.2021).
- DAS, B., ROY, D., CHAKRABORTY, D., BHATTACHARYA, B. & P. RATHORE (2021): LST: Land Surface Temperature Retrieval for Landsat 8. R package version 1.1.0.
<<https://CRAN.R-project.org/package=LST>>.
- DEFRIES, R. (2008): Terrestrial Vegetation in the Coupled Human-Earth System: Contributions of Remote Sensing. Annual Review of Environment and Resources 33. 369–390.
- DEMMLER, P. & S. HENSOLD (2012): Meteorologische Satelliten und Sensoren. In: KÖPKE, P. & M. SACHWEH (Hrsg.): Satellitenmeteorologie. 344-369. Stuttgart.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (o.J.): Klima an ausgewählten Wetterstationen in den Bundesländern. Gießen/Wettenberg, 01.01.1939 - 25.09.2021.
<<https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvo/alle.html>>. (Zugriff: 25.09.2021).
- ELLIS, F., NELSON, F. & L. PINCUS (1975): Mortality during Heat Waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973. Environmental Research 10. 1-13.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) (2021): Copernicus Land Monitoring Service Corine Land Cover. User Manual. Version 1.0. Kopenhagen.
- ESRI (2017): ArcGIS Desktop. Version 10.5.1.
- ESRI (o.J.): ArcGIS Pro geoprocessing tool reference. How Directional Distribution (Standard Deviation Ellipse) works. <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-directional-distribution-standard-deviationa.htm>>. (Zugriff: 27.09.2021).
- GOOGLE WEB MAP SERVICE (o.J.): Google Satellite.
<<https://www.google.de/maps/preview>>. (Zugriff: 21.09.2021).

- HIJMANS, R.J. (2021): raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.4-13. <<https://CRAN.R-project.org/package=raster>>.
- JEEVALAKSHMI, D., REDDY, S. & B. MANIKIAM (2017): Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT data using Emissivity Estimation. International Journal of Applied Engineering Research. Volume 12. 20. 9679-9687.
- KAPLAN, G., AVDAN, U. & Z. AVDAN (2018): Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia. Proceedings 2018 2. 358. DOI: 10.3390/ecrs-2-05171.
- LAND HESSEN (o.J.): Statistik.Hessen. <<https://statistik.hessen.de>>. (Zugriff: 26.09.2021).
- LANDSBERG, H. (1981): The Urban Climate. International Geophysics Series Vol. 28.
- LEUTNER, B., HORNING, N. & J. SCHWALB-WILLMANN (2019): RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis. R package version 0.2.6. <<https://CRAN.R-project.org/package=RStoolbox>>.
- OKE, T. (1973): CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND. Atmospheric Environment Pergamon Press 1973 Vol. 7. 769-779.
- OKE, T. (1982): The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108. 1-14.
- OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS (o.J.): OpenStreetMap-Data. <<https://openstreetmap.org>>. (Zugriff: 11.09.2021).
- R CORE TEAM (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- RAO, K. (1972): Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 53. No. 7. 647-648.
- SARRAT, C., LEMONSU, A., MASSON, V. & D. GUEDALIA (2006): Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. Atmospheric Environment 40. 1743–1758. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.11.037.
- SEEBACHER, D., MILLER, M., POLK, T., FUCHS, J. & D. KEIM (2018): Visual Analytics of Volunteered Geographic Information: Detection and Investigation of Urban Heat Islands. IEEE Visualization in Data Science (VDS) 22 October 2018, Berlin.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2019): Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0. Sioux Falls, South Dakota. (Zugriff: 11.09.2021).
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (o.J.a): Landsat Missions. Landsat <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>.

- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (o.J.b): Landsat Missions. Landsat Quality Assessment ArcGIS Toolbox. <<https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox>>. (Zugriff: 20.09.2021).
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (o.J.c): ASTER L2 Surface Kinetic Temperature. AST_08v003. <https://lpdaac.usgs.gov/products/ast_08v003/>. (Zugriff: 21.09.2021).
- UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION (2019): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York.
- WENG, Q. & Y. SHIHONG (2006): Urban Air Pollution Patterns, Land Use, And Thermal Landscape: An Examination Of The Linkage Using Gis. Environmental Monitoring and Assessment (2006) 117. 463–489. DOI: 10.1007/s10661-006-0888-9.
- ZHOU, B., RYBSKI, D. & J. KROPP (2017): The role of city size and urban form in the surface urban heat island. Scientific Reports 7. 4791. DOI:10.1038/s41598-017-04242-2.
- ZHOU, D., XIAO, J., BONAFONI, S., BERGER, C., DEILAMI, K., ZHOU, Y., FROLKING, S., YAO, R., QIAO, Z. & A. SOBRINO (2019): Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. Remote Sensing 11. 48. DOI: 10.3390/rs11010048.

Erklärung

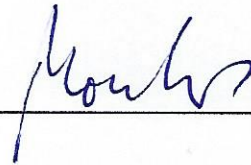
Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Bachelorarbeit wurde in der jetzigen oder einer ähnlichen Form noch bei keiner anderen Hochschule eingereicht und hat noch keinen sonstigen Prüfungszwecken gedient.

Datum:

30.09.2021

Unterschrift:



Einverständniserklärung zur Einsichtnahme von Abschlussarbeiten

- ☒ Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Fachbereichs-/Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.
- ☐ Ich bin nicht damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Fachbereichs-/Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.

Datum:

30.09.2021

Unterschrift:

