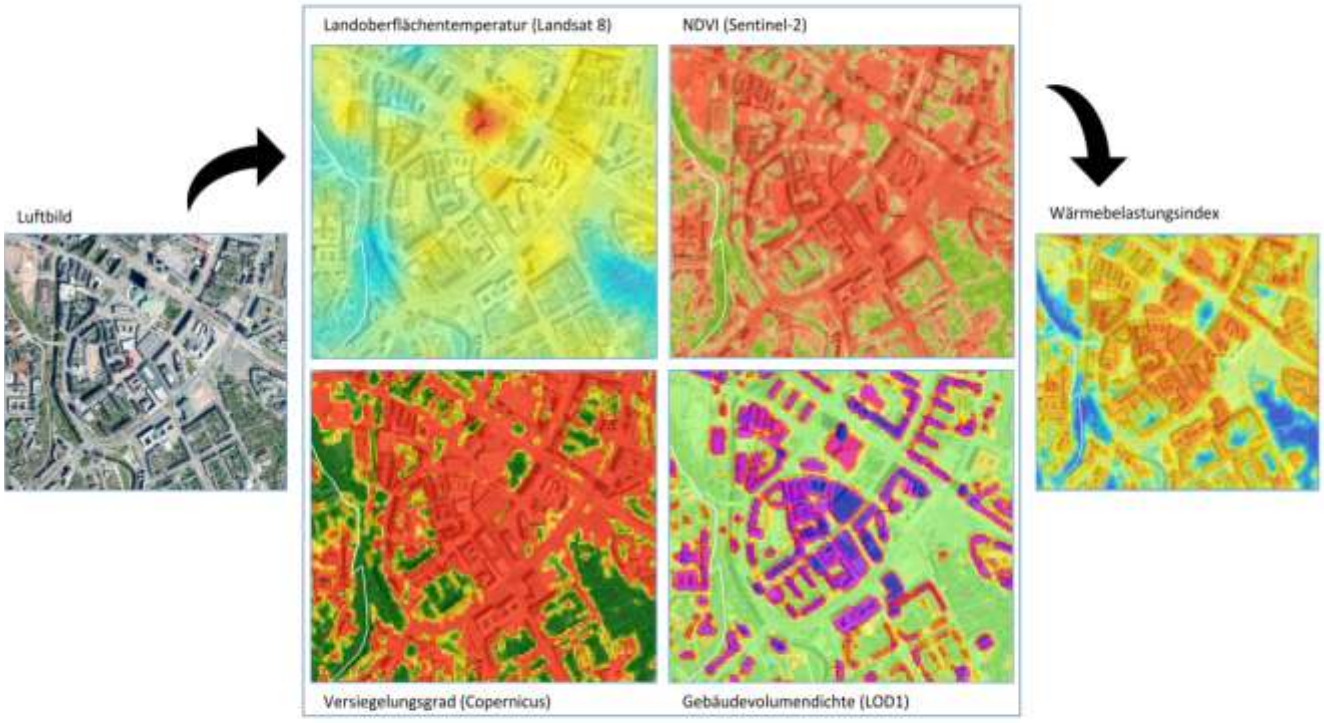
LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Stadtklima - Hitze



Stadtklima - Hitze (Modul 1 im Projekt Stadtklima Sachsen)

M.Sc. Geoinformatik Dennis Kehl, M.Sc. Geoinformatik Lisa Mastaler, Dipl. Geogr. Jakob Maercker,

Institution: Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz GmbH

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 8
2 Theoretische Grundlagen Fernerkundung und Stadtklima 10
2.1 Besonderheiten des Stadtklimas 10
2.2 Einsatz von Fernerkundungsmethoden in der Stadtklimatologie 12
2.2.1 Grundlagen der thermalen Fernerkundung 12
2.2.2 Landoberflächentemperatur 13
2.2.3 Vorhandensein und Vitalität von Vegetationsflächen 15
3 Klimatische Entwicklung in Chemnitz 17
3.1 Klimastationsauswertung 17
3.2 Klimaprojektionsauswertung 24
4 Wärmebelastungsindex in Chemnitz 29
4.1 Eingangsdaten 29
4.2 Berechnungsmethodik 30
4.3 Ergebnisse für das Stadtgebiet von Chemnitz 31
4.3.1 Landoberflächentemperatur 31
4.3.2 Versiegelungsgrad 33
4.3.3 Gebäudevolumendichte 34
4.3.4 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 35
4.3.5 Ermittelter Wärmebelastungsindex 36
4.4 Exkurs: Verschattungsanalyse im Stadtgebiet von Chemnitz 39
4.5 Exkurs: Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Stadtteilebene in Chemnitz 41
5 Thermaldrohnenbefliegung von zwei Standorten in Chemnitz 42
5.1 Daten und Methodik 42
5.2 Standort A - Zentrum 42
5.3 Standort B - Andrépark und Dr.-Wilhelm-André-Gymnasium 44
6 Berechnung des Wärmebelastungsindex für ganz Sachsen 46
6.1 Herausforderungen bei der Übertragung der Methodik von einer Stadt oder Kommune auf ein gesamtes Bundesland 46
6.1.1 Beschaffung geeigneter Fernerkundungsdaten 46
6.1.2 Umgang mit Bewölkung 48
6.1.3 Verarbeitung und Aufbereitung größerer Eingangsdatenmengen 48
6.2 Ergebnisse für Sachsen 49
6.3 Diskussion der Ergebnisse für Sachsen 52
6.4 Vergleich der Ergebnisse mit Modellierungen von Kuttler 54
7 Schlussfolgerungen und Ausblick 56
Literaturverzeichnis 57
A 1 Anhang ..... Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Global gemittelte CO_2-Konzentration in den letzten 800.000 Jahren in ppm (parts per million) ... 8
Abbildung 2: Schematische Übersicht zum Stadtklima ... 10
Abbildung 3: Elektromagnetisches Spektrum ... 12
Abbildung 4: Planck'sches Strahlungsspektrum ... 13
Abbildung 5: Monatliche und Saisonale Verteilung des mittleren Wärmeinseleffektes der Oberfläche ... 14
Abbildung 6: Anzahl der Studien pro Jahr zum Thema thermale Fernerkundung in der Stadtklimaforschung sowie die mittlere Anzahl der Publikationen in einem Zeitraum von fünf Jahren. Im letzten hier dargestellten Jahr 2018 liegen nur Daten von Januar bis August vor. ... 14
Abbildung 7: Spektrale Reflexionskurve von gesunder Vegetation ... 15
Abbildung 8: Vergleich der Spektralen Vegetationskurven von gesunder Vegetation (grün), kranker Vegetation (orange) und vegetationslosen Oberflächen (braun) ... 16
Abbildung 9: Standort der DWD-Station Chemnitz (blauer Punkt) auf einer Wiese nördlich der Neukirchner Straße ... 17
Abbildung 10: Mittlere jährliche Lufttemperatur an der DWD Station Chemnitz. Die zehn wärmsten bzw. kältesten Jahre sind gesondert hervorgehoben. ... 18
Abbildung 11: Vergleich der mittleren Lufttemperatur je Monat an der DWD-Station Chemnitz für die beiden Klimaperioden 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020 ... 19
Abbildung 12: Mittlere jährliche Anzahl von Hitzetagen (Tmax ≥ 30 °C) an der DWD Station Chemnitz ... 20
Abbildung 13: Mittlere jährliche Niederschlagssumme an der DWD-Station Chemnitz; die zehn niederschlagsreichsten bzw. niederschlagsärmsten Jahre sind gesondert hervorgehoben ... 21
Abbildung 14: Vergleich der mittleren Lufttemperatur je Monat an der DWD-Station Chemnitz für die beiden Klimaperioden 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020 ... 22
Abbildung 15: Mittlere jährliche Anzahl von Starkregentagen an der DWD Station Chemnitz ... 23
Abbildung 16: Projizierte Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Chemnitz ... 25
Abbildung 17: Projizierte Entwicklung der Hitzetage in Chemnitz ... 26
Abbildung 18: Projizierte Entwicklung der Jahresniederschläge in Chemnitz ... 27
Abbildung 19: Projizierte Entwicklung der Sommerniederschläge in Chemnitz ... 28
Abbildung 20: Projizierte Entwicklung der Winterniederschläge in Chemnitz ... 28
Abbildung 21: Schematische Darstellung der vier Teilindikatoren am Beispiel der Innenstadt von Chemnitz 30
Abbildung 22: Landoberflächentemperatur aus Landsat-8-Daten vom 03.08.2022 um 10 Uhr morgens im Stadtgebiet von Chemnitz ... 32
Abbildung 23: Aus EEA (Europäische Umweltagentur)-Daten abgeleiteter Versiegelungsgrad aus dem Jahr 2018 im Stadtgebiet von Chemnitz ... 33
Abbildung 24: Aus LOD1-Daten berechnete Gebäudevolumendichte im Stadtgebiet von Chemnitz ... 34
Abbildung 25: Aus Sentinel-2-Daten vom 27.06.2022 berechneter NVDI ... 35
Abbildung 26: Ermittelter Wärmebelastungsindex im Stadtgebiet von Chemnitz ... 36
Abbildung 27: Vergrößerter Ausschnitt der Karte zum Wärmebelastungsindex im Bereich des Stadtzentrums von Chemnitz ... 37
Abbildung 28: Ausschnitt der Karte zum Mittelwert des Wärmebelastungsindex im 50 m Radius von sozialen Einrichtungen. Blaue Farben stehen für ein günstiges Umfeld und rote Farben für ein eher ungünstiges. ... 38
Abbildung 29: Summierte Sonneneinstrahlung im Sommerhalbjahr (Apr- Sep.) als Ergebnis der Verschattungsanalyse im Stadtgebiet von Chemnitz ... 39
Abbildung 30: Vergrößerter Ausschnitt der Karte zur Verschattungsanalyse im Bereich des Stadtzentrums von Chemnitz ... 40

Abbildung 31: Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Stadtteilebene im Stadtgebiet von Chemnitz 41
Abbildung 32: Oberflächentemperaturen im Zentrum von Chemnitz bei hochsommerlichen, wolkenfreien Bedingungen 43
Abbildung 33: Oberflächentemperaturen Andrépark und Umgebung bei hochsommerlichen, wolkenfreien Bedingungen 45
Abbildung 34: Ermittelter Wärmebelastungsindex für Sachsen 49
Abbildung 35: Ausschnitt aus dem Wärmebelastungsindex Sachsens für einen Teil des Stadtgebiets von Chemnitz mit Schraffur von Landwirtschaftsflächen 50
Abbildung 36: Normierte Landoberflächentemperatur und Wärmebelastungsindex am Übergang von Landsat-Szenen zweier Aufnahmezeitpunkte 51
Abbildung 37: Differenzkarte der Wärmebelastungsindizes von Chemnitz und Sachsen 52
Abbildung 38: Gegenüberstellung des Wärmebelastungsindex von THINK und des Städtischen Hitzeinseleffekts nach Kuttler 55
Abbildung 39: Jährliche Anzahl von Frosttagen (Tmin < 0°C) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 40: Jährliche Anzahl von Sommertagen (Tmax ≥ 25°C) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 41: Jährliche Anzahl von Tropennächten (Tmin ≥ 20 °C) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 42: Jährliche Anzahl von Schneedeckentagen (Schneehöhe > 1 cm) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 43: Jährliche Anzahl von Sturmtagen (Maximum der Windgeschwindigkeit innerhalb eines 10 Minuten Mittelwertes ≥ 62 km/h) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 44: Jährliche Anzahl von Hitzwellen (Perioden von mindestens drei aufeinander folgenden Hitzetagen) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 45: Mittlere jährliche Dauer von Hitzewellen an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 46: Jährliche Anzahl von Hitzewellentagen (Hitzetage im Zusammenhang mit einer Hitzewelle) an der DWD Station Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 47: Projizierte Entwickung der Sommertage in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 48: Projizierte Entwicklung der Eistage in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 49: Projizierte Entwicklung der Frosttage in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 50: Projizierte Entwicklung der Regentage in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 51: Projizierte Entwicklung der Regentage > 90.Perzentil in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 52: Projizierte Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz in Chemnitz ... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 53: Projizierte Entwicklung der Mitteltemperatur in Sommerhalbjahr in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 54: Projizierte Entwicklung der Mitteltemperatur im Winterhalbjahr in Chemnitz **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 55: Projizierte Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr in Chemnitz ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
Abbildung 56: Projizierte Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz im Winterhalbjahr in Chemnitz .. **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassende Übersicht zur DWD-Station Chemnitz 17
Tabelle 2: Lösungsansätze bei unzureichender Datenlage und ihre potienzielle Nachteile 47

Abkürzungsverzeichnis

CO_2	Kohlenstoffdioxid
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESA	European Space Agency (deutsch: Europäische Raumfahrtagentur)
GIS	Geographisches Informationssystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (deutsch: Weltklimarat)
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LOD	Level of Detail
LST	Land Surface Temperature (deutsch: Landoberflächentemperatur)
MDK	Mitteldeutsches Kernensemble
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (deutsch: moderat auflösendes Bildspektroradiometer)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (deutsch: Nationale Aeronautik- und Raumfahrtbehörde)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (deutsch: Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex)
NIR	Nahes Infrarot
NN	Normal Null
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (deutsch: Nationale Ozean- und Atmosphärenbehörde)
ppm	parts per million (deutsch: Teile pro Million)
RCP	Representative Concentration Pathway (deutsch: Repräsentativer Konzentrationspfad)
RGB	Rot-Grün-Blau-Darstellung
SUHI	Surface Urban Heat Island (deutsch: Städtische Wärmeinsel der Oberfläche)
TIR	Thermales Infrarot
ThINK	Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (deutsch: Drohne)
UHI	Urban Heat Island (deutsch: Städtische Wärmeinsel)

1 Einleitung

Der menschengemachte (anthropogene) Klimawandel und damit die unabwendbaren Folgen der Erderwärmung sind in der heutigen Zeit längst kein Thema mehr ausschließlich für wissenschaftliche Kreise und Fachgremien, das nur auf einer abstrakten Ebene diskutiert wird. Der Klimawandel ist angekommen in der Bundesrepublik, den Bundesländern, Regionen und Landkreisen, Städten und Gemeinden, im ganz persönlichen Erfahrungsschatz der meisten Menschen. Seien es die gehäuften „Jahrhundertsommer", die Jahre anhaltende „Dauertrockenheit", die vielen „Winter ohne Schnee" oder die immer häufigeren „sintflutartigen Wolkenbrüche", all dies sind spürbare Auswirkungen der menschengemachten Erderwärmung in den letzten Jahrzehnten.

Die Wissenschaft ist sich heute einig über Ursache und Wirkung der meisten mit der Erderwärmung verbundenen Prozesse. Es geht nicht mehr um Theorien, sondern um Fakten. Seit mittlerweile über 30 Jahren widmet sich der Weltklimarat der Vereinten Nationen (**I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange - IPCC) den Fragen im Zusammenhang mit dem natürlichen und dem vom Menschen verursachten Klimawandel. Dieses Gremium, bestehend aus vielen hundert Wissenschaftlern aus aller Welt, sammelt die neuesten Erkenntnisse und veröffentlicht diese im Konsensverfahren etwa alle sechs Jahre in einem Sachstandsbericht. In den Jahren 2013/2014 wurde der 5. Sachstandsbericht (IPCC 2014) veröffentlicht, welcher inzwischen durch drei Sonderberichte ergänzt wurde.

Der aktuelle 6. Sachstandsbericht besteht aus drei Teilen, von denen der erste (IPCC 2021a) im August des Jahres 2021 veröffentlicht wurde. Er befasst sich mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. Demnach war die letzte Dekade global um 1,09 K wärmer als der Zeitraum von 1850 bis 1900. Jede der letzten vier Dekaden war jeweils wärmer als die vorherige. Dabei ist die Erwärmung der Landflächen (+1,59 K) bis heute wesentlich stärker als die der Ozeane und Meere (+0,88 K). Außerdem haben Hitzewellen deutlich zugenommen und Kältewellen abgenommen. Starkregenereignisse, Dürren und (Wirbel-)Stürme treten insgesamt häufiger und intensiver auf. Der Meeresspiegel ist seit 1950 im Schnitt um etwa 20 cm gestiegen und auch in Zukunft ist mit einem weiteren, teils deutlichen Anstieg zu rechnen (IPCC 2021b). Abbildung 1 zeigt zudem die Entwicklung des CO_2-Gehaltes in der Atmosphäre in den letzten 800.000 Jahren. Daran lässt sich eindrucksvoll erkennen, dass der Wert von 414,7 ppm (parts per million) im Jahr 2021 weit über dem historischen Maximum von 300 ppm liegt.

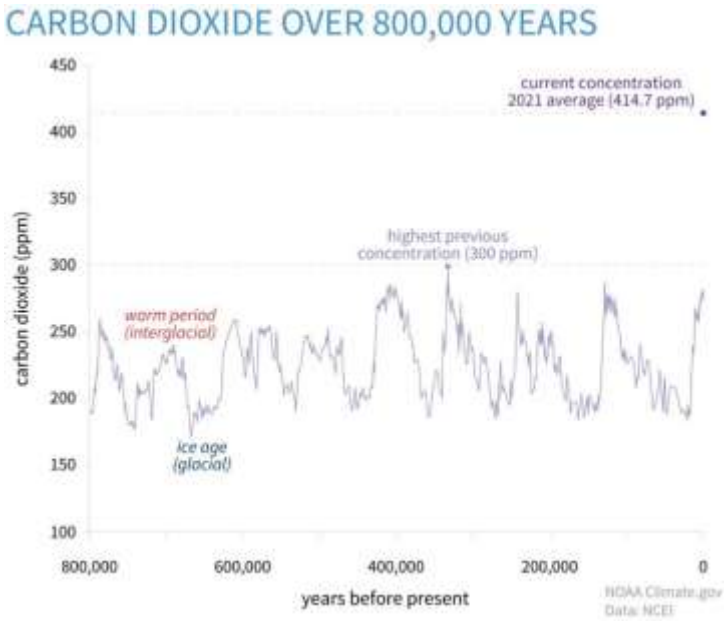


Abbildung 1: Global gemittelte CO_2-Konzentration in den letzten 800.000 Jahren in ppm (parts per million)

Quelle: NOAA (2022)

Der zweite Teil des Sachstandsberichts zum Thema „Auswirkungen, Anpassung und Vulnerabilität“ erschien im März 2022. Laut diesem Bericht leiden bereits heute sowohl die Natur, als auch die Menschen weltweit unter den Folgen des Klimawandels (IPCC 2022, S.9). Mit zunehmenden Temperaturen wird es für beide in einigen Gegenden der Welt immer schwieriger bis unmöglich werden, sich an die neuen Verhältnisse anzupassen. Da besonders viele Menschen in Städten leben, ist es gerade dort wichtig, durch geeignete Maßnahmen die Aufenthaltsbedingungen und die Lebensqualität bestmöglich zu erhalten bzw. im Idealfall zu verbessern, um insbesondere vulnerable Personengruppen vor den Folgen des Klimawandels zu schützen (IPCC 2022, S.33). Damit sich auch die Umwelt soweit wie möglich an den Klimawandel anpassen kann, ist deren Erhalt und Schutz ebenfalls unabdingbar (IPCC 2022, S.34).

Dieser Problematik ist sich auch der Freistaat Sachsen bewusst und hat die ThINK GmbH beauftragt, für das gesamte Bundesland einen aus Fernerkundungsdaten (alternative Bezeichnung: Satellitendaten) abgeleiteten Wärmebelastungsindex zu ermitteln. Der große Vorteil von Fernerkundungsdaten liegt in der flächendeckenden und zeitlich wiederkehrenden Bereitstellung von Messdaten über die Erdoberfläche und die Atmosphäre. Weiterhin weisen diese Daten i. d. R. einen hohen räumlichen Detaillierungsgrad auf.

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung ist es zunächst vorgesehen, den Wärmebelastungsindex am Beispiel der Stadt Chemnitz zu berechnen (Kapitel 4). Im Anschluss sollen die entwickelte Methodik sowie die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um eine Übertragung auf ganz Sachsen zu testen. Das Ergebnis soll hinsichtlich des Potenzials und etwaiger Einschränkungen bei der Interpretation kritisch diskutiert werden (Kapitel 6). Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse werden abschließend nochmals im Kapitel 7 zusammengefasst. Weiterhin wird es einen kurzen Ausblick geben.

Der vorliegende Bericht enthält darüber hinaus weitere Kapitel, welche die zentrale Aufgabenstellung flankieren und zusätzliche Informationen bereitstellen. So erfolgt im zweiten Kapitel eine wissenschaftliche Aufbereitung der theoretischen Grundlagen zu den Themenfeldern Stadtklima und dem Einsatz von Fernerkundungsdaten in der Stadtklimaforschung. Im dritten Kapitel wird die vergangene und zukünftige Klimaentwicklung in Chemnitz auf Basis von Stationsmessungen und Klimaprojektionsdaten genauer betrachtet. Kapitel 5 umfasst die Auswertung von zwei durchgeführten Thermaldrohnenbefliegungen, welche für zwei ausgewählte Stadtbereiche in Chemnitz räumlich sehr detaillierte Informationen zur Aufheizung der verschiedenen Oberflächen an einem heißen Sommertag liefern. Das grundlegende Messprinzip ist dabei das Gleiche wie bei der aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Landoberflächentemperatur.

2 Theoretische Grundlagen Fernerkundung und Stadtklima

2.1 Besonderheiten des Stadtklimas

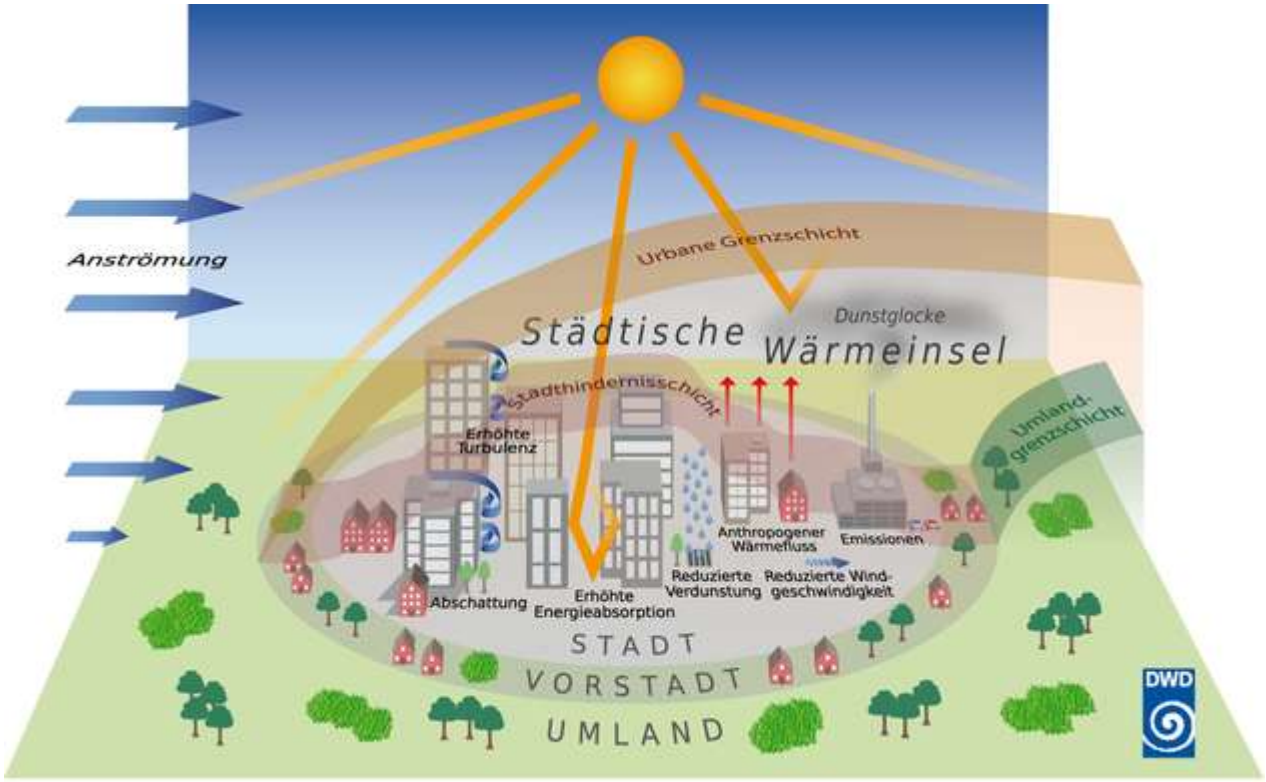


Abbildung 2: Schematische Übersicht zum Stadtklima

Quelle: DWD (2010)

In diesem Kapitel steht das Stadtklima im Fokus. Als erstes werden allgemeine Aspekte und Grundlagen präsentiert, bevor im zweiten Teil dieses Kapitels speziell auf die Ausbildung von städtischen Wärmeinseln eingegangen wird. Die kompakt gehaltenen Ausführungen orientieren sich am aktuellen Stand der Forschung.

Das DEUTSCHE KLIMAPORTAL (2020, o.S.) definiert Stadtklima kurz und prägnant als „gegenüber dem Umland verändertes Lokalklima“. Die in Städten vorherrschenden lokalklimatischen Rahmenbedingungen haben Einfluss auf zahlreiche meteorologische Parameter, wie z. B. die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit oder den Wind (aerodynamische Rauigkeit aufgrund von Bebauung) und zeichnen sich in erster Linie durch einen deutlich erhöhten Versiegelungsgrad und damit einhergehend weniger Vegetation sowie höhere Immissionen in den Bereichen der Luftqualität, der Abwärme und des Lärms, verglichen mit dem Umland aus (DEUTSCHES KLIMAPORTAL 2020, o.S., DWD 2020a, b, o. S., KURMUTZ ET AL. 2012, S.15, PARLOW 2011, S.287). In ihrer Summe führen all die vorliegenden Modifikationen zur Ausbildung eines eigenen Klimas, dem sogenannten Stadtklima. KURMUTZ ET AL. (2012, S.16) sprechen zudem von einer grundlegenden Modifikation des Energiehaushaltes einer Stadt aufgrund der genannten Aspekte.

Windschwache Hochdruckwetterlagen begünstigen in Städten die Ausbildung einer Dunstglocke, welche sich mit der Zeit zunehmend mit Aerosolen und Luftschadstoffen anreichert (DWD 2020b, o.S.). Fehlende Vegetations- und Wasserflächen führen zu einer Erhöhung der fühlbaren Wärmeströme und zur Verringerung latenter Wärme, da

weniger Verdunstung stattfinden kann (IMHOFF ET AL. 2009, S.504, KURMUTZ ET AL. 2012, S. 16, STEWART & OKE 2012, S.1881).

GRIMMOND ET AL. (2014) und STEWART & OKE (2012, S.1881) beschreiben weitere Faktoren, welche das Stadtklima individuell beeinflussen können. Dazu gehören beispielsweise: die Verteilung und Ausrichtung der Gebäude, die verwendeten Baumaterialien, der Anteil von Gewerbe- und Industrieflächen, der Anteil blaugrüner Infrastruktur sowie das Verkehrsaufkommen (→ Anteil der Luftschadstoffe) und das Heizen und Kühlen von Gebäuden. Die meisten der bereits beschriebenen stadtklimatischen Besonderheiten treten während des gesamten Jahres auf, wobei ihre Stärke i.d.R. bei windschwachen und sonnenreichen Wetterlagen zunimmt. Eine zusammenfassende Veranschaulichung der besprochenen Aspekte ist in der Abbildung 2 zu sehen. Diese zeigt auch bereits die städtische Wärmeinsel, um die es im folgenden Teil dieses Kapitels gehen soll.

Städtischer Wärmeinseleffekt

Die städtische Wärmeinsel (englisch: **U**rban **H**eat **I**sland – UHI) ist ein typisches Merkmal des Stadtklimas und wurde erstmals im Jahr 1818 durch Luke Howard publiziert (DEUTSCHES KLIMAPORTAL 2020: o.S., PARLOW 2011, S.291). Sie zeichnet sich durch eine Temperaturdifferenz zwischen einer Stadt und ihrer Umgebung aus und kann für sehr große Städte bis zu 10 K betragen (BRUNS & SIMKO (2017), DEUTSCHES KLIMAPORTAL 2020: o.S., KURMUTZ ET AL. 2012, S.17). Im Mittel schwankt dieser Wert zwischen 2 K und 6 K (PARLOW 2011, S.288).

Die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel ist insbesondere in den Nachtstunden zu beobachten, in denen die Lufttemperatur nicht so sehr abkühlen kann, wie es in der Umgebung der Fall ist (PARLOW 2011, S.288). Zusätzlich ist tagsüber eine erhöhte Wärmbelastung besonders in stark versiegelten und wenig durchgrünten Stadtbereichen feststellbar. Dies gilt ebenso für Gebäude oder Plätze, welche wenig Schattenflächen aufweisen und damit einer hohen Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.

Wie bereits beschrieben, ist die Stadtgröße ein wesentlicher Faktor für die Stärke der Ausprägung von städtischen Wärmeinseln. ZHOU ET AL. (2017, S.1) haben 5000 Großstädte untersucht und festgestellt, dass die Intensität der städtischen Wärmeinsel logarithmisch mit der Stadtgröße zunimmt. Außerdem hat auch die Kompaktheit einer Stadt und ihre Form Einfluss auf das Ausmaß der städtischen Wärmeinsel. Sie wird darüber hinaus durch die freigesetzte Wärme von Klimaanlagen und Heizungen verstärkt (ZHOU ET AL. 2017, S.1, DWD 2020, o.S.). Mit Blick auf dieses Phänomen empfehlen ZHOU ET AL. (2017, S.1) kleine, verstreute (also mit niedrigerer Bebauungsdichte) und gestreckte Städte zu entwickeln.

Die hohen nächtlichen Temperaturen stellen vor allem in den Sommermonaten eine Belastung für die Stadtbevölkerung, speziell für kleine Kinder sowie ältere und/oder kranke Menschen dar, da diese ihre Körpertemperatur weniger gut regulieren können als gesunde Erwachsene (BRUNS & SIMKO 2017, DWD 2020a, o.S., ZHOU ET AL. 2017, S.1).

Abschließend für dieses Unterkapitel lässt sich festhalten, dass Städte eine zunehmend wichtige Rolle vor dem Hintergrund des Klimawandels spielen (BRONTO & BULKELEY 2013, S. 92). Sie müssen sich vor allem für eine Erhaltung oder Verbesserung der dortigen Umwelt- und Lebensbedingungen einsetzen, um u. a. die Gesundheit der Bevölkerung zu gewährleisten (CARMIN ET AL. 2013, S. 4, MIRZAEI 2015, S. 201 f.). Stadtplanende können hierfür beispielsweise einen Beitrag durch eine Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils, ausreichender Verschattung und einer Verbesserung der Durchlüftung leisten, indem z. B. Kaltluftbahnen erhalten bzw. neu geschaffen werden (DWD 2020b, o.S.).

Außerdem sei noch erwähnt, dass das Stadtklima an sich, neben den aufgeführten Nachteilen und Beeinträchtigungen, auch einige positive Eigenschaften mit sich bringen kann. KURMUTZ ET AL. (2012, S.18) erwähnen hier wirtschaftliche Einsparungen im Zuge eines verminderten Heizungsbedarfes im Winter oder die Ausdehnung der Vegetationsperiode (mehr Sauerstoffproduktion und Feinstaubbindung).

2.2 Einsatz von Fernerkundungsmethoden in der Stadtklimatologie

2.2.1 Grundlagen der thermalen Fernerkundung

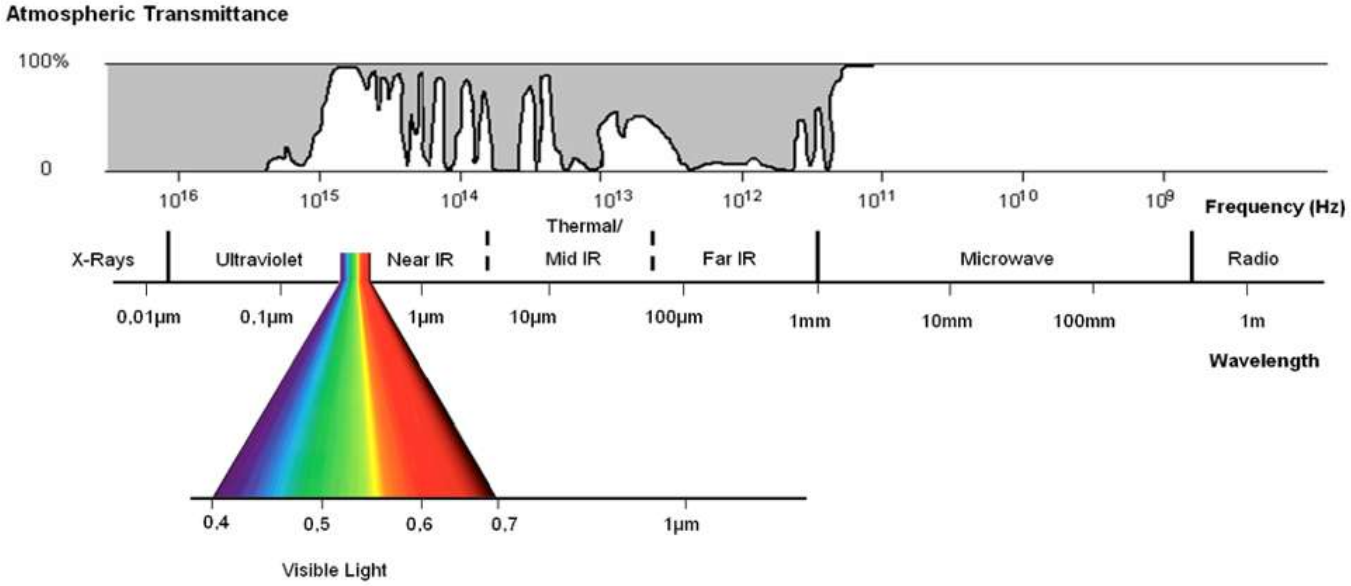


Abbildung 3: Elektromagnetisches Spektrum

Quelle: Seos-Project (2020)

Bei der Betrachtung der Landoberflächentemperatur spielen physikalische Aspekte wie das Elektromagnetische Spektrum (Abbildung 3) sowie das Planck'sche Strahlungsspektrum (Abbildung 4) eine Rolle. Die Landoberflächentemperatur „ist eine von der Wellenlänge unabhängige kinetische Größe, die die thermodynamische Temperatur der [Erdoberfläche] darstellt, d. h. ein Maß dafür ist, wie heiß oder kalt sich die Erdoberfläche bei einer Berührung anfühlen würde (verändert nach GUILLEVIC ET AL. 2018, S.5, eigene Übersetzung)". Relevant für die Landoberflächentemperatur ist der Wellenlängenbereich von 8 µm bis 15 µm, welcher dem thermalen Infrarot (TIR) zuzuordnen ist (TOMLINSON ET AL. 2011, S.97). Dieser Bereich verfügt über atmosphärische Fenster, welche für die optische Fernerkundung zwingend erforderlich sind (LI ET AL. 2013, S.16). Im Gegensatz zum sichtbaren Licht oder dem nahen- und mittleren Infrarot, werden im TIR-Bereich nicht reflektierte Sonnenstrahlen, sondern die Eigenemission (Wärme) der Erde gemessen. Es werden hier sowohl atmosphärische als auch Bodeneffekte erfasst. Daraus ergibt sich das Planck'schen Strahlungsspektrum.

Dieses besagt, dass alle Objekte, die wärmer als der Nullpunkt (-273,15 °C bzw. 0 K) sind, Wärmestrahlung emittieren (LI ET AL. 2013, S.15). In Abbildung 4 zeigt die weiße Kurve das Spektrum der Sonne. Ihr Maximum liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes, während sich das der Erde im TIR-Bereich befindet.

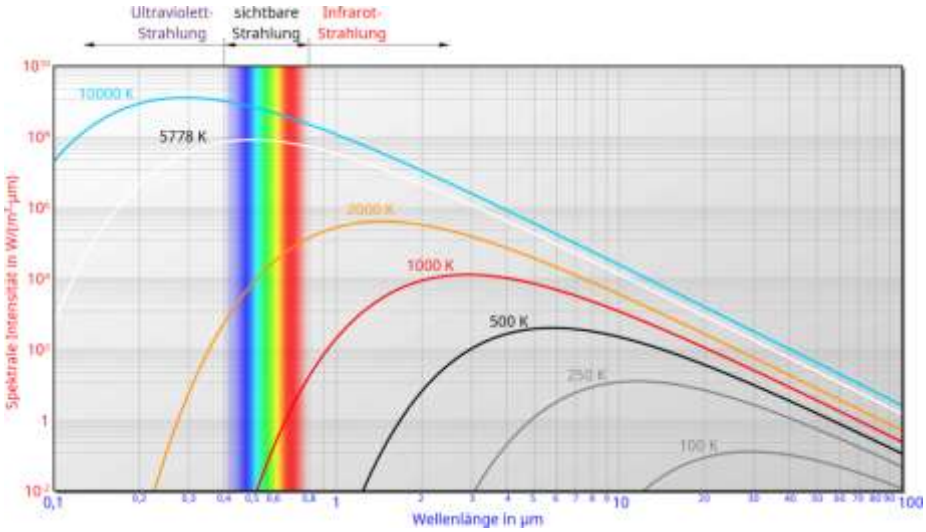


Abbildung 4: Planck'sches Strahlungsspektrum

Quelle: Tec-Science (2020)

2.2.2 Landoberflächentemperatur

Thermale Fernerkundungsdaten, insbesondere die Ableitung der LST (engl: **L**and **S**urface **T**emperature, deutsch: Landoberflächentemperatur) daraus, spielen in der Stadtklimaforschung eine zunehmende Rolle (u.a. BONAFONI ET AL. 2017, MENG ET AL. 2018, WENG 2009, ESTOQUE ET AL. 2017). MENG ET AL. (2018, S.826) sprechen sogar davon, dass die LST „zu den am häufigsten verwendeten Indikatoren bei der UHI (deutsch: Städtische Wärmeinsel) Analyse gehört" (eigene Übersetzung). Ein wesentlicher Vorteil der fernerkundungsbasierten LST ist die Bereitstellung flächendeckender und in bestimmten Abständen zeitlich wiederkehrender Daten durch die jeweiligen Satelliten (BONAFONI ET AL. 2017, S.212, WENG ET AL. 2009, S.336). Laut ZHOU ET AL. (2018, S.1) haben wissenschaftliche Studien im Bereich der Stadtklimaforschung, welche thermale Fernerkundungsdaten nutzen, exponentiell zugenommen (Abbildung 6). Im Folgenden wird anhand einiger ausgewählter Studien präsentiert, wie diese Informationen in der Praxis Verwendung finden. Ein sehr umfangreiches Literaturreview zu diesem Thema kann ZHOU ET AL. (2018) entnommen werden. Etwas kompakter ist die Zusammenstellung von RASUL ET AL. (2017).

BONAFONI ET AL. (2017) untersuchten basierend auf Landsat-7-Daten die LST in den Jahren 2005 und 2015 über ausgewählten Teilen der italienischen Stadt Terni, um zu prüfen ob und inwiefern Veränderungen aufgetreten sind. Ihr Ergebnis zeigt einen mittleren Anstieg der LST innerhalb der betrachteten zehn Jahre von 2,3 K.

ESTOQUE ET AL. (2017, S.350) unterscheiden zwei Typen der städtischen Wärmeinsel. Die atmosphärische und die der Oberfläche (SUHI, engl. **S**urface **U**rban **H**eat **I**sland, deutsch: Städtische Wärmeinsel der Oberfläche). Letztere tritt vor allem am Tag auf, während die erste, wie bereits im Kapitel 2.1 beschrieben, vor allem in der Nacht ihre volle Wirkung entfaltet. Die Studie untersuchte den Einfluss der Landbedeckung auf die LST in südostasiatischen Megastädten und bestätigte den besonders positiven Einfluss von innerstädtischen Grünflächen. Im Mittel betrug die LST von versiegelten Flächen 3 K mehr als es innerhalb von Grünflächen der Fall war (ESTOQUE ET AL. 2017, S.358).

Eigene Untersuchungen von ThINK unter Verwendung von Thermaldrohnen zeigen, dass lokal die Unterschiede der Landoberflächentemperatur z. B. von schwarzen Dächern verglichen mit vitalen Grünflächen bis zu 50 K betragen können (vgl. Kapitel 5).

MENG ET AL. (2018) betrachteten die LST in Peking mit Hilfe von MODIS- und Landsat-8-Daten im Zeitraum von 2003 bis 2015. Sie interessierten sich vor allem für die raumzeitlichen Muster der UHI und fanden heraus, dass es innerhalb des Stadtgebietes sowie je nach Jahres- oder Tageszeit große Unterschiede gibt (Abbildung 5, MENG ET AL. 2018, S.827). Das Maximum der städtischen Wärmeinsel der Oberfläche wurde vom Juni bis in den August erreicht (MENG ET AL. 2018, S.827).

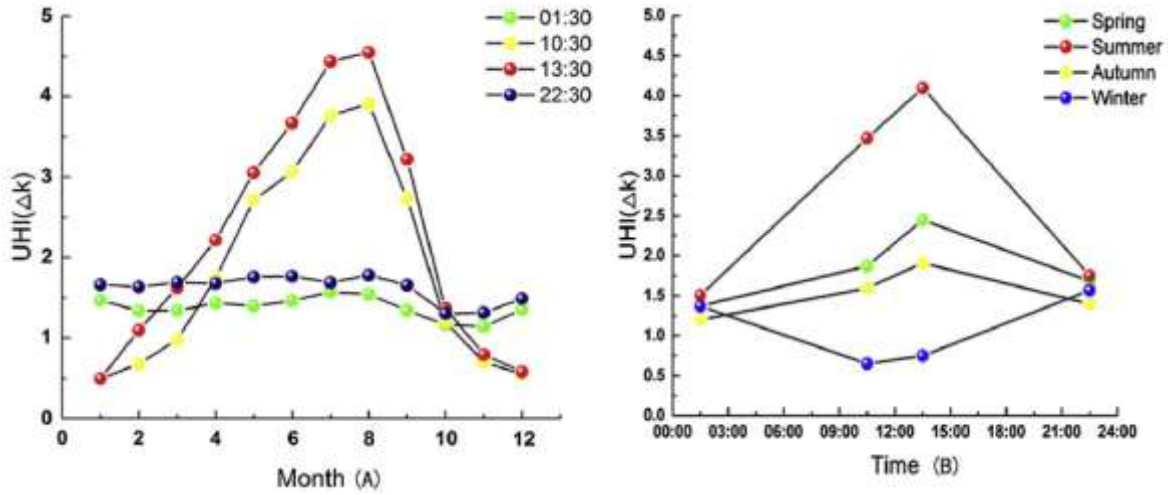


Abbildung 5: Monatliche und Saisonale Verteilung des mittleren Wärmeinseleffektes der Oberfläche

Quelle: Meng et al. (2018:832)

In der Studie von IMHOFF ET AL. (2009) wurde die LST für die 38 größten Städte in den USA untersucht. Dabei sollte vor allem der Einfluss der Stadtstruktur sowie insgesamt der lokalen Gegebenheiten für die Jahre 2003 bis 2005 betrachtet werden. Als Datengrundlage dient ein aus Landsat-Daten abgeleitetes Versiegelungsgradraster sowie MODIS-Daten für die Bestimmung der LST (IMHOFF ET AL. 2009, S.504). Die Forschenden fanden heraus, dass der größte Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land in Städten auftritt, die in Regionen mit vielen Laub- und Mischwäldern liegen (IMHOFF ET AL. 2009, S.509). Am geringsten ist diese Differenz in ariden und semiariden Gegenden, wobei hier teilweise sogar tagsüber niedrigere Werte in Städten vorkommen (IMHOFF ET AL. 2009, S.510). Der Versiegelungsgrad wurde als Hauptursache für die höheren Temperaturen in Städten identifiziert (70 % erklärende Varianz, IMHOFF ET AL. 2009, S.510). Im Jahresmittel beträgt der Temperaturunterschied über alle untersuchten Städte 2,9 K wobei dieser Wert im Sommer bei 4,3 K und im Winter bei 1,3 K liegt (IMHOFF ET AL. 2009, S.504).

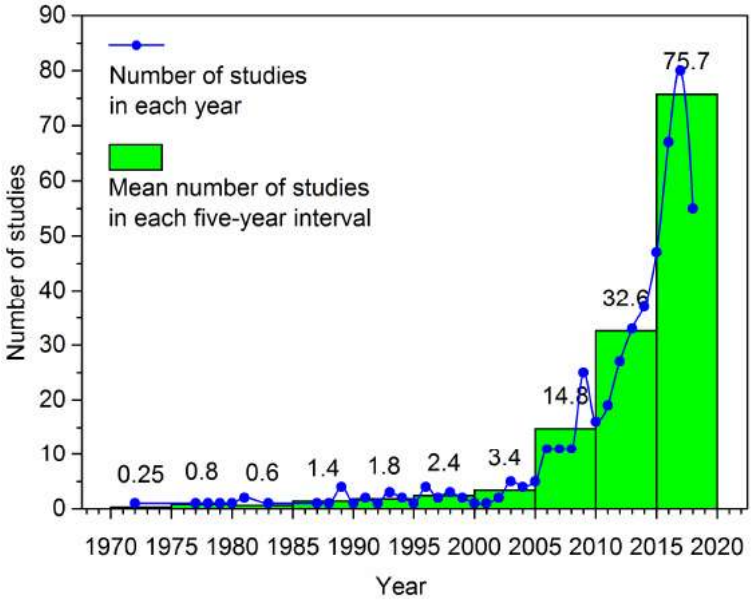


Abbildung 6: Anzahl der Studien pro Jahr zum Thema thermale Fernerkundung in der Stadtklimaforschung sowie die mittlere Anzahl der Publikationen in einem Zeitraum von fünf Jahren. Im letzten hier dargestellten Jahr 2018 liegen nur Daten von Januar bis August vor.

Quelle: Zhou et al. (2018:4)

2.2.3 Vorhandensein und Vitalität von Vegetationsflächen

Neben der Landoberflächentemperatur ist auch das Vorhandensein sowie die Vitalität von innerstädtischen Grünflächen maßgeblich für ein günstiges Stadtklima. Mit optischen Fernerkundungsdaten können entsprechende Informationen flächendeckend gewonnen werden.

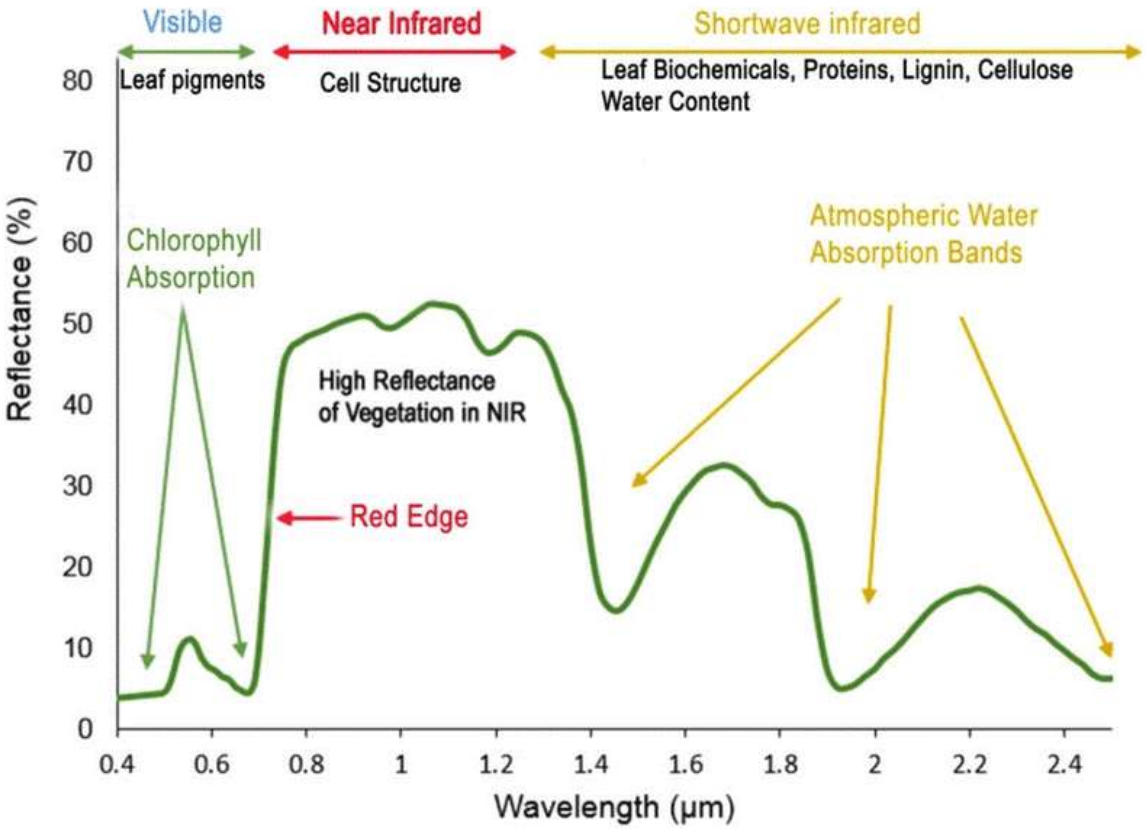


Abbildung 7: Spektrale Reflexionskurve von gesunder Vegetation

Quelle: Roman & Tudor (2016)

Grundlage dafür ist das spektrale Reflexions- bzw. Absorptionsverhalten der Vegetation von Sonnenlicht. Abbildung 7 zeigt die spektrale Reflexionskurve von gesunder Vegetation im sichtbaren Licht sowie im Nahen und Mittleren Infrarot. Entscheidend ist hierbei die starke Absorption von rotem Licht (ca. 0,62 – 0,75 µm Wellenlänge) und die gleichzeitig stark ausgeprägte Reflektion im Nahen Infrarot (ca. 0,75 – 1,40 µm Wellenlänge). Ebenfalls charakteristisch für gesunde Vegetation ist die erhöhte Reflexion im grünen Spektralbereich des sichtbaren Lichtes, welche durch den Chlorophyllgehalt der Pflanzen zu Stande kommt (GIS Resources 2023).

Zusätzlich zu gesunder Vegetation zeigt Abbildung 8 noch die spektralen Reflexionskurven von kranker bzw. geschädigter Vegetation (orange Linie) und vegetationslosen Flächen (braune Linie). Entscheidend ist nun für Identifikation von kranker Vegetation, dass diese im roten Spektralbereich eine höhere und im nahen Infrarot eine niedrigere Reflexion aufweist als gesunde Vegetation (GIS Resources 2023). Unbewachsener Boden bzw. Oberflächen ohne oder mit sehr geringem Bewuchs zeigen dieses Verhältnis in noch extremerer Weise auf.

Dieses Verhalten macht sich der NDVI (engl. **N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex, deutsch: Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex) zu Nutze. Dieser ermöglicht auf Basis der beschriebenen physikalischen Gegebenheiten die Identifikation von Vegetationsflächen bei gleichzeitiger Einschätzung ihrer Vitalität und wird in zahlreichen Studien für verschiedene Fragestellungen verwendet. Beide im Rahmen des vorliegenden Berichtes verwendeten Satellitenpaare (Landsat-8/9 und Sentinel-2a/b) verfügen über entsprechende Sensoren, um den NDVI flächendeckend ermitteln zu können.

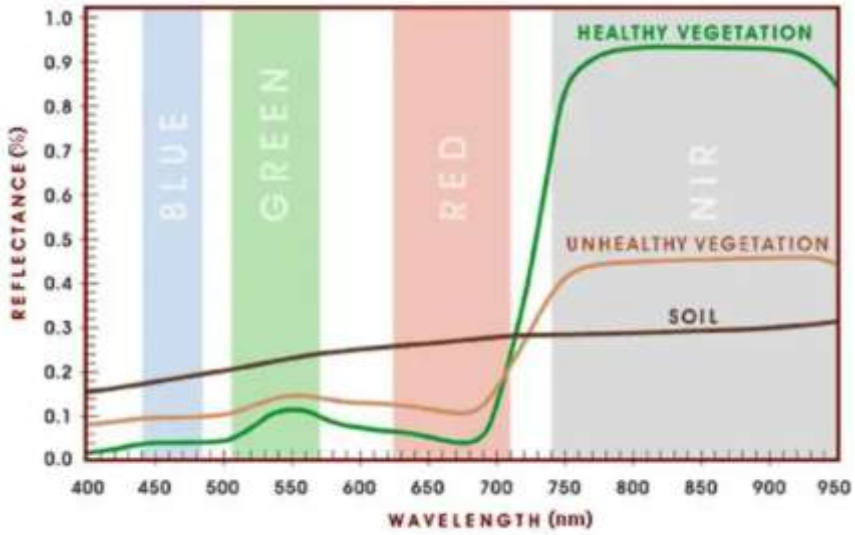


Abbildung 8: Vergleich der Spektralen Vegetationskurven von gesunder Vegetation (grün), kranker Vegetation (orange) und vegetationslosen Oberflächen (braun)

Quelle: GIS Resources (2023)

3 Klimatische Entwicklung in Chemnitz

3.1 Klimastationsauswertung

Historische Klimastationsdaten sind sehr gut dafür geeignet, die klimatische Entwicklung in der Vergangenheit an einem bestimmten Ort aufzuzeigen. Messungen des DWD weisen hierbei eine besonders hohe Qualität auf, da deutschlandweit einheitliche Standards gelten und sich die Ergebnisse somit gut miteinander vergleichen lassen.

Die für Chemnitz hier relevante DWD-Station ist die Station Chemnitz, welche mit einigen Unterbrechungen seit 1881 Messungen durchführt und auf einer Wiese nördlich der Neukirchner Straße steht (Abbildung 9, Tabelle 1). Ihre Geländehöhe beträgt 416 m über NN. Damit liegt sie etwas höher als die Chemnitzer Innenstadt. In aller Regel lassen sich grundsätzliche klimatische Trends auf das erweiterte Umfeld einer jeden Station übertragen. Zu beachten sei jedoch, dass bedingt durch die Lage der Station der städtische Wärmeinseleffekt bei den Messungen nur eingeschränkt berücksichtigt wird und etwa im Stadtzentrum insgesamt ein höheres Temperaturniveau zu erwarten ist.

Tabelle 1: Zusammenfassende Übersicht zur DWD-Station Chemnitz

Merkmal	Station Chemnitz
Höhe in m über NN	416
Koordinaten	50,791 ° Breite und 12,872 ° Länge
Lagebeschreibung	Wiese nördlich der Neukirchner Straße
Inbetriebnahme	1882 (einige Jahre fehlen)
Besonderheiten	alle wesentlichen Parameter werden gemessen

Quelle: eigene Erstellung

Abbildung 9: Standort der DWD-Station Chemnitz (blauer Punkt) auf einer Wiese nördlich der Neukirchner Straße

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Amtlichen Geobasisdaten des Freistaates Sachsen

Nachfolgend werden aus Umfangsgründen nur ausgewählte Ergebnisse der Stationsauswertung genauer vorgestellt. Für alle weiteren Diagramme sei auf den Anhang verwiesen.

Jahresmitteltemperatur

Die mittlere jährliche Lufttemperatur ist der geläufigste Indikator in der Diskussion um den menschengemachten Klimawandel. Zur besseren Verständlichkeit sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Folgenden wie in der Literatur üblich, Temperaturveränderungen stets in Kelvin (K) und konkrete Temperaturwerte in Grad Celsius (°C) angeben werden.

Die Stationsabbildungen zur Jahresmitteltemperatur sowie zum Jahresniederschlag bestehen aus den folgenden Inhalten:

- *schwarze Linie:* Mittelwerte (bzw. beim Niederschlag Summen) der einzelnen Jahre
- *rote Linie:* lineare Trendlinie (entspricht einer linearen Regressionsanalyse)
- *grüne Linie:* langjähriger Mittelwert der alten Klimareferenzperiode von 1961 bis 1990
- *orange Linie:* langjähriger Mittelwert der aktuellen Klimareferenzperiode von 1991 bis 2020
- *blaue Linie:* 10-Jahre gleitendes Mittel. Hierfür wird immer jeweils für 10 aufeinanderfolgende Jahre der Mittelwert gebildet (Jahr 1 bis 10). Im genannten Beispiel wird dieser Mittelwert dann dem Jahr 5 zugewiesen. Nun werden die Jahre 2 bis 11 betrachtet. Für sie wird wieder der Mittelwert gebildet und für das Jahr sechs aufgetragen. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis das Ende der Zeitreihe erreicht ist. Letztlich wird eine Glättung der Messdaten erreicht, sodass lokale Trends besser abgebildet werden können, als es mit der linearen Regression möglich ist.
- *eingetragene Jahreszahlen:* Diese stehen jeweils für die zehn Jahre mit den höchsten bzw. niedrigsten Werten

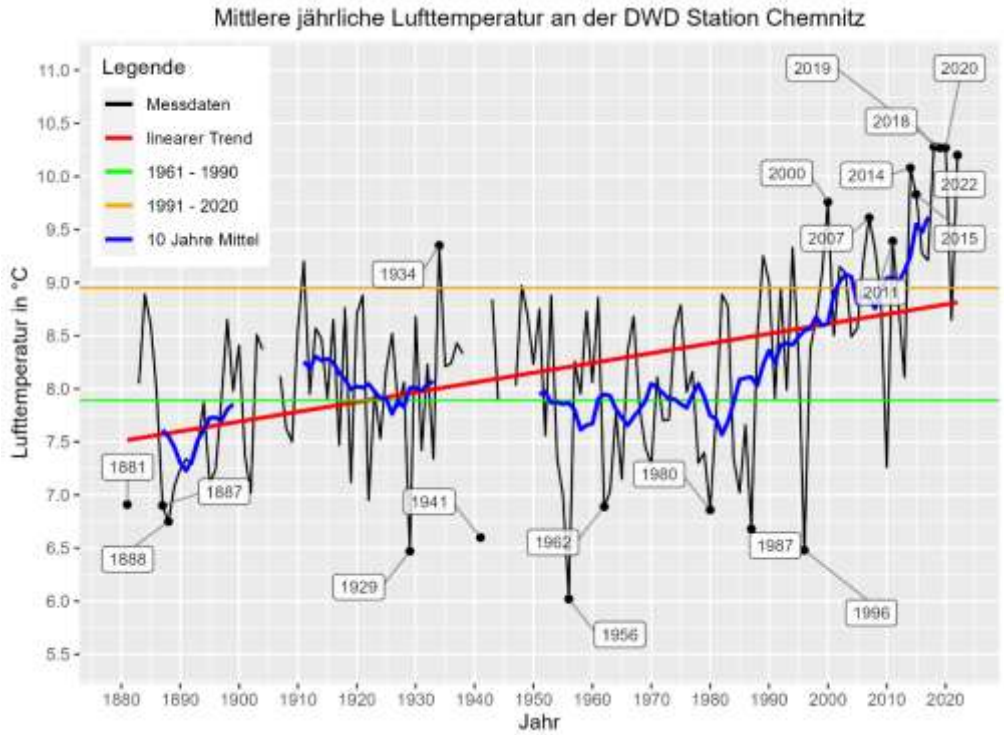


Abbildung 10: Mittlere jährliche Lufttemperatur an der DWD Station Chemnitz. Die zehn wärmsten bzw. kältesten Jahre sind gesondert hervorgehoben.

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD

Bei der Betrachtung der gemessenen Jahresmitteltemperaturen (Abbildung 10) wird deutlich, dass insbesondere seit den 1990er Jahren ein erheblicher Temperaturanstieg stattgefunden hat. So beträgt der Referenzwert für die alte Klimaperiode von 1961 bis 1990 7,9 °C, während das neue Klimamittel bereits bei 9,0 °C. liegt. Damit liegt die an der Station Chemnitz gemessene Temperaturerhöhung für zwei aufeinanderfolgende Klimaperioden bei +1,1 K. Dieser Wert kann für solch einen kurzen Zeitraum als sehr hoch eingeordnet werden.

Die Jahre werden kontinuierlich immer wärmer und besonders heiße Jahre häufen sich in immer kürzerem Abstand, während kalte Jahre praktisch nicht mehr vorkommen. **Von den zehn wärmsten Jahren seit Messbeginn liegen mit Ausnahme von 2016, 2017 und 2021 allein sechs im Zeitraum von 2014 bis 2022!** 2023 wird nach derzeitigem Stand (November 2023) ebenfalls in den Top zehn der wärmsten Jahre landen. Auf der anderen Seite sind die sehr kalten Jahre alle vor 1996 zu finden. Das alte Klimamittel wurde letztmalig knapp im Jahr 2010 und davor 1996 unterschritten.

Nach jetzigem Kenntnisstand ist selbst bei global konsequent umgesetzten Klimaschutzmaßnahmen mit einem weiteren Temperaturanstieg zu rechnen. Der Klimawandel kann nur noch gebremst, aber nicht mehr gestoppt werden. Das 1,5- bzw. 2,0-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens wird auf Basis der aktuellen globalen Entwicklung unerreichbar sein. Ohne nennenswerte Klimaschutzmaßnahmen (RCP-Szenario 8.5) sind gar extreme Klimaveränderungen mit einem mittleren Temperaturanstieg von +4 K zu erwarten (siehe auch Kapitel 3.2).

Monatsmitteltemperatur

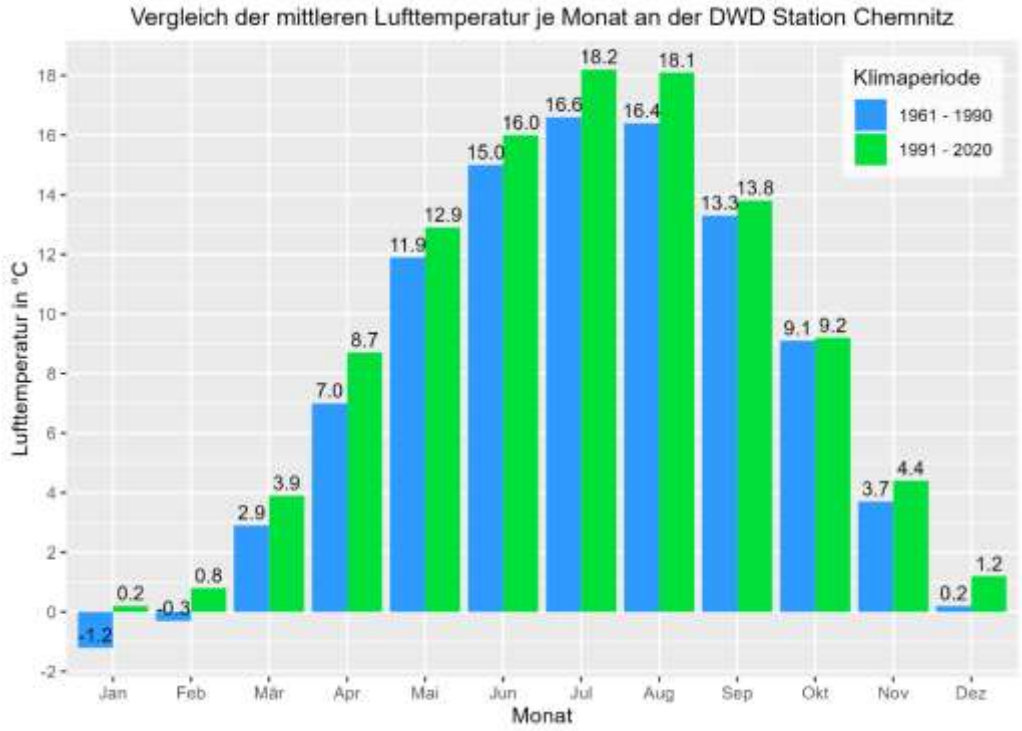


Abbildung 11: Vergleich der mittleren Lufttemperatur je Monat an der DWD-Station Chemnitz für die beiden Klimaperioden 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD

In Abbildung 11 werden monatliche Temperaturwerte der beiden Klimareferenzperioden 1961-1990 und 1991-2020 miteinander verglichen. Dadurch soll ermittelt werden, ob sich die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Veränderungen der Jahresmitteltemperatur gleichmäßig auf alle Monate verteilen oder es hier (größere) Unterschiede gibt.

Der typische mitteleuropäische Jahresverlauf lässt sich hier gut erkennen. Weiterhin wird sichtbar, dass die mittlere Monatstemperatur in den letzten 30 Jahren in allen Monaten angestiegen ist. Der Anstieg ist allerdings

unterschiedlich stark ausgeprägt. So tritt in den Monaten September (+0,5 K), Oktober (+0,1 K) und November (+0,7 K) der geringste Temperaturanstieg auf. Besonders hoch ist er hingegen im April (+1,7 K), im Juli (+1,6 K) und im August (+1,7 K). **Für einen klimatisch gesehen sehr kurzen Zeitraum von 30 Jahren, handelt es sich hierbei um einen ausgesprochen hohen und besorgniserregenden Anstieg**.

Hitzetage

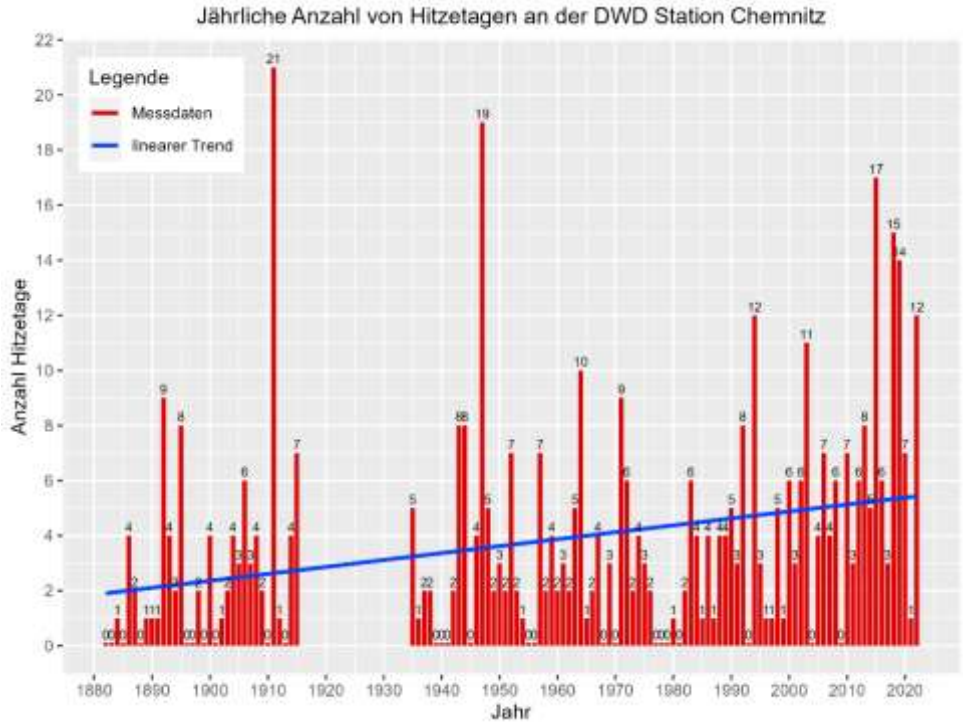


Abbildung 12: Mittlere jährliche Anzahl von Hitzetagen (Tmax ≥ 30 °C) an der DWD Station Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD

Zur Beschreibung von Temperaturveränderungen eignen sich auch sogenannte Kenntage bzw. Ereignisstage, von denen hier fünf ausgewählt wurden (Hitzetage, Sommertage, Hitzewellentage, Frosttage und Eistage (letztere vier im Anhang), um den abstrakten Wert der mittleren Temperaturen nachvollziehbarer darzustellen. Ein Tag wird offiziell als Hitzetag oder auch Heißer Tag definiert, sobald die Tageshöchsttemperatur 30,0 °C erreicht oder übersteigt. Besonders belastend werden solche Tage, wenn sie in Kombination mit tropischen Nächten auftreten. Tropische Nächte sind durch eine Minimaltemperatur von 20 °C definiert. Solche Tages- und Nachttemperaturen stellen gerade für Kinder, kranke und ältere Menschen gesundheitlich riskante Situationen dar, da diese ihre Körpertemperatur weniger gut regulieren können als gesunde Erwachsene.

Bereits ein erster Blick auf die Abbildung 12 genügt, um einen kontinuierlichen und gleichzeitig auch starken Anstieg der Hitzetage seit Messbeginn festzustellen. So gab es in den Jahren vor 1990 in aller Regel weniger als fünf, oft auch gar keine Hitzetage. In jüngerer Vergangenheit häufen sich zunehmend Jahre mit mehr als fünf Hitzetagen. Auch das Jahr 2022 folgt diesem Trend mit zwölf Hitzetagen. Besonders markant fallen die Stationsrekordjahre 1911 (21 Hitzetage) und 1947 (19 Hitzetage) auf. Diese traten jedoch mit großem zeitlichen Abstand auf. Diese Rekordwerte wurden zuletzt zwar nicht erreicht, allerdings häufen sich zunehmend Jahre mit mehr als zehn Hitzetagen (2015, 2018, 2019 und 2022). Nach derzeitigem Trend wird sich diese Entwicklung auch künftig fortsetzen. Wie stark der weitere Anstieg sein wird, hängt letztlich von den globalen Klimaschutzbemühungen ab.

Jahresniederschlag

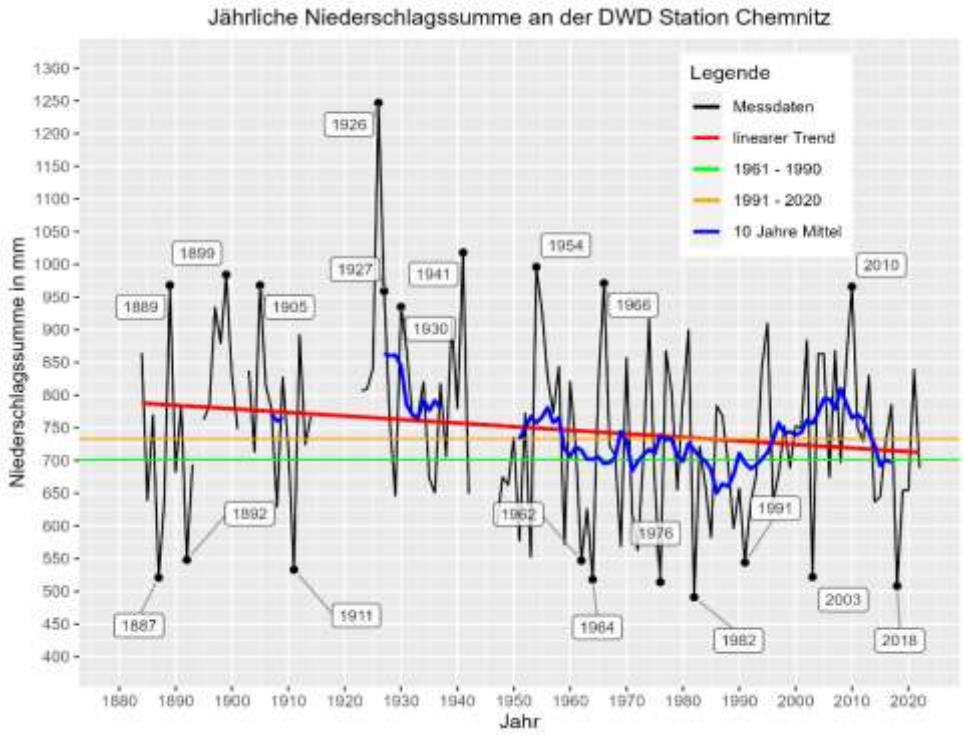


Abbildung 13: Mittlere jährliche Niederschlagssumme an der DWD-Station Chemnitz; die zehn niederschlagsreichsten bzw. niederschlagsärmsten Jahre sind gesondert hervorgehoben

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD

Neben der Temperatur bildet der Niederschlag ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Klimaveränderungen. Vor diesem Hintergrund wird dieser daher im Rahmen des folgenden Teilkapitels unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. Begonnen werden soll mit dem Jahresniederschlag.

Abbildung 13 verdeutlicht, dass es zwischen den Jahren mitunter erhebliche Unterschiede von teils mehreren Hundert mm Niederschlag gibt. Die Identifizierung eines klaren Trends ist weniger eindeutig als bei den Temperaturkennwerten. Über den gesamten Messzeitraum ist ein Rückgang erkennbar, allerdings ist der Verlauf sehr heterogen (vgl. blaue Linie, gleitendes Mittel). Eine Häufung trockener Jahre ist in jüngerer Vergangenheit mit Ausnahme von 2017 und 2021 feststellbar, welche auch vom gleitenden 10-Jahre-Mittelwert angedeutet wird. Zwischen 2000 und 2010 gab es hingegen viele überdurchschnittlich nasse Jahre. Geringe Niederschlagssummen über einen längeren Zeitraum können besonders problematisch für die Vegetation und/oder den Grundwasserspiegel sein, wenn sie in der Vegetationsperiode oder gar über mehrere Jahre hinweg auftreten.

Die Prognose der zukünftigen Niederschlagsentwicklung durch Klimamodelle ist, im Gegensatz zur Temperaturentwicklung, mit großen Unsicherheiten behaftet. Der grundsätzliche Trend ist jedoch, dass im Sommerhalbjahr weniger und im Winterhalbjahr mehr Niederschläge zu erwarten sind. Im Sommer steigt zudem aufgrund der höheren Temperaturen das Potential für ausgeprägte Starkregenereignisse.

Monatsniederschlag

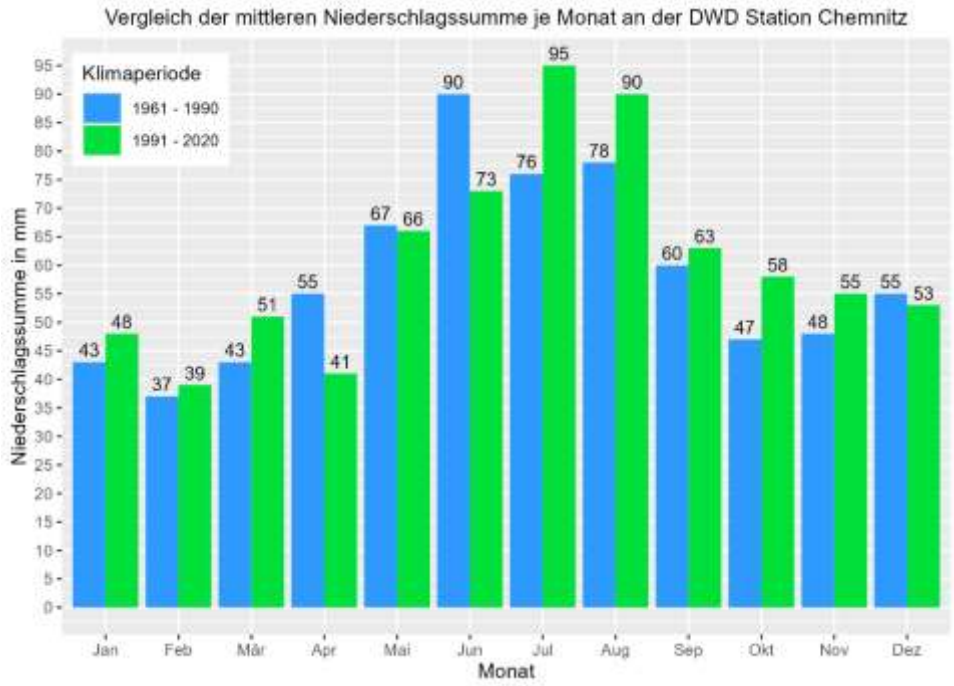


Abbildung 14: Vergleich der mittleren Lufttemperatur je Monat an der DWD-Station Chemnitz für die beiden Klimaperioden 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Vergleich der gemessenen Monatsniederschläge zweier Klimaperioden. Dadurch soll ermittelt werden, ob sich etwaige Veränderungen des Jahresniederschlages gleichmäßig auf alle Monate verteilen oder es hier (größere) Unterschiede gibt. Verglichen werden in der Abbildung 14 die Zeiträume 1961-1990 (Vergangenheit) und 1991-2020 (Gegenwart).

Die Auswertung der beiden Klimaperioden zeigt für die einzelnen Monate ein heterogenes Bild bzgl. der Veränderung der Niederschlagssummen. So lassen sich Monate mit einer Zunahme, Abnahme oder auch keiner Veränderung finden. Am prägnantesten ist die Niederschlagsabnahme in den Monaten April (-14 mm) und Juni (-17 mm). Auf der anderen Seite sind die Niederschlagssummen in den Monaten Juli (+19 mm) und August (+12 mm) gestiegen. Kaum Veränderungen gab es im Februar (+2 mm) und im Mai (-1 mm). Insbesondere der deutliche Rückgang im April ist kritisch zu sehen, da die Vegetation gerade zu Beginn ihres Wachstums ausreichend Wasser benötigt und hier eine signifikante Abnahme des Niederschlages vorliegt.

Starkregentage

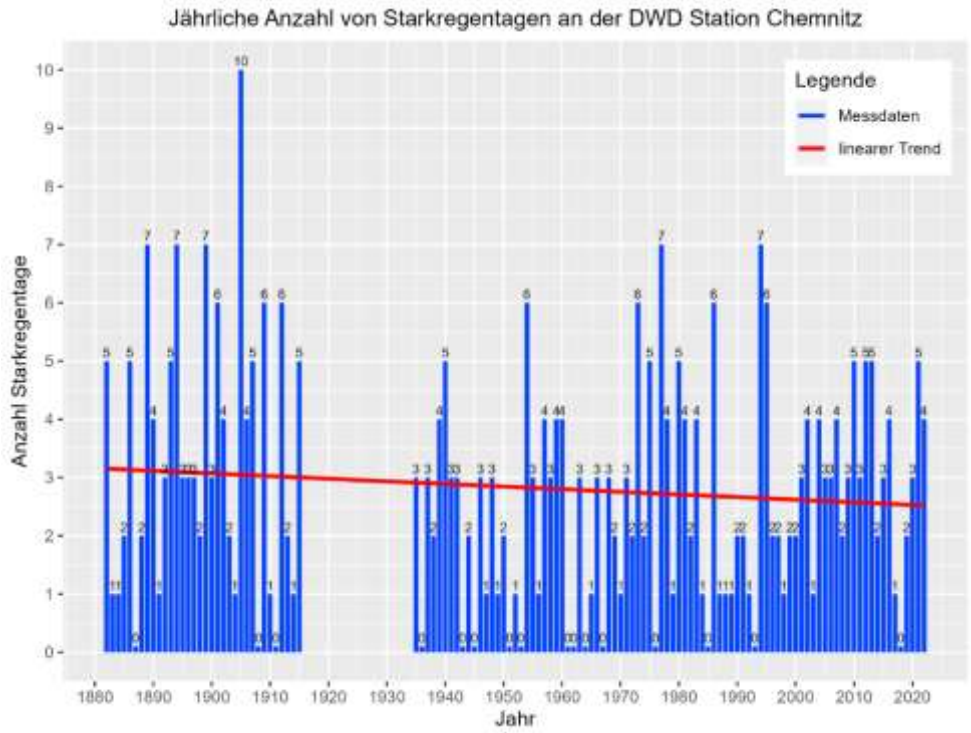


Abbildung 15: Mittlere jährliche Anzahl von Starkregentagen an der DWD Station Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD

Starkregentage sind im Allgemeinen definiert als Tage mit einer Tagesniederschlagssumme größer als 25 mm. Diese Tagessummen können ganzjährig insbesondere in Staulagen auftreten. Höhere Lufttemperaturen begünstigen allerdings das Potenzial für konvektive Starkregenereignisse, da die Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann. Im Sommerhalbjahr können konvektive Starkregenereignisse teils katastrophale Auswirkungen haben, wie sich im Jahr 2021 u. a. im Ahrtal auf erschreckende Weise gezeigt hat.

Die Auswertung der Stationsdaten (Abbildung 15) zeigt, dass die mittlere Anzahl an Starkregentagen seit Messbeginn praktisch unverändert ist und bei etwa drei liegt. Vor 1910 gab es jedoch eine auffallende Häufung von Jahren mit mehr als drei Starkregentagen. Zwischen den einzelnen Jahren gibt es teilweise große Unterschiede. Bei Starkregenereignissen ist unbedingt zu beachten, dass sie **häufig räumlich sehr begrenzt auftreten**, sodass Klimastationen diese unter Umständen nicht erfassen können, auch wenn sie sich in unmittelbarer Nähe zum Ereignis befinden.

Ganz besonders bei Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Extremereignissen wie Starkniederschlägen besteht allerdings eine hohe Unsicherheit. Klimamodelle sind geeignet, mittlere klimatische Zustände über 30 Jahre zu projizieren und nur bedingt in der Lage, Aussagen für einzelne intensive Starkniederschlagsereignisse zu treffen. Zur zukünftigen Entwicklung der Intensität und der Häufigkeit von Starkniederschlägen kann jedoch allgemein angenommen werden, dass das Potenzial für solche Ereignisse zunehmen wird. Die Atmosphäre ist aufgrund höherer Temperaturen in der Lage, mehr Feuchtigkeit aufzunehmen und in Form von konvektiven Starkniederschlägen abzugeben.

Alle weiteren erstellten Klimadiagramme sind, wie eingangs erwähnt, im Anhang zu finden.

3.2 Klimaprojektionsauswertung

Im Folgenden werden zukünftige Veränderungen des Klimas im Stadtgebiet von Chemnitz dargestellt. Wie auch bei der Vorstellung der historischen und aktuellen Messwerte in Kapitel 3.1, werden hier dazu Diagramme ausgewählter klimatischer Kennzahlen genauer vorgestellt. Alle weiteren Diagramme sind im Anhang zu finden. Die abgebildeten Daten stellen dabei die von einem Ensemble an Klimamodellen projizierten Entwicklungen für zwei verschiedene Klimaszenarien dar. Es handelt sich bei diesen Szenarien nicht um eine Prognose wahrscheinlicher Entwicklungen, sondern um die simulierten Entwicklungen bei zwei unterschiedlich angenommenen Entwicklungen der Treibhausgase und Aerosole in der Atmosphäre sowie der Landnutzung (IPCC DATA DISTRIBUTION CENTRE 2023). Gegenübergestellt werden dabei für jede ausgewertete Klimakennzahl das RCP-Szenario 2.6 (RCP: **R**epresentative **C**oncentration **P**athway), welches von einem umfangreichen globalen Klimaschutz innerhalb der nächsten Jahrzehnte ausgeht, sowie das Szenario RCP 8.5, in welchem keine Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden („worst-case“). Aktuelle Messdaten bewegen sich global gesehen eher im Bereich von RCP 8.5.

Jahresmitteltemperatur

Anhand des hier abgebildeten Diagramms (Abbildung 16) der projizierten Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Chemnitz soll kurz der Aufbau der Diagramme aller ausgewerteten Klimaprojektionsdaten erläutert werden:

- Links im Diagramm sind jährliche Messwerte der DWD-Klimamessstation Chemnitz als Referenzwerte für die Einordnung der projizierten klimatischen Änderungen dargestellt. Sie entsprechen den im vorherigen Kapitel 3.1 dargestellten Messdaten.
- Rechts daran schließen für den Zeitraum 2000 bis 2100 die projizierten Werte jeweils beider oben genannter Klimaszenarien an. Diese werden im Flächenmittel für das Stadtgebiet von Chemnitz betrachtet.
- Die senkrechten Balken bilden den dabei Median einer hier verwendeten Auswahl von sieben Klimamodellen, dem **M**ittel**d**eutschen **K**ernensemble (MDK), im zehnjährigen Mittel (z. B. 2001 bis 2010) ab.
- Die grauen senkrechten Linien mit Punkten an den Enden zeigen die Bandbreite der Werte aller vorliegenden Modelle im Ensemble, ebenfalls im zehnjährigen Mittel. Die Punkte zeigen also die höchsten und niedrigsten Werte, welche von allen Modelle hier simuliert wurden.
- Die horizontalen Balken stellen 30-jährige Mittel der im Balkendiagramm gezeigten Mess- und Projektionsdaten für ausgewählte Klimaperioden dar. Sie stellen die 30-jährige Referenzperiode 1971-2000 (basierend auf Messdaten), Gegenwart (2000-2030), Nahe Zukunft (2031-2060) und Ferne Zukunft (2071-2100) gegenüber.
- Die gestrichelte senkrechte Linie zeigt zur Orientierung das zur Abbildungserstellung aktuelle Jahr 2023.

Analog zu Abbildung 10 der historischen Messwerte zeigt Abbildung 16 eine Fortsetzung des Trends der Zunahme der Jahresmitteltemperaturen. Unter Annahme umfangreicher globaler Klimaschutzbemühungen lässt sich diese Zunahme auf etwa +1 K (im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts begrenzen. Bei RCP 8.5 kommt es dagegen im gleichen Zeitraum zu einer Zunahme um knapp +4 K. Die Jahresmitteltemperatur würde dabei auf bis zu 12.7 °C (10-jähriges Mittel) ansteigen. Nach jetzigem Stand der Messwerte und (mangelnden) Klimaschutzbemühungen sind die im Szenario RCP 2.6 angenommenen Werte bereits nicht mehr zu erreichen.

Die Auswertung der saisonalen Temperaturentwicklungen (Sommer-/ Winterhalbjahr) zeigt hierzu vergleichbare Trends auch bei der getrennten Betrachtung beider Jahreshälften. Die entsprechenden Diagramme befinden sich im Anhang.

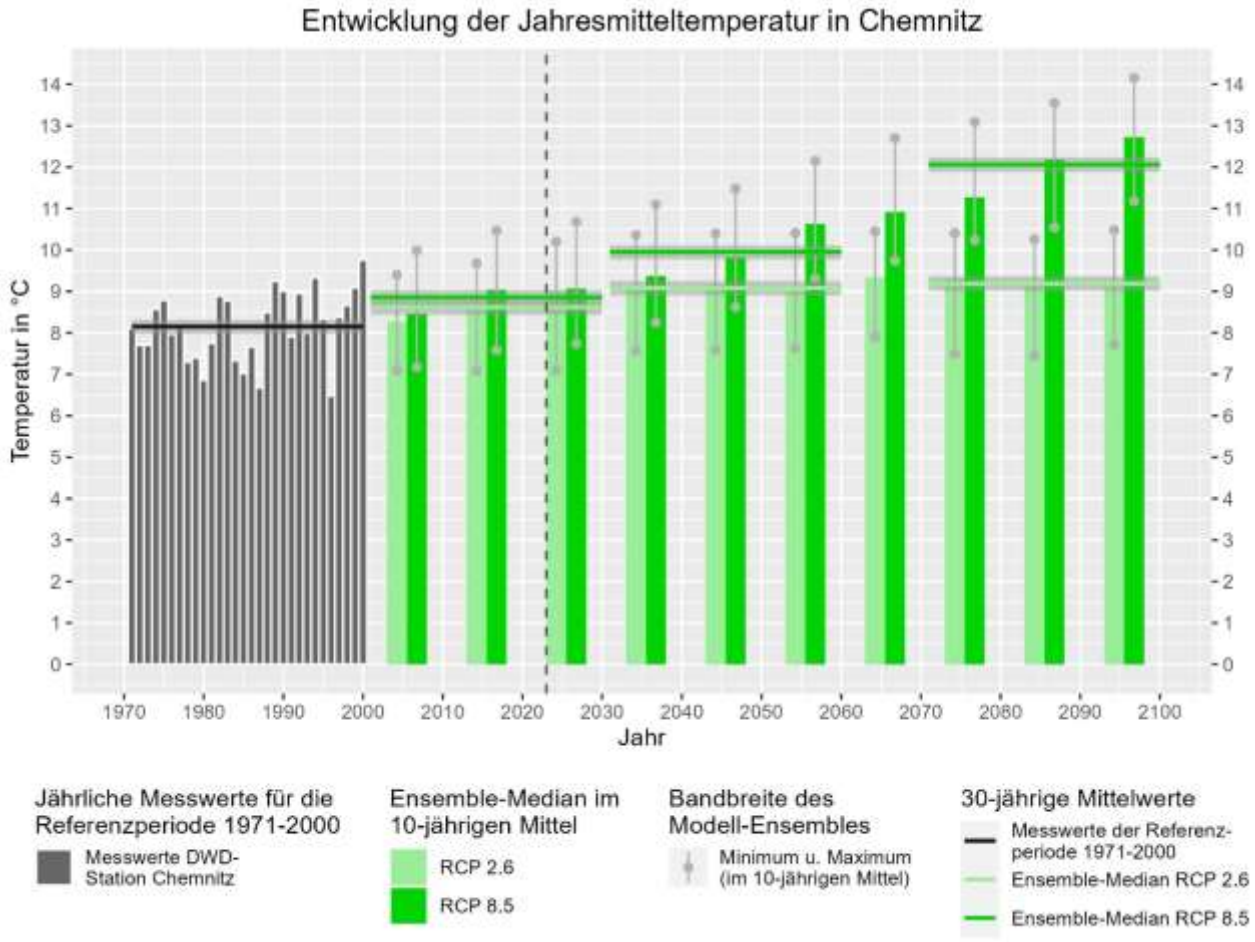


Abbildung 16: Projizierte Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD und LfULG

Hitzetage

Auch die bereits in den Messdaten deutliche Zunahme jährlicher Hitzetage (vgl. Kapitel 3.1 und Abbildung 12) wird sich laut Projektionsdaten fortsetzen (Abbildung 17). Während in der Vergangenheit meist unter fünf Hitzetage pro Jahr, oft auch gar keine Hitzetage, gemessen wurden, zeigt sich in den Projektionsdaten bereits für das 30-jährige Mittel der Gegenwart (2000-2030) eine Zunahme auf durchschnittlich über fünf Hitzetage pro Jahr. Unter umfangreichem Klimaschutz würden bis Ende des 21. Jahrhundert im RCP 2.6 etwa sieben Hitzetage erreicht werden, im „worst-case“ ohne umfangreichen Klimaschutz ist von einer drastischen Zunahme der Hitzetage auf etwa 32 Tage im Jahr auszugehen. Einzelne Modelle im Ensemble kommen für RCP 8.5 sogar auf bis zu 70 jährliche Hitzetage im 10-jährigen Mittel 2091-2100.

Die Projektionsdaten weiterer temperaturbezogener Kenntage sind im Anhang zu finden und zeigen vergleichbare Entwicklungen. Die Sommertage weisen dabei ebenfalls im RCP 8.5 starke Zunahmen auf, während Frost- und Eistage starke Abnahmen verzeichnen. Im RCP 2.6 fällt die jeweilige Zu- oder Abnahme für alle Kenntage deutlich moderater aus, das Eintreffen dieser Werte ist jedoch, wie oben bereits genannt, Stand heute quasi nicht mehr möglich.

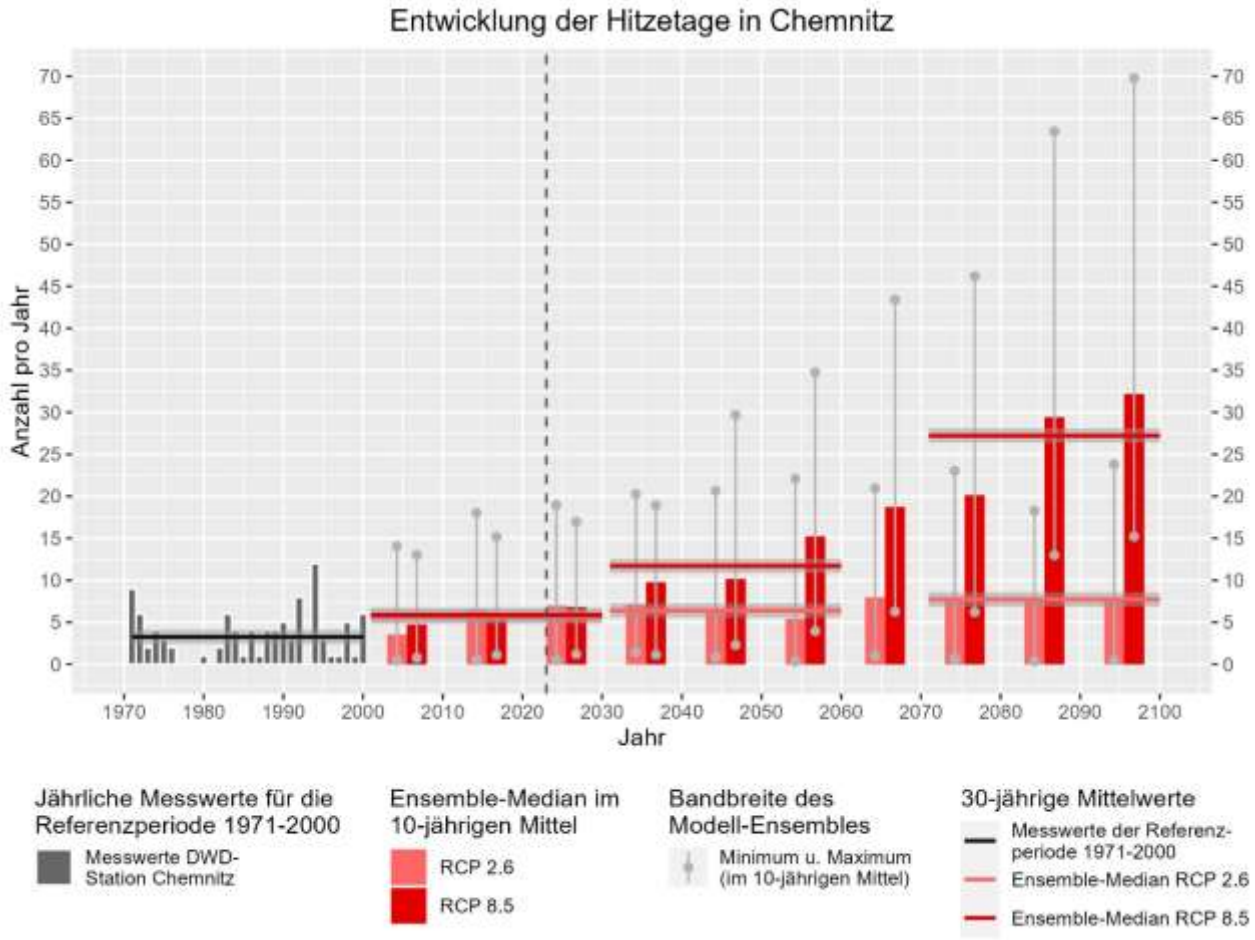


Abbildung 17: Projizierte Entwicklung der Hitzetage in Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des DWD und LfULG

Jahresniederschlag und saisonale Niederschläge

Neben der mittleren Lufttemperatur sowie temperaturbezogenen Kenntagen wurden auch niederschlagsbezogene Klimaprojektionsdaten untersucht, darunter die Jahresniederschlagssumme, saisonale Niederschlagssummen, Regentage, Starkregentage > 90. Perzentil und die Klimatische Wasserbilanz. Auf die jährlichen und saisonalen Niederschlagswerte soll hier genauer eingegangen werden. Die Abbildungen der restlichen Kennzahlen sind im Anhang zu finden.

Im Unterschied zu den anderen Kennzahlen werden die (jährlichen und saisonalen) projizierten Niederschlagssummen hier nicht als Absolutwerte dargestellt, sondern als prozentuale Änderungswerte im Bezug zur modellierten Referenzperiode 1971-2000. Die modellierte Referenzperiode wurde hier analog zur verwendeten gemessenen Referenzperiode in den Diagrammen anderer Kennzahlen (vgl. bspw. Abbildung 17) gewählt. Grund für die prozentuale Darstellungsform ist die tendenzielle Überschätzung der Klimamodelle von Niederschlägen in Gebirgsnähe (hier: Erzgebirge).

In Abbildung 18 wird deutlich, dass die zukünftige Entwicklung der Jahresniederschläge einer großen Bandbreite zwischen den herangezogenen Modellen des MDK unterliegt. Die Bandbreite der Ensembles beider Klimaszenarien (RCP 2.6 und 8.5) liegt dabei über den gesamten Betrachtungszeitraum zwischen Änderungsraten der Niederschläge von +17 bis +33 % (Ensemble-Maximum) und -15 % bis -27 % (Ensemble-Minimum) im 10-jährigen Mittel. Die Ensemble-Mediane bilden für Gegenwart (2001-2030) und Nahe Zukunft (2031-2060) nur minimale Änderungsraten ab, während innerhalb der Fernen Zukunft (2071-2100) 10-jährige Mittel von bis zu ±5 % auftreten.

Letztere ergeben im 30-jährigen Mittel der Fernen Zukunft für RCP 2.6 eine leichte Zunahme der Niederschläge um knapp 3 %, im RCP 8.5 dagegen eine minimale Abnahme der Niederschläge um -1 %. Die projizierten Jahresniederschläge unterliegen somit einer großen Bandbreite innerhalb des Ensembles, aus der sich für beide Klimaszenarien keine klar ersichtlichen Trends ableiten lassen.

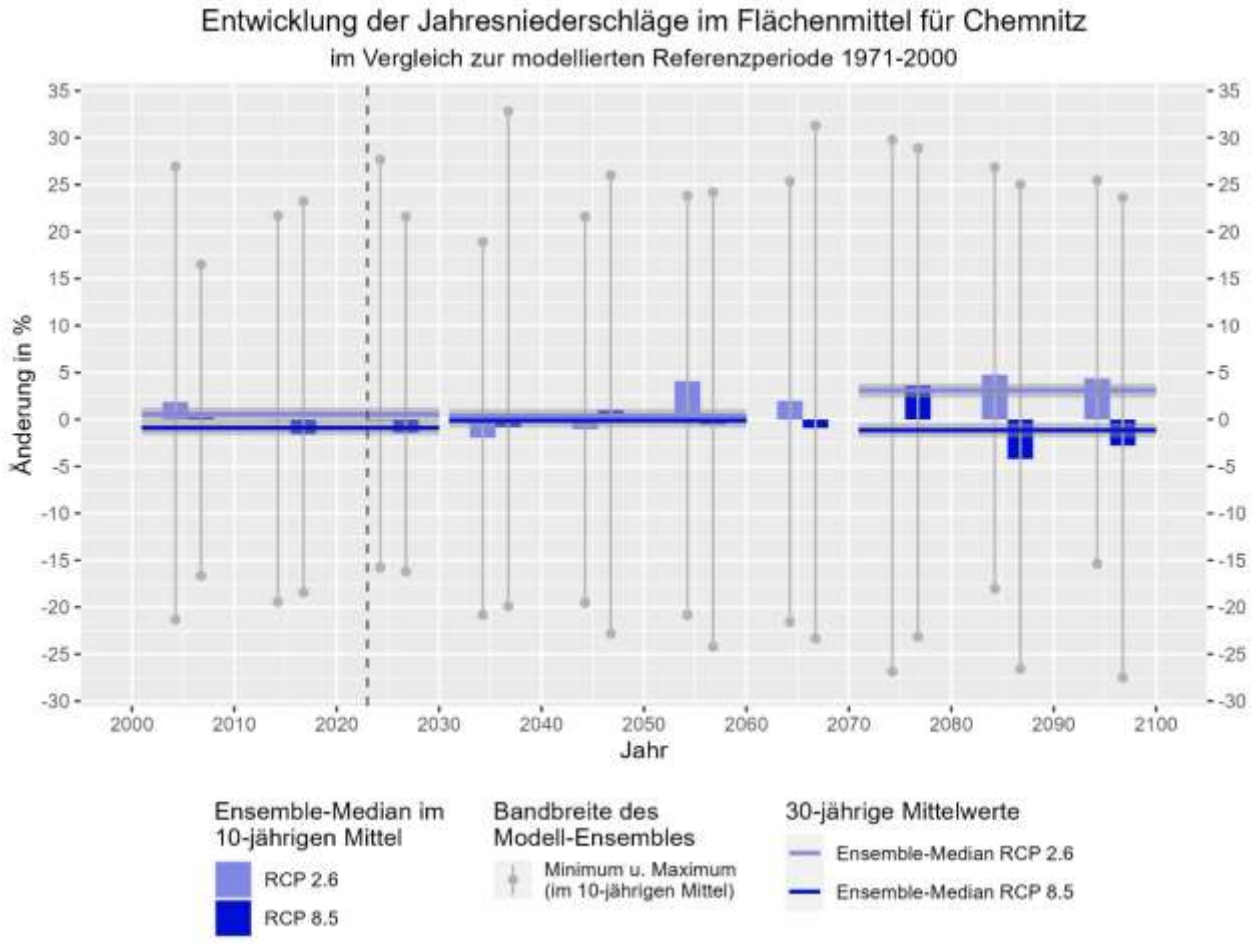


Abbildung 18: Projizierte Entwicklung der Jahresniederschläge in Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des LfULG

Eindeutigere Entwicklungstendenzen weisen dagegen die saisonalen Niederschlagssummen von Sommer- (April bis September) und Winterhalbjahr (Oktober bis März) auf.

Für das Sommerhalbjahr (Abbildung 19) ist im Ensemble-Median des RCP 2.6 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine minimale Zunahme der Niederschläge zu verzeichnen (+1 % für das 30-jährige Mittel der Fernen Zukunft), für RCP 8.5 zeigt sich allerdings eine Tendenz zur Abnahme der Niederschläge um bis zu -10 % zum Ende des Jahrhunderts (30-jähriges Mittel der Fernen Zukunft). Bei den Winterniederschlägen (Abbildung 20) kommt es dagegen tendenziell zu einer Zunahme der Niederschläge in beiden Klimaszenarien, wobei in der Fernen Zukunft bei RCP 2.6 Änderungsraten von knapp +4 % im Ensemble-Median des 30-jährigen Mittels erreicht werden, bei RCP 8.5 von +7 %. Wie auch die jährlichen Werte, unterliegen jedoch auch die beiden saisonalen Niederschlagskennzahlen einer großen Bandbreite der Ensemble-Werte. Beim Sommerniederschlag treten Ensemble-Maxima zwischen +22 und +47 % Änderungsrate auf sowie Ensemble-Minima von -25 bis -40 %. Bei den Winterniederschlägen belaufen sich die Ensemble-Maxima auf bis zu +45 % und die Minima auf bis zu -30 %. Trotz der saisonal entgegengesetzten Entwicklungen der Ensemble-Mediane können hier also keine gesicherten Aussagen zum Umfang der zu erwartenden Niederschlagsänderungen getroffen werden.

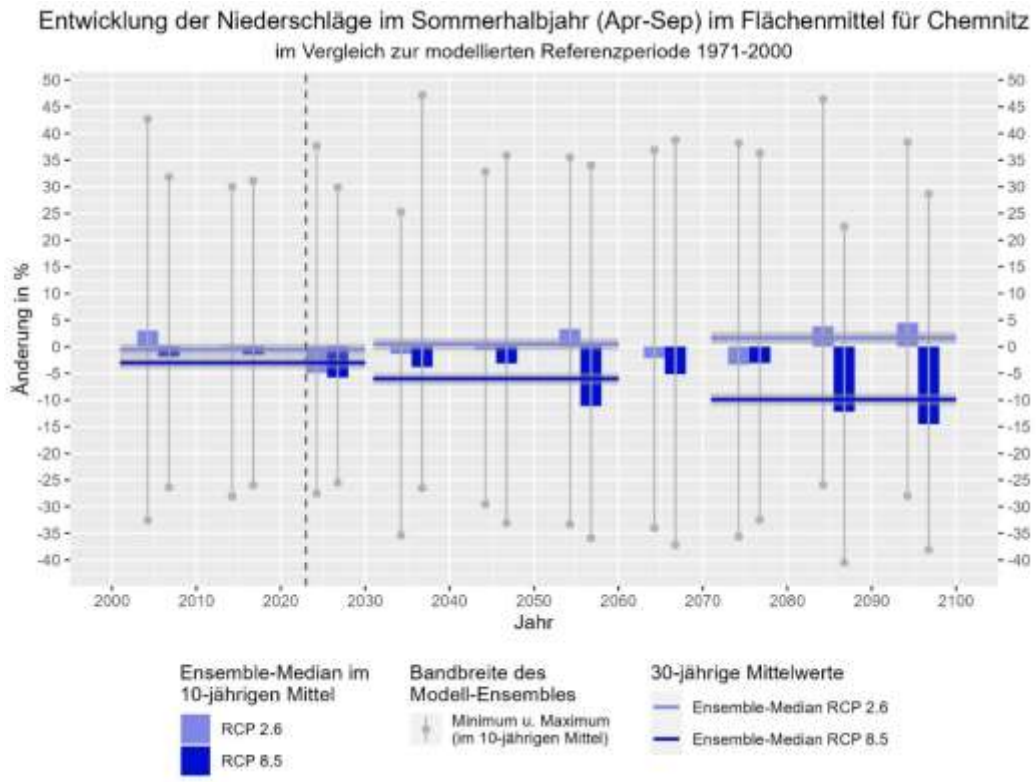


Abbildung 19: Projizierte Entwicklung der Sommerniederschläge in Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des LfULG

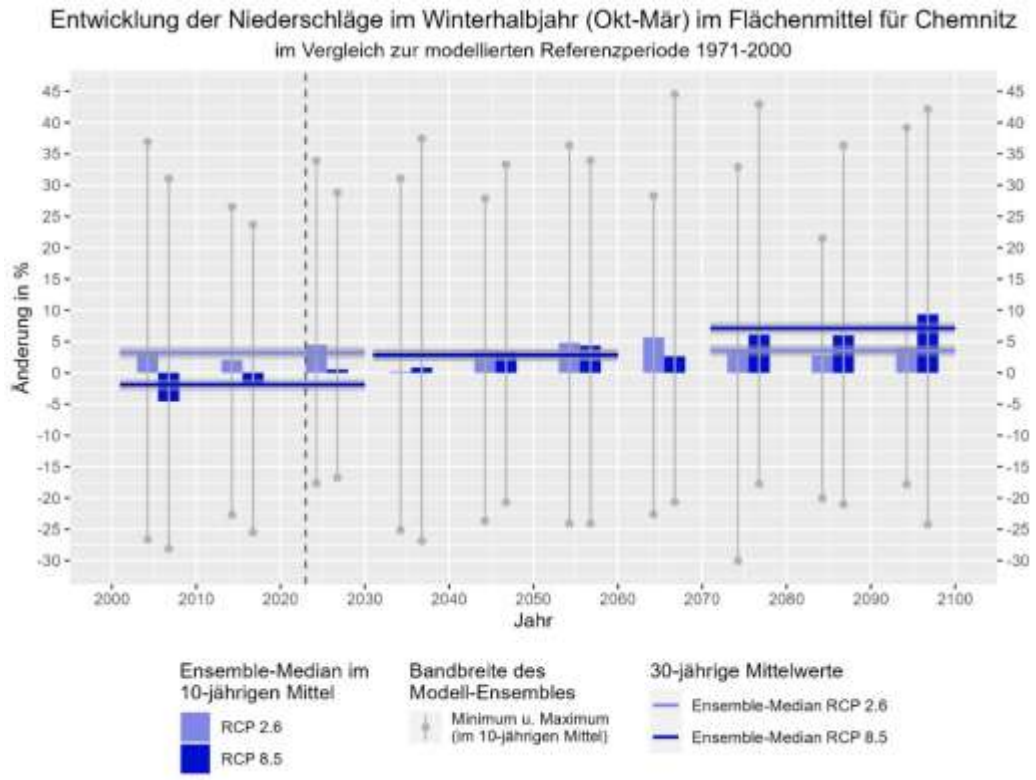


Abbildung 20: Projizierte Entwicklung der Winterniederschläge in Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung basierend auf Daten des LfULG

4 Wärmebelastungsindex in Chemnitz

Im Rahmen dieses Kapitels wird der von ThINK entwickelte Wärmebelastungsindex in einem ersten Schritt exemplarisch für das Stadtgebiet von Chemnitz berechnet. Dabei werden zunächst die notwendigen Eingangsdaten sowie die verwendete Methodik genauer beschrieben, bevor das Ergebnis von Chemnitz anhand von mehreren Kartendarstellungen ausführlich vorgestellt wird. Im letzten Teilkapitel erfolgt eine genauere Betrachtung der durchgeführten Verschattungsanalyse, welche unabhängig vom Wärmebelastungsindex vorliegt, allerdings zusätzliche wichtige Informationen für die aktuelle und künftige Stadtplanung bereitstellen kann.

4.1 Eingangsdaten

Für die Durchführung der Analyse kommen frei verfügbare amtliche Geobasisdaten sowie ebenfalls frei verfügbare fernerkundungsbasierte Satellitendaten der Raumfahrtunternehmen NASA (**N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration) und ESA (**E**uropean **S**pace **A**gency) zum Einsatz. Von Seiten der NASA werden Landsat-8- bzw. Landsat-9-Daten (beide Satelliten rotieren zeitversetzt im selben Orbit) aus dem Spektrum des Thermalen Infrarots (TIR) zur Ableitung der Landoberflächentemperatur verwendet. In diesem Fall wurden Landsat-8-Daten vom 03.08.2022 mit einer ursprünglichen räumlichen Auflösung von 30 m x 30 m beschafft. Die ESA betreibt ihrerseits das Sentinel-2-Satellitenpaar, dessen Daten dafür geeignet sind, daraus den NDVI mit einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m abzuleiten. Hierbei handelt es sich um einen Vegetationsindex, der es ermöglicht, Aussagen zum Vorhandensein und zur Vitalität von Vegetationsflächen am Aufnahmezeitpunkt (hier: 27.06.2022) zu treffen. Zusätzliche Informationen zu Landoberflächentemperatur und NDVI können auch in den Kapiteln 2.2.2 sowie 2.2.3 nachgelesen werden. Einen weiteren aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten hier verwendeten Datensatz der ESA bildet der europaweit berechnete Versiegelungsgrad mit Stand 2018 (nächste geplante Aktualisierung im Jahr 2024), ebenfalls mit einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m.

Als einziger nicht fernerkundungsbasierter Datensatz werden amtliche 3D-Gebäudedaten für das Untersuchungsgebiet, LoD1 oder LoD2, benötigt. Diese enthalten Informationen über die Gebäudegrundflächen und zugehörige Gebäudehöhe und ermöglichen die Ableitung der Gebäudevolumendichte, einem Maß für die Dichte und Höhe der vorliegenden Bebauung bei einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m.

Bei den Landsat- und Sentinel-Daten, welche für Landoberflächentemperatur und NDVI herangezogen werden, handelt es sich um „Momentaufnahmen“ der Temperatur und Vegetationsvitalität zu einem spezifischen Aufnahmezeitpunkt. Bei der Auswahl geeigneter Daten sollten Aufnahmetage mit hohen Temperaturen, hoher Sonneneinstrahlung und Trockenheit gewählt werden. Dies liegt zum einen darin begründet, dass für die Erzielung aussagekräftiger Ergebnisse wolkenfreie Satelliten-Szenen verwendet werden müssen. Räumliche Muster bei der Landoberflächentemperatur zeigen sich darüber hinaus am besten bei hohen Tagestemperaturen und für die sommerliche Hitzebelastung aussagekräftige NDVI-Werte liegen nur im Sommer, vor allem in und nach Trockenperioden vor. Als saisonaler Zeitraum, aus dem die verwendeten Landsat- und Sentinel-Daten stammen sollten, wurde deshalb hier der 1. Juni bis 15. September festgesetzt. Des Weiteren sollten die Aufnahmezeitpunkte der im selben Index verrechneten Landsat- und Sentinel-Szenen möglichst nahe beieinander (idealerweise wenige Tage) liegen. Bei der Auswahl geeigneter Aufnahmen für die Landoberflächentemperatur sollte zusätzlich die Lufttemperatur am jeweiligen Tag herangezogen werden. Hitzetage (mit Tmax. ≥ 30 °C) oder zumindest annähernd hohe Temperaturen sind am besten geeignet, um die räumliche Heterogenität im Untersuchungsgebiet abzubilden.

4.2 Berechnungsmethodik

Der Wärmebelastungsindex für das Stadtgebiet von Chemnitz soll in einem GIS-basierten Indikatorenansatz (vgl. Abbildung 21) aus den in Kapitel 4.1 genannten Eingangsdatensätzen berechnet werden. Für die vier Eingangsindikatoren sowie den resultierenden Wärmebelastungsindex werden hochaufgelöste Karten erstellt.

Aus den oben genannten Rohdaten werden zunächst die benötigten vier Eingangsindiktoren Landoberflächentemperatur in Grad Celsius, NDVI (ohne Einheit) sowie die Gebäudevolumendichte in m^3/m^2 berechnet. Der Versiegelungsgrad der Landoberfläche in Prozent liegt bereits in geeigneter Form vor. Anschließend erfolgt die Angleichung der Auflösung der Landoberflächentemperatur auf die der drei anderen Indikatoren. Hierfür wird eine Umrechnung von 30 m x 30 m auf 10 m x 10 m mittels kubischem Resampling durchgeführt. Dies dient rein technisch dem Erhalt der 10 m x 10 m Auflösung im Endprodukts und ändert nichts an der inhaltlichen Aussagekraft der Daten. Soweit erforderlich, werden alle Eingangsdaten in das gleiche Koordinatensystem transformiert.

Da die vier Eingangsindikatoren unterschiedliche Wertebereiche besitzen, ist auch hier ein Angleich erforderlich. Dabei wurde eine dekadische Logarithmierung mit anschließender statistischer Normierung auf einen Wertebereich von +1 (geringste Betroffenheit) bis +2 (höchste Betroffenheit) gewählt. Dieser Wertebereich wurde den rein mathematisch gleichwertigen Grenzen von 0 bis +1 bewusst vorgezogen, um Fehlinterpretationen des Wertes 0 im Ergebnis zu vermeiden. Zur Vergleichbarkeit der Eingangsdaten und in Vorbereitung auf das Logarithmieren wurden zuerst, wo nötig, Wertebereiche der Eingangsindiktoren invertiert und Null- sowie negative Werte auf inhaltlich sinnvolle Grenzwerte gesetzt.

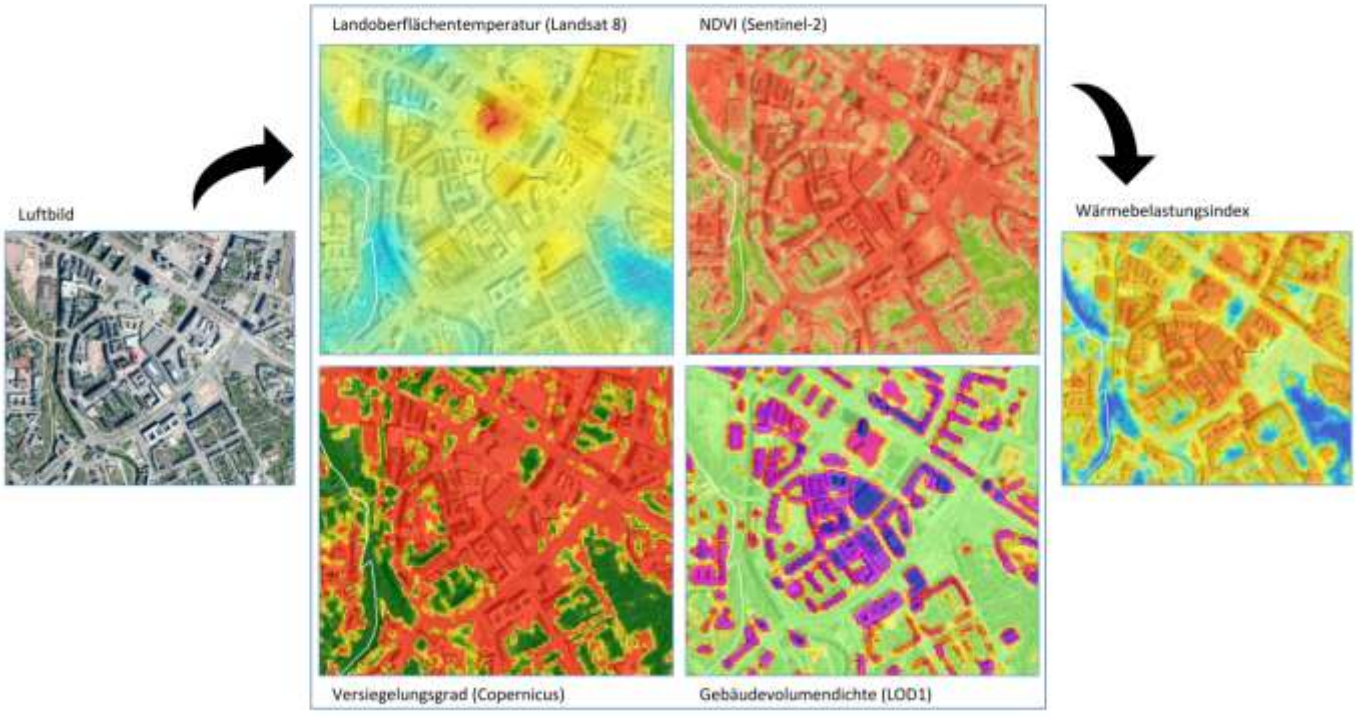


Abbildung 21: Schematische Darstellung der vier Teilindikatoren am Beispiel der Innenstadt von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

Nachdem die vier Eingangsdatensätze in normierter Form vorliegen, werden diese jeweils mit 25 % Gewichtung multiplikativ miteinander verrechnet (geometrisches Mittel). Die multiplikative Variante hat gegenüber dem arithmetischen Mittel den Vorteil, dass besonders hohe und niedrige Wärmebelastungswerte nur dann auftreten können, wenn alle Eingangsdaten am jeweiligen Ort eine sehr hohe bzw. niedrige Betroffenheit anzeigen.

4.3 Ergebnisse für das Stadtgebiet von Chemnitz

Hinweis: Alle Karten und Diagramme, welche im Rahmen dieses Unterkapitels vorgestellt werden, liegen zusätzlich in Form eines digitalen Anhangs in ihrer Originalauflösung (bei Karten i .d. R. A0) vor. Für eine detaillierte Betrachtung empfehlen wir dringend die Verwendung der PDF-Karten, um mit Hilfe der Zoomfunktion mehr Details erkennen zu können.

4.3.1 Landoberflächentemperatur

Die Ableitung der Landoberflächentemperatur ist ein in der internationalen Literatur anerkanntes Verfahren in stadtklimatischen Untersuchungen zur Identifizierung überwärmter und kühlender Bereiche (u. a. IMHOFF ET AL. 2009, ESTOQUE ET AL. 2017, RASUL ET AL. 2017, ZHOU ET AL. 2019).

Der thermale Kanal des Landsat-8-Satelliten misst die langwellige, von der Erdoberfläche emittierte Wärmestrahlung und fungiert damit – vereinfacht ausgedrückt – als Wärmebildkamera aus dem All. Sehr wichtig ist hierbei die Tatsache, dass es sich explizit nicht um die oft verwendete Lufttemperatur in 2 m Höhe handelt.

Die Aufnahme wird alle zwei Wochen stets um 10 Uhr (+/-30 min) über einem festgelegten Ausschnitt der Erdoberfläche erstellt. Gemeinsam mit dem weitgehend baugleichen Landsat-9-Satelliten entsteht eine zeitliche Wiederholrate von etwa 8 Tagen. Dies ist wichtig, da nur weitestgehend wolkenfreie Szenen analysiert werden können. Für das Stadtgebiet von Chemnitz eignet sich dabei die Landsat-8-Aufnahme vom 03.08.2022 (Abbildung 22), welche einen heißen (Tageshöchsttemperatur 32,4 °C) und gleichzeitig wolkenfreien Tag abbildet (14,5 Sonnenstunden).

Die hinsichtlich der Landoberflächentemperatur kühlsten Bereiche in Chemnitz wurden innerhalb großer Waldflächen oder Parks identifiziert. Hier befinden sich besonders viele (gesunde) Bäume und Grünflächen.

Auf der anderen Seite befinden sich die wärmsten Bereiche in stark versiegelten Gewerbegebieten oder z. B. im Umfeld des Hauptbahnhofes. Weiterhin ergibt sich die Besonderheit, dass, je nachdem ob sie brachliegen oder nicht, auf Landwirtschaftsflächen ebenfalls sehr hohe Landoberflächentemperaturen auftreten. Um eine Verwechslung mit städtischer Überwärmung zu vermeiden, erfolgte eine schraffierte Kennzeichnung landwirtschaftlich genutzter Flächen.

Einschränkend sei jedoch darauf verwiesen, dass hier aufgrund der verhältnismäßig groben Ursprungsauflösung von 30 m x 30 m Rasterzellengröße keine kleinräumigen Effekte, wie z. B. die Wirkung einzelner Bäume oder kleinerer Grünflächen, abgebildet werden können.

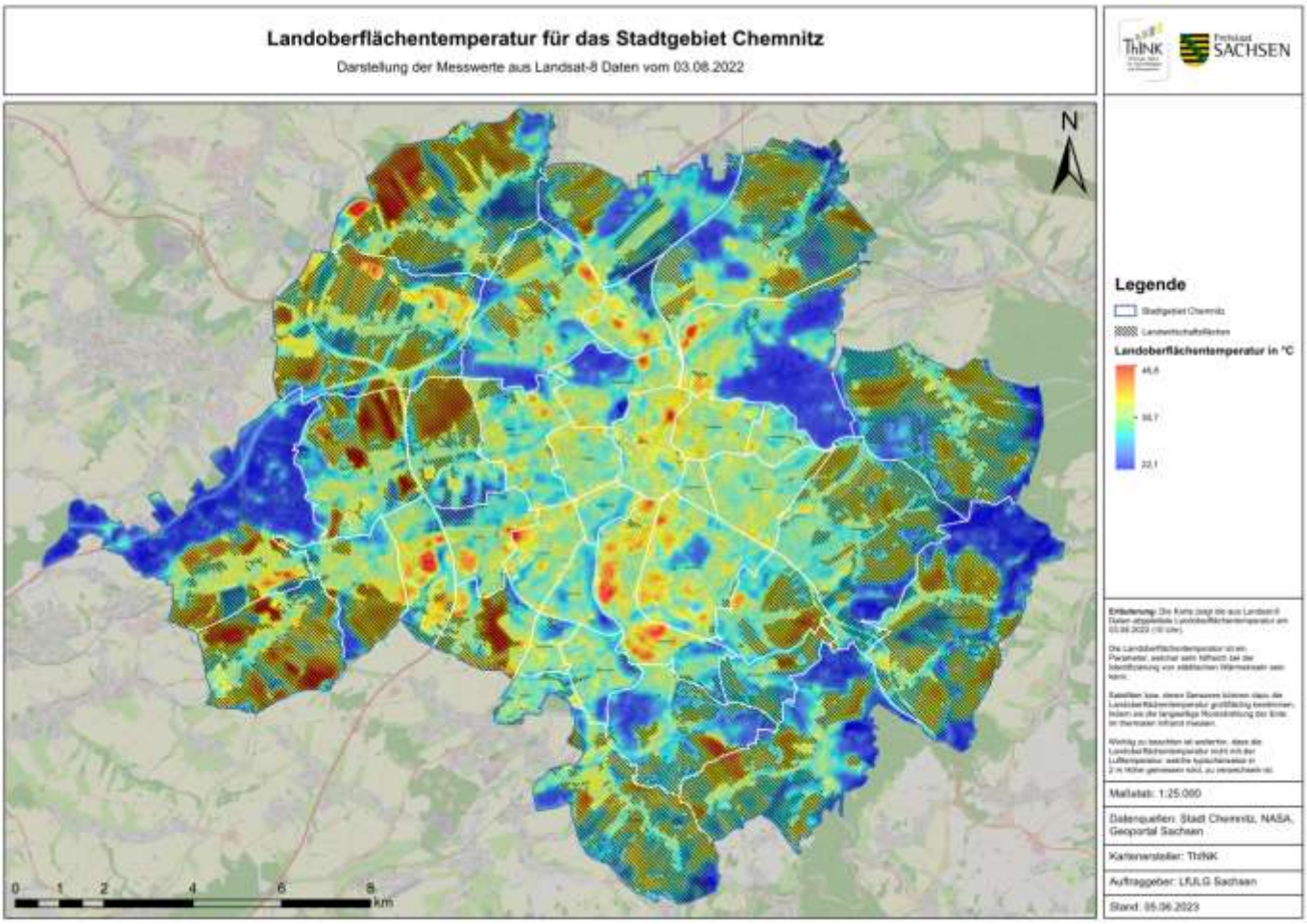


Abbildung 22: Landoberflächentemperatur aus Landsat-8-Daten vom 03.08.2022 um 10 Uhr morgens im Stadtgebiet von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

4.3.2 Versiegelungsgrad

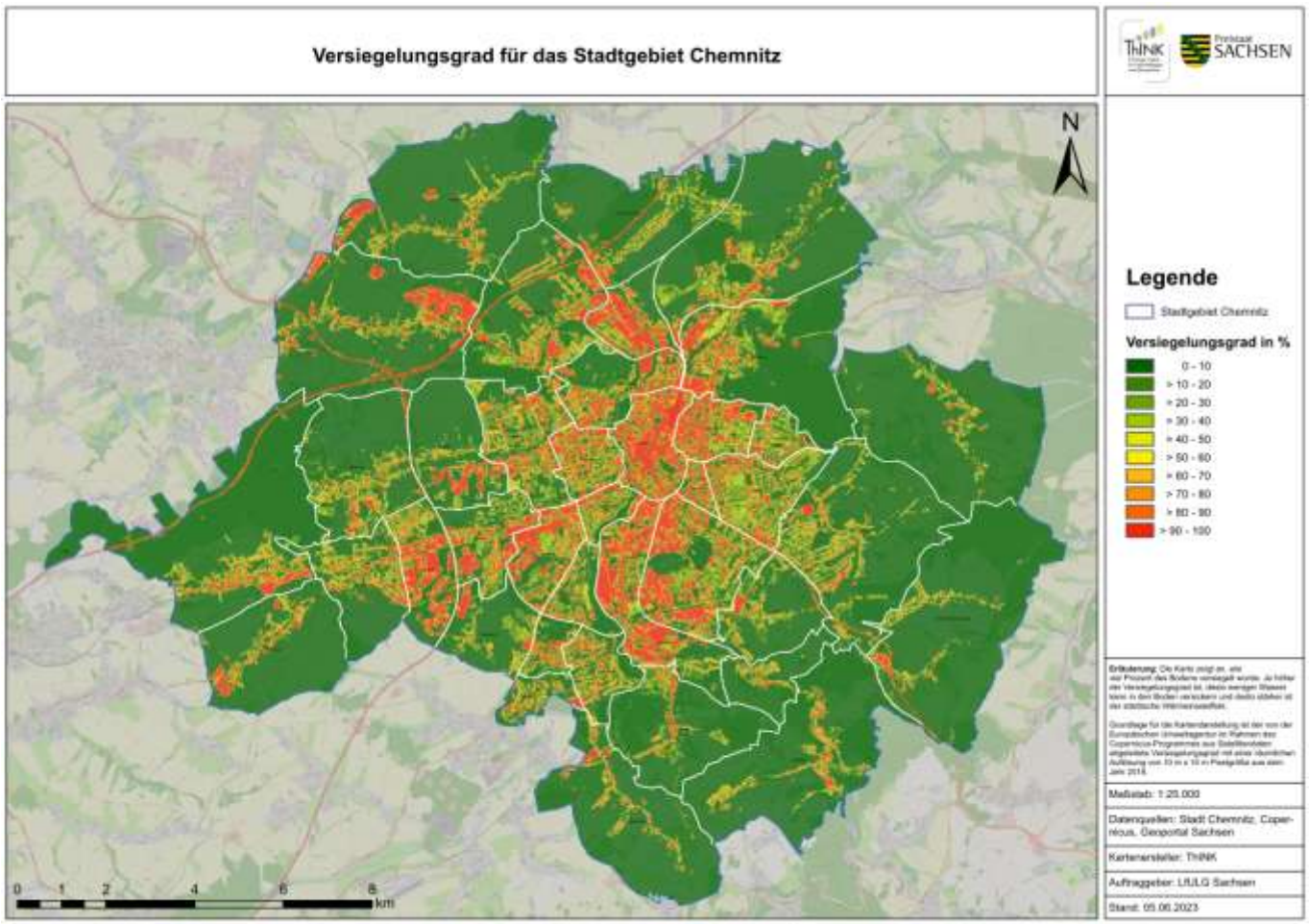


Abbildung 23: Aus EEA (Europäische Umweltagentur)-Daten abgeleiteter Versiegelungsgrad aus dem Jahr 2018 im Stadtgebiet von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

Versiegelung bezeichnet das (luft- und wasserdichte) Bedecken des natürlichen Bodens durch menschliche Bauwerke (z. B. Straßen, Gebäude, Plätze). Versiegelte Böden können kein Regenwasser aufnehmen und entsprechend auch kein Wasser verdunsten, wodurch wiederum die städtische Aufheizung gefördert wird. Sofern noch eine gewisse Luft- und Wasserdurchlässigkeit des Bodens gewährleistet ist, wird von Teilversiegelung gesprochen. Vor allem in den Nachtstunden strahlen stark versiegelte Flächen noch lange Wärme ab und verlangsamen damit die nächtliche Abkühlung in urbanen Räumen.

Von der Europäische Umweltagentur wird alle sechs Jahre (zuletzt 2018) im Rahmen des Copernicus-Programms, basierend auf einer Kombination mehrerer Satellitendaten, ein für ganz Europa flächendeckender Datensatz zum prozentualen Versiegelungsgrad erstellt. Dessen räumliche Auflösung beträgt 10 m x 10 m.

Weite Teile des Chemnitzer Stadtzentrums entfallen hierbei in die höchste Klasse von 90 bis 100 % Versiegelung und weisen damit einen sehr hohen Versiegelungsgrad auf (Abbildung 23). Historisch bedingt ist dieser Wertebereich in vielen Altstädten üblich. In den Stadtteilen Altchemnitz und Furth gibt es ebenfalls viele stark versiegelte Bereiche.

Zu beachten sei auch hier, dass selbst die (verglichen mit der Landoberflächentemperatur) wesentlich bessere Auflösung von 10 m x 10 m auch nicht immer in der Lage ist, die Wirkung von beispielsweise einzelnen Bäumen zu erfassen. Entsprechend kann es stellenweise zu einer Überschätzung des Versiegelungsgrades kommen. Zusammenhängende Grünstrukturen werden hingegen sehr gut abgebildet. Dort können dichte Baumkronen

wiederum zu einer Unterschätzung führen, da der Sensor nicht durch sie „hindurchblicken“ kann und damit den eigentlichen Boden nicht erfasst.

4.3.3 Gebäudevolumendichte

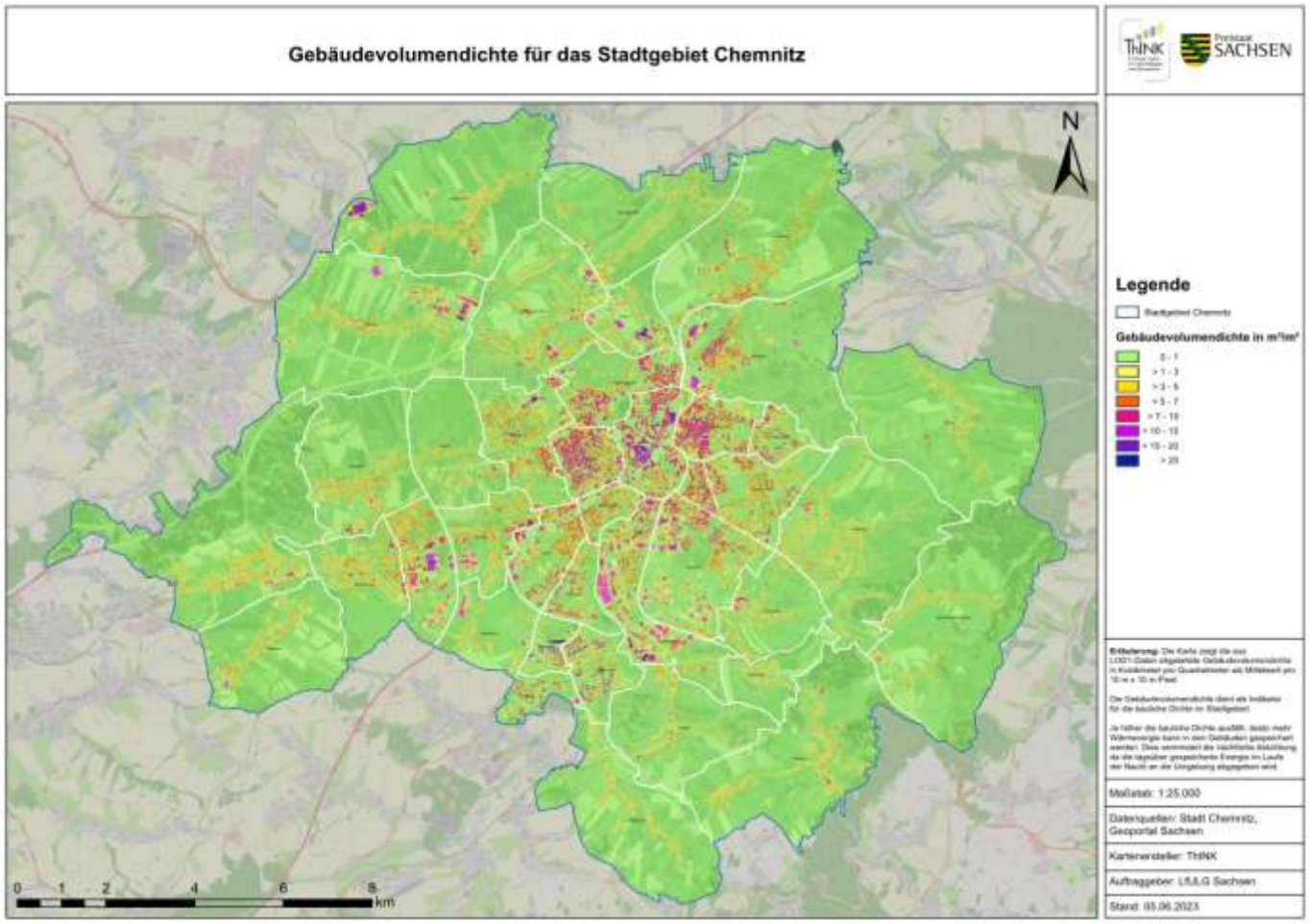


Abbildung 24: Aus LOD1-Daten berechnete Gebäudevolumendichte im Stadtgebiet von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

Während der Versiegelungsgrad auf 2D-Informationen beruht, kann mit Hilfe der Gebäudevolumendichte zusätzlich auch die dritte Dimension in Form der Gebäudehöhe mitberücksichtigt werden. Für die Berechnung der Gebäudevolumendichte wurden die zur Verfügung gestellten LOD-Daten, genauer gesagt die darin enthaltenen Informationen über Gebäudegrundrisse und -höhen, in ein Raster mit 10 m x 10 m Auflösung überführt, um eine Verrechnung mit den anderen Datensätzen zu ermöglichen. Im Ergebnis zeigt das erstellte Raster wie viel m^3 Bauvolumen auf einer Fläche von einem m^2 (im Mittel für Rasterzellen von 10 m x 10 m) zu finden sind. Je höher der Wert ist, desto größer und massiver ist der vorliegende Baukörper.

Große Gebäude speichern tagsüber mehr Wärmeenergie und geben diese dann wiederum nachts als langwellige Wärmestrahlung ab. Als Maß für vorliegende Gebäudevolumina und bauliche Dichte besitzt dieser Indikator dementsprechend ebenfalls eine wichtige Klimarelevanz.

Die größte bauliche Dichte ist mit Werten von um und über 20 m^3/m^2 vorwiegend im Bereich des Stadtzentrums von Chemnitz und in einigen Gewerbegebieten anzutreffen. Überall wo es keine Gebäude gibt, beträgt die Gebäudevolumendichte logischerweise 0 m^3/m^2 (zu erkennen an der grünen Farbe in Abbildung 24).

4.3.4 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

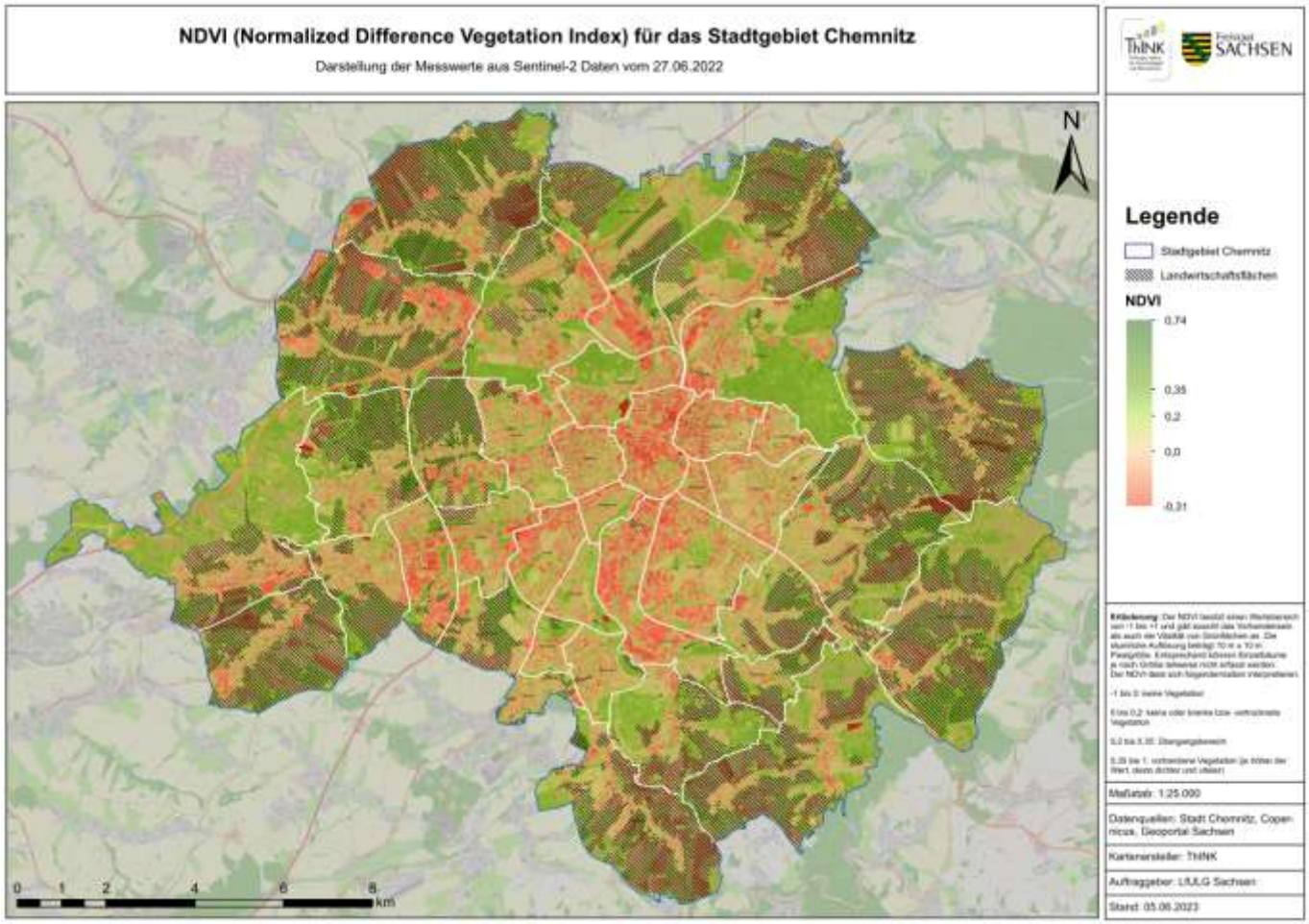


Abbildung 25: Aus Sentinel-2-Daten vom 27.06.2022 berechneter NVDI

Quelle: eigene Erstellung

Für die Identifizierung von Flächen mit überwiegender Vegetationsbedeckung wurde ein fernerkundungsbasierter Ansatz gewählt, welcher im Folgenden kurz erläutert wird. Zunächst erfolgte der Download einer möglichst wolkenfreien Sentinel-2-Szene mit einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m. Hierfür erschien die Aufnahme vom 27.06.2022 besonders gut geeignet. Sentinel-2 ist ein Satellitenpaar, welches im Rahmen des europäischen Copernicus-Programmes global Daten erfasst.

Die Aufnahme wurde auf das Gebiet der Stadt Chemnitz zugeschnitten. Anschließend erfolgte die Berechnung des NDVI, welcher ein anerkanntes Maß zur Erfassung (vitaler) Vegetation darstellt und einen Wertebereich von -1 bis +1 aufweist (GANDHI 2015:1200ff.). Niedrige NDVI-Werte unter und nahe 0 werden als nicht mit Vegetation bedeckte Flächen interpretiert, während niedrige positive Werte auf geringen und/oder erkrankten Bewuchs hinweisen. Bei Werten über einem Grenzwert von 0,35 wird hier mit hoher Wahrscheinlichkeit das Vorhandensein vitaler Vegetation angenommen. Je höher der NDVI über diesem Grenzwert liegt, desto dichter und vitaler ist die Vegetation. Weitere Informationen zum NDVI finden sich in Kapitel 2.2.3.

Abbildung 25 zeigt die Werteverteilung des NDVI in Chemnitz. Wenn auf Vegetationsflächen Werte von mehr als 0,35 vorkommen, kann davon ausgegangen werden, dass sich die dortige Vegetation zum Aufnahmezeitpunkt in einem gesunden Zustand befunden hat. Weisen Vegetationsflächen einen NDVI Wert zwischen 0,2 und 0,35 auf, so ist von Trockenstress auszugehen. Noch geringere Werte treten nur bei vegetationslosen Flächen oder bei abgestorbener bzw. vertrockneter Vegetation auf. Wie schon bei der Landoberflächentemperatur sind landwirtschaftliche Flächen auch hier schraffiert dargestellt.

Größere zusammenhängende Flächen mit hohen NDVI-Werten, befinden sich in Waldgebieten, wobei z.B. im Nordosten des Stadtteils Einsiedel größere Schäden erkennbar sind. Die innerstädtischen Grünflächen weisen zum Aufnahmezeitpunkt vielerorts gute Vitalitätswerte auf.

4.3.5 Ermittelter Wärmebelastungsindex

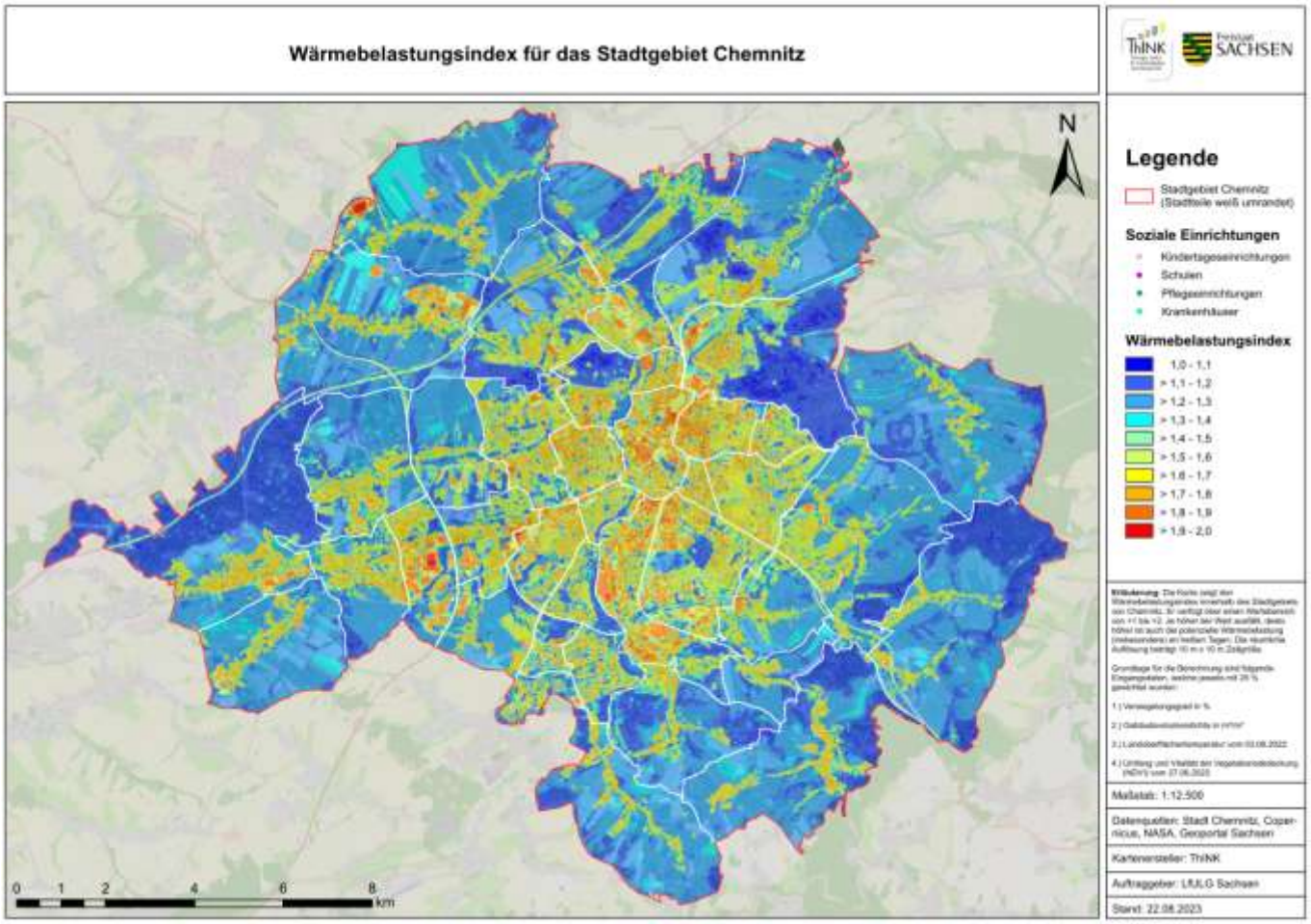


Abbildung 26: Ermittelter Wärmebelastungsindex im Stadtgebiet von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

Abbildung 27: Vergrößerter Ausschnitt der Karte zum Wärmebelastungsindex im Bereich des Stadtzentrums von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

Eine Kombination (jeweils 25 % Gewichtung) der vier Indikatoren liefert nun den Wärmebelastungsindex für die Stadt Chemnitz (Abbildung 26, vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 27) mit einem Wertebereich von +1 (geringste Wärmebelastung bis +2 (höchste Wärmebelastung). Dunkelblaue Flächen zeigen hierbei entsprechend die geringste Wärmebelastung an, während dunkelrote (Hitzehotspots) und auch orange Flächen auf eine hohe bis sehr hohe Wärmebelastung für die Bevölkerung an heißen Tagen hinweisen.

Beispielsweise kommt die geringste Klasse im dunkelblauen Bereich von Wald- und Wasserflächen zustande, da dort gleichzeitig die niedrigste Landoberflächentemperatur, der geringste Versiegelungsgrad, die niedrigste Gebäudevolumendichte und der höchste NDVI (Besonderheit: bei Wasser ist der NDVI sehr gering) auftreten. Entsprechend liegen in den Hitzehotspots (u.a. Gewerbegebiete, Innenstadt, Wohnbebauung im westlichen Stadtteil Sonnenberg) alle vier Indikatoren am oberen (bzw. beim NDVI unteren) Ende ihres Wertebereiches (Anmerkung: damit höhere Werte der vier Eingangindikatoren als erhöhte Wärmebelastung interpretiert werden können, wurden die NDVI-Werte für die Verrechnung zum Wärmebelastungsindex invertiert, vgl. Kapitel 4.2).

Auf Flächen mit Wärmebelastungswerten von 1,8 oder mehr ist entsprechend an heißen Tagen mit lokalklimatisch besonders ungünstigen Aufenthaltsbedingungen zu rechnen. Insbesondere, wenn hier noch eine hohe Sonneneinstrahlung hinzukommt (vgl. Kapitel 4.4). Orte mit den günstigsten Aufenthaltsbedingungen wie z. B. Parks können von den Menschen als nahegelegene „Klima-Oasen“ genutzt werden und sollten unbedingt erhalten bleiben.

Für das Verständnis und die Interpretation ist stets zu beachten, dass es sich beim Wärmebelastungsindex um ein relatives Betroffenheitsmaß innerhalb eines definierten Untersuchungsgebietes handelt. Die räumliche Verteilung der einzelnen Wertebereichsklassen variiert entsprechend je nach deren Charakteristik (Grünflächenverteilung, Vorhandensein von Gewässern, Vorhandensein von stark versiegelten Gewerbegebieten, Struktur der Wohnbebauung, Anordnung der Gebäude, etc.). Weiterhin kann der Wärmebelastungsindex als Beitrag der entsprechenden Flächen zum städtischen Wärmeinseleffekt verstanden werden. Je höher die Werte, desto stärker ist die Aufheizung tagsüber und desto stärker ist wiederum die nächtliche Wärmeabgabe.

Der Wärmebelastungsindex kann für Städte eine wichtige Datengrundlage darstellen, um einen belastbaren Überblick über die aktuellen Situation im Hinblick auf städtische Überwärmung und lokale Hitzeinseln zu erhalten und auf Basis dessen Maßnahmen zur Klimaanpassung zu ergreifen bzw. diese bei künftigen Bauvorhaben von Vorherein in den Bebauungsplänen festzusetzen.

Anwendungsbeispiel: Wärmebelastung in sozialen Einrichtungen

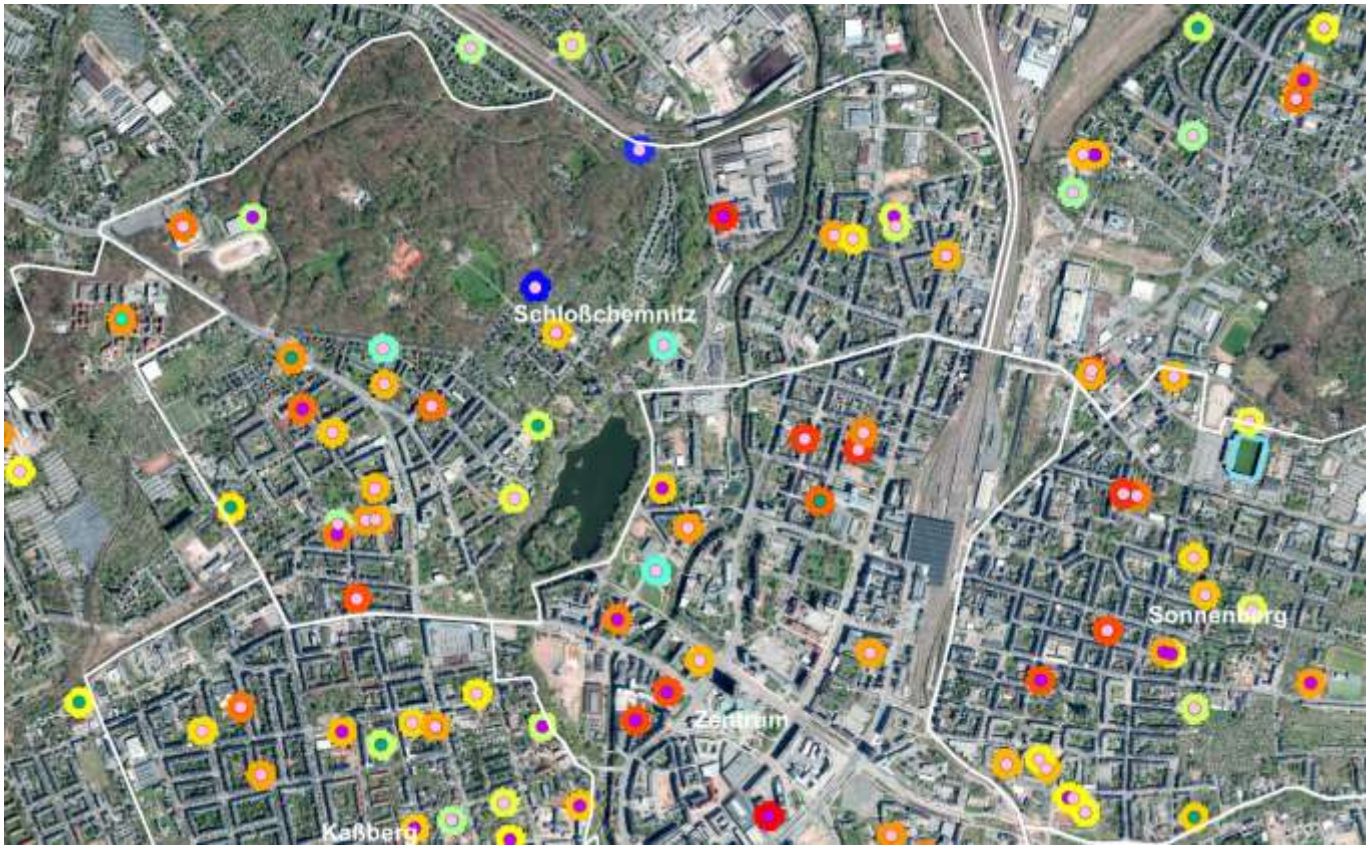


Abbildung 28: Ausschnitt der Karte zum Mittelwert des Wärmebelastungsindex im 50 m Radius von sozialen Einrichtungen. Blaue Farben stehen für ein günstiges Umfeld und rote Farben für ein eher ungünstiges.
Quelle: eigene Erstellung

Für die sozialen Einrichtungen der Stadt Chemnitz erfolgte auf Basis des Wärmebelastungsindex eine Bewertung ihres unmittelbaren Umfeldes (50 m Radius). Hierfür wurden das Minimum, der Mittelwert sowie das Maximum des Wärmebelastungsindex für das Umfeld einer jeden Einrichtung berechnet. Ein Ausschnitt der Karte ist in Abbildung 28 zu sehen. Die vollständige Karte und die dazugehörige Übersichtstabelle wurden der Stadt Chemnitz übergeben. Zweck dieser Analyse ist es, die Stadt Chemnitz und die weiteren Träger sozialer Einrichtungen bei der Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen zu unterstützen und ein mögliches Beispiel für die praktische Anwendung des Wärmebelastungsindex aufzuzeigen.

4.4 Exkurs: Verschattungsanalyse im Stadtgebiet von Chemnitz

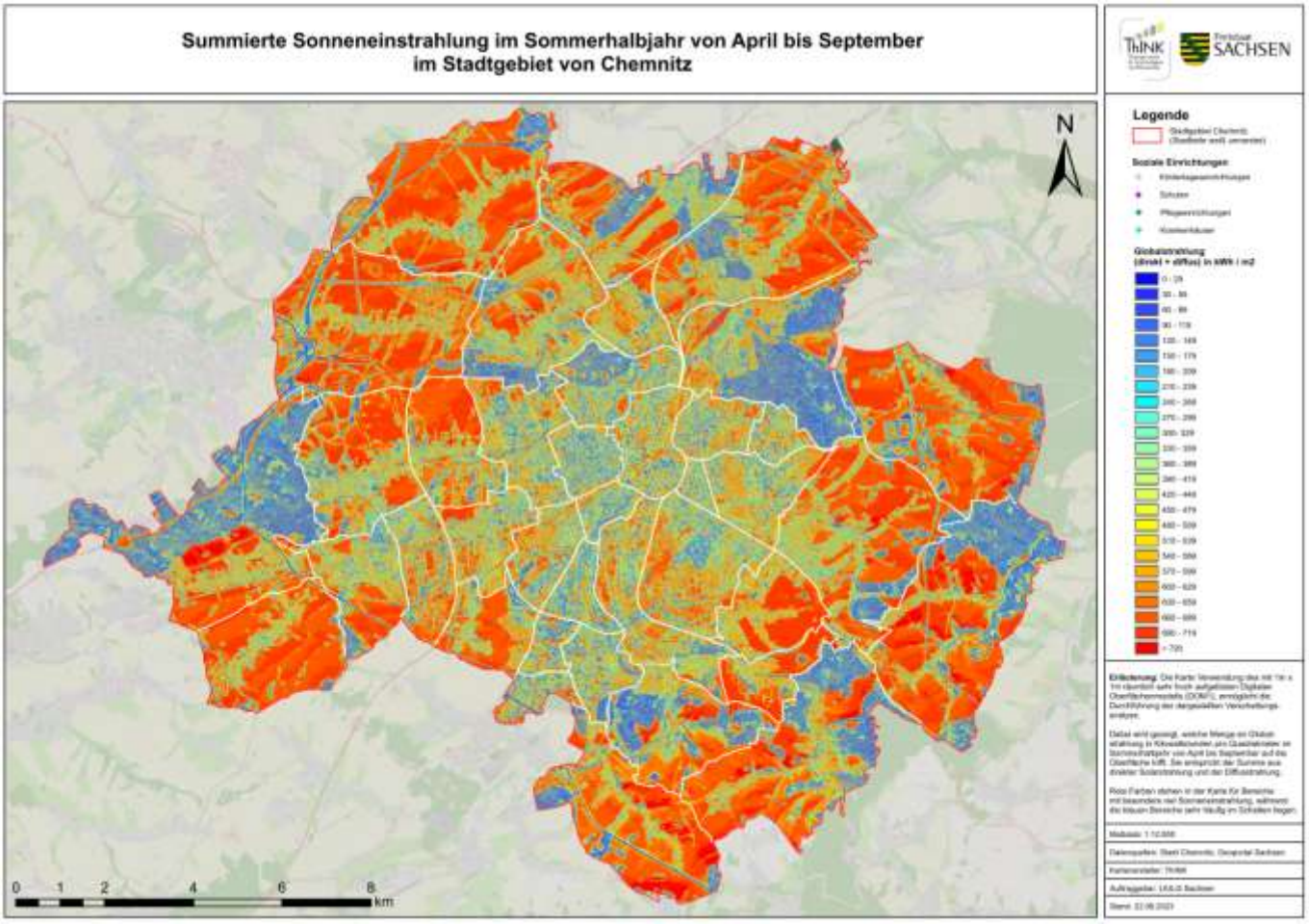


Abbildung 29: Summierte Sonneneinstrahlung im Sommerhalbjahr (Apr- Sep.) als Ergebnis der Verschattungsanalyse im Stadtgebiet von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

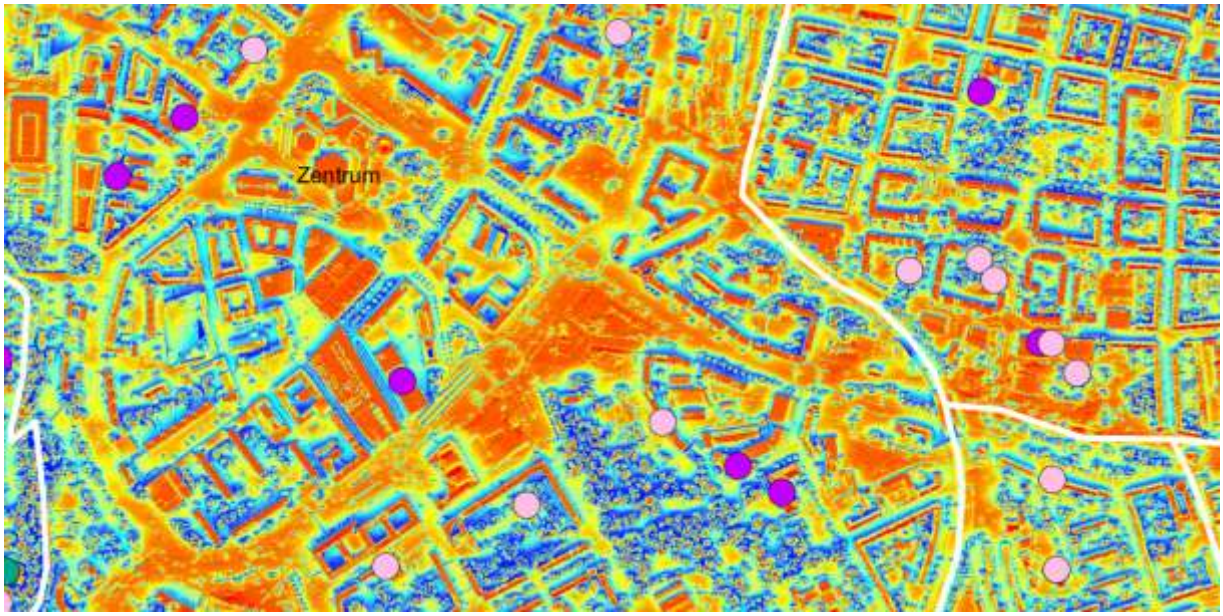


Abbildung 30: Vergrößerter Ausschnitt der Karte zur Verschattungsanalyse im Bereich des Stadtzentrums von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

Unter Verwendung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM1) mit einer räumlichen Auflösung von 1 m x 1 m ist es mit Hilfe der Software ArcGIS möglich, eine sehr detaillierte Verschattungsanalyse durchzuführen (Abbildung 29, vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 30). Hierfür wird für das Sommerhalbjahr von April bis September berechnet, wie viel Sonneneinstrahlung für jede Rasterzelle zu erwarten ist. Blaue Farben stehen dabei für tagesüber praktisch permanent verschattete Bereiche, während rote Farben auf eine weitgehend dauerhafte Sonneneinstrahlung hinweisen.

Die sehr hohe räumliche Auflösung ermöglicht nun – im Gegensatz zu den Satellitendaten – auch Aussagen hinsichtlich der Wirkung von einzelnen Bäumen. Weiterhin werden sehr anschaulich auch Unterschiede zwischen Nord- und Südfassaden sichtbar.

So zeigt die Analyse, dass vor allem Südfassaden und Dachflächen erheblicher Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind und sich entsprechend aufheizen können. Aber auch belebte öffentliche Bereiche, wie z. B. das Umfeld der Bahnhofstraße erhalten überdurchschnittlich viel Sonneneinstrahlung. Dort, wo sich viele Bäume befinden, ist die Sonneneinstrahlung wesentlich geringer und damit die Aufenthaltsqualität an heißen Tagen entsprechend höher. Selbst der schattenspendende Effekt einzelner Bäume ist z. B. im Bereich des Stadthallenparks oder der Straße der Nationen sichtbar.

Die Verschattungsanalyse soll der Stadt Chemnitz dabei helfen, zielgerichtete Maßnahmen zur Verschattung in besonders überwärmten Bereichen zu ergreifen.

Die Karte kann beispielsweise genutzt werden, um verschattete Schulwege zu planen, oder Bereiche zu identifizieren, an denen besonders dringend Maßnahmen zur Verschattung ergriffen werden sollten. Wir empfehlen, diese Karte gemeinsam mit dem Wärmebelastungsindex zu verwenden.

4.5 Exkurs: Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Stadtteilebene in Chemnitz

Um die besonders stark von Wärmebelastung betroffenen Stadtteile von Chemnitz zu identifizieren, wurden Daten zur Altersstruktur sowie zur Anzahl der sozialen Einrichtungen in den Chemnitzer Stadtteilen berücksichtigt. Dabei erhalten der mittlere Wärmebelastungsindex jedes Stadtteils sowie ein hier zusätzlich herangezogener sozialer Indikator jeweils eine Gewichtung von 50 %. In den sozialen Indikator fließen dabei die absolute und relative Anzahl der unter 6-Jährigen Kinder, der über 65-Jährigen Erwachsenen und die Anzahl an sozialen Einrichtungen ein. Das Ergebnis ist in Abbildung 31 zu sehen. Es zeigt, dass in den Stadteilen Kaßberg, Zentrum und Schloßberg eine hohe Wärmebelastung auf viele vulnerable Personengruppen trifft. Dort ist die Betroffenheit von Wärmebelastung am höchsten. In den eher ländlich geprägten Stadtteilen am Stadtrand ist sie entsprechend geringer. Zu beachten sei hierbei, dass die Betroffenheit auf Basis der relativen Unterschiede der einzelnen Stadteile zueinander ermittelt wurde.

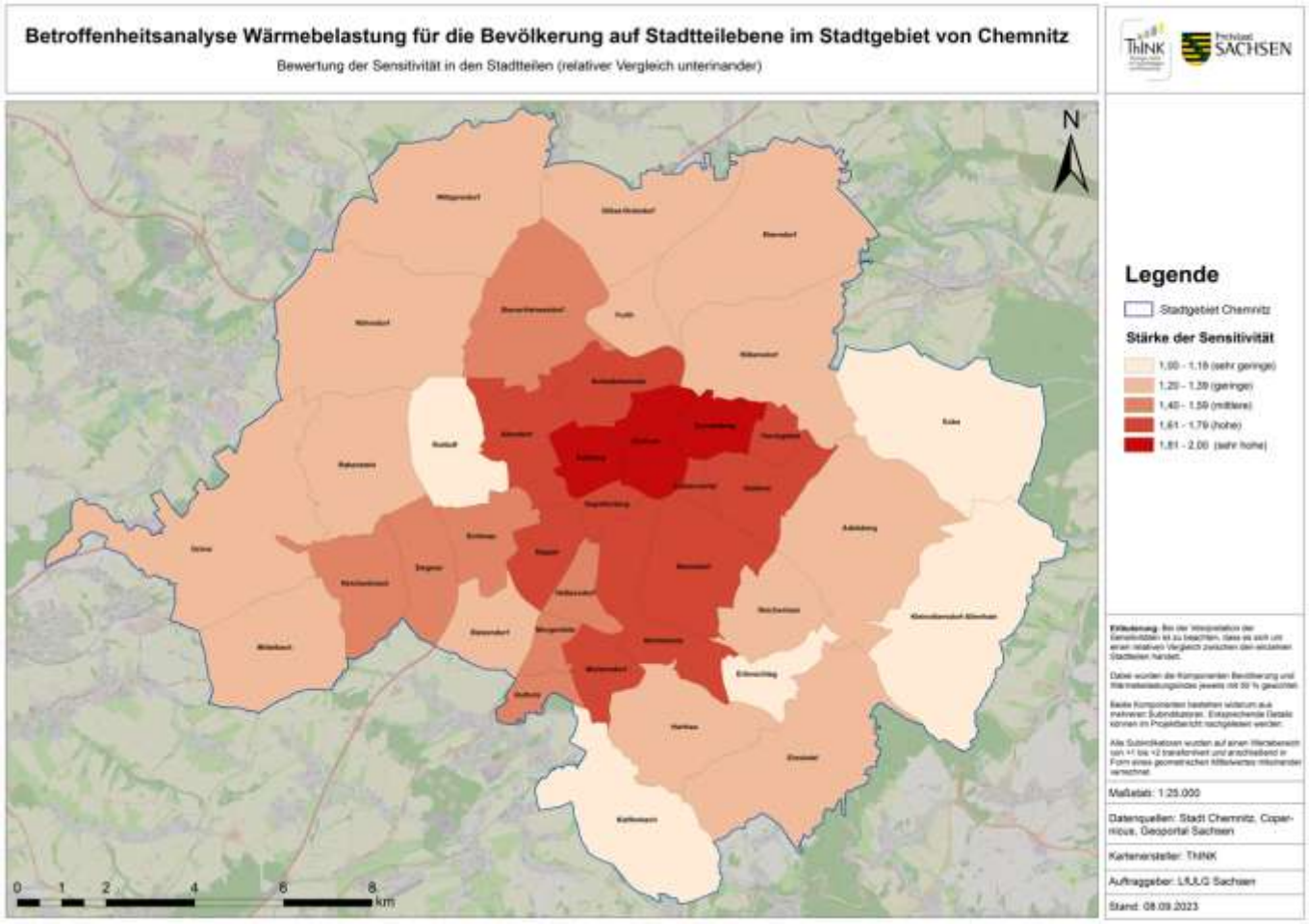


Abbildung 31: Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Stadtteilebene im Stadtgebiet von Chemnitz

Quelle: eigene Erstellung

5 Thermaldrohnenbefliegung von zwei Standorten in Chemnitz

5.1 Daten und Methodik

Zur Schaffung einer Bewertungsgrundlage auf Grundlage von eigenen Messdaten von konkreten Standorten in Chemnitz fanden am 07.07.2023 UAV-Befliegungen durch ThINK statt. Für die Analyse der Wärmebelastung im öffentlichen und nicht öffentlichen Bereich an einer Schule und des Wärmeeintrags über die Dachflächen wurden bei hochsommerlichen Bedingungen UAV-gestützte Befliegungen mit Thermal- und optischem Sensor zum Sonnenhöchststand durchgeführt. Die gemessenen Oberflächentemperaturen geben indirekte Rückschlüsse auf die Aufenthaltsqualität an den Standorten.

Zum Einsatz kamen dabei eine DJI Mavic 2 Enterprise Advanced mit Thermal- (IR 8 - 14 µm) sowie mit RGB-Kamera. Aus ca. 120 Meter Flughöhe wurden die Aufnahmen mit einem vorab programmierten GPS-geleiteten Flugpfad ausgeführt.

Die Oberflächentemperatur entspricht dabei nicht der Lufttemperatur, allerdings wird die Temperatur der bodennahen Luftschicht erheblich durch die Wärmeabstrahlung der Oberflächen beeinflusst.

5.2 Standort A - Zentrum

Das Dach der Stadthalle Chemnitz (Abbildung 32) sticht durch besonders hohe Oberflächentemperaturen hervor. Sowohl der nordöstliche Dachbereich mit dunkler Dachpappe als auch der zentrale Bereich mit Metalldach sind ganztägig gegenüber der Sonne exponiert und erwärmen sich materialbedingt erheblich auf über 70 °C.

Das Kunstwerk auf dem Dach der Stadthalle hat den Effekt, durch farbbedingte Variationen der Albedo kleinräumige Temperaturunterschiede zu erzeugen. Die weißen Bereiche sind deutlich kühler und ein gutes Beispiel für die Wirksamkeit von hellen Oberflächen. Auch das Karl-Marx-Monument ist auf der besonnten Seite besonders heiß, genauso wie der gesamte Bereich um das Monument durch die massiven dunklen Steinplatten.

Als besonders kühl und bioklimatisch wertvoll zeigt sich das Großgrün. Die Blattoberflächen sind deutlich kühler als die Lufttemperatur von 28 °C und tragen neben der Verschattung aktiv zur Abkühlung bei. Die Rasenbereiche waren zum Untersuchungszeitpunkt stark vertrocknet und zeigen besonders im Stadthallenpark durch intensive Nutzung eine nur geringe Vitalität und damit kaum Verdunstungspotenzial.

Besonders kühl ist der Brunnen an der Stadthalle. Durch die Wasserbewegung wird eine starke Erwärmung des Wasserkörpers verhindert und eine spürbare Verdunstungskühlung, zumindest im Nahbereich, an besonders heißen Tagen, aufrechterhalten.

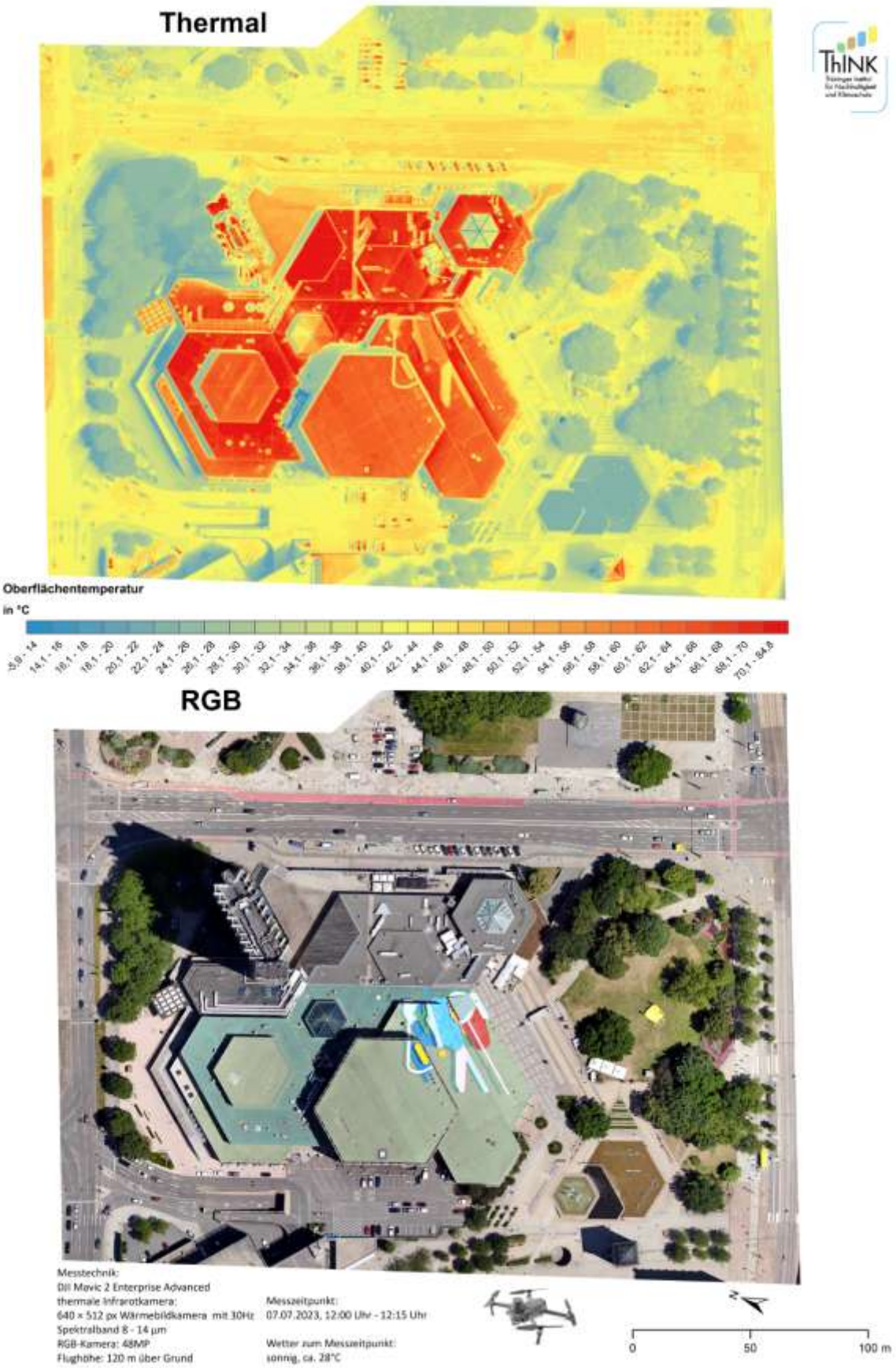


Abbildung 32: Oberflächentemperaturen im Zentrum von Chemnitz bei hochsommerlichen, wolkenfreien Bedingungen

Quelle: eigene Erstellung

5.3 Standort B - Andrépark und Dr.-Wilhelm-André-Gymnasium

Im Vergleich zum Zentrum von Chemnitz zeichnet sich das gesamte Gebiet im Andrépark (Abbildung 33) durch einen hohen Bestand an Großgrün aus. Somit liegen die mittleren Oberflächentemperaturen deutlich niedriger als im Zentrum. Viele verschattete Bereiche erlauben auch an Tagen mit hohen Temperaturen und hoher Sonneneinstrahlung günstige bioklimatische Bedingungen für den Aufenthalt im Freien. Auch zeigen die Rasenflächen im Mittel eher kühle Temperaturen.

Neben den hohen Temperaturen der „dunklen“ Dächer ist für das Untersuchungsgebiet der Innenhof und Sportplatz des Dr.-Wilhelm-André-Gymnasium bioklimatisch kritisch zu bewerten. Der nach Süden exponierte unverschattete und versiegelte Bereich des Schulhofes dürfte bei windschwachen Verhältnissen einen erheblichen „Wärmestau“ verzeichnen. Der Kunststoffbelag des Sportplatzes erwärmt sich auf kritische 65 °C und sorgt im Hochsommer für bioklimatisch bedenkliche Bedingungen.

Das helle Dach am südöstlichen Rand des Untersuchungsgebietes ist ein weiteres gutes Beispiel für den erheblichen Stadtklimaeffekt der Albedo.

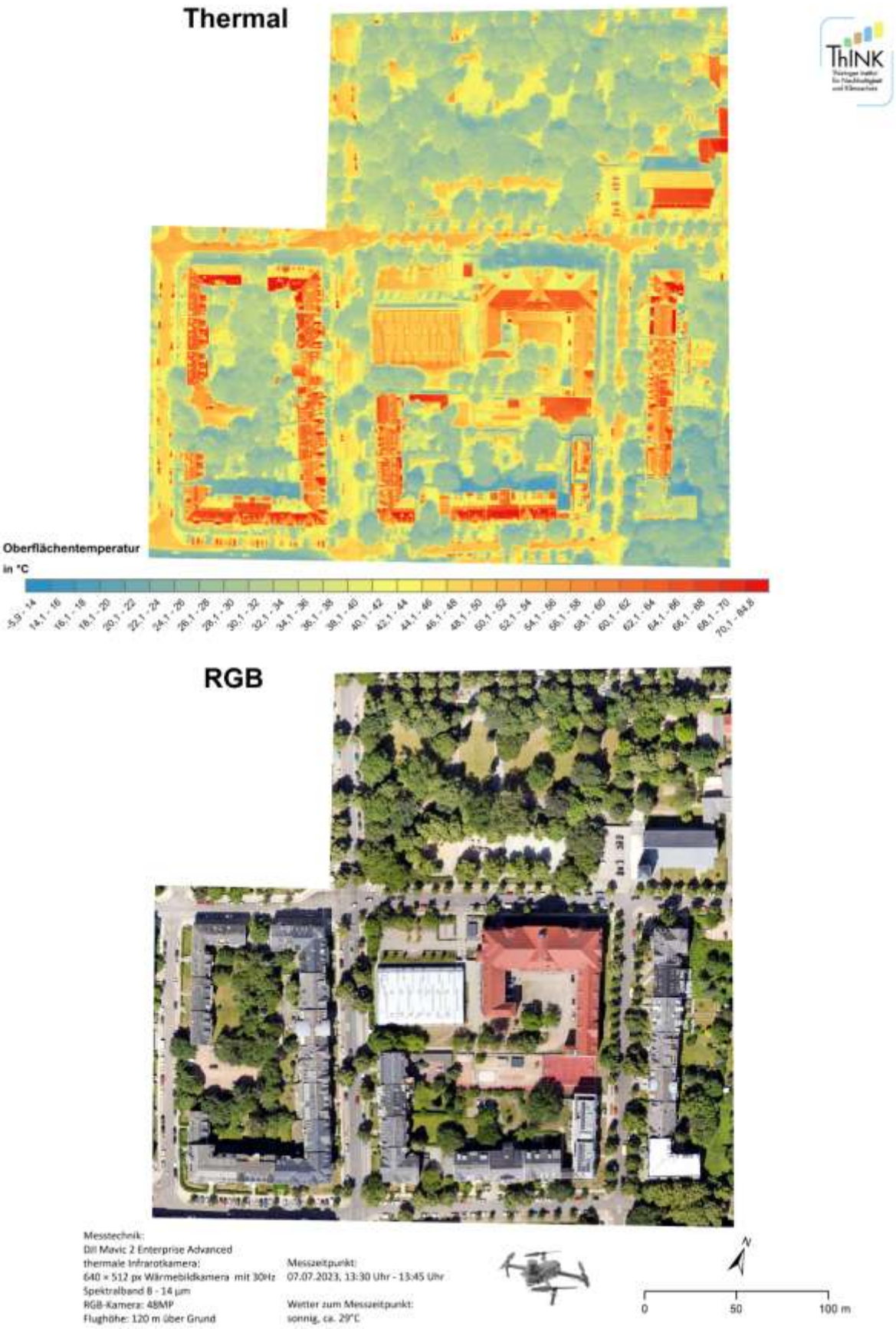


Abbildung 33: Oberflächentemperaturen Andrépark und Umgebung bei hochsommerlichen, wolkenfreien Bedingungen

Quelle: eigene Erstellung

6 Berechnung des Wärmebelastungsindex für ganz Sachsen

Im Folgenden soll der von ThINK entwickelte Wärmebelastungsindex, welcher in Kapitel 4 für das Stadtgebiet von Chemnitz vorgestellt wurde, hinsichtlich einer Übertragbarkeit auf ein größeres Untersuchungsgebiet, hier das Bundesland Sachsen, untersucht werden.

Dazu sollen zunächst mögliche Herausforderungen bei der Übertragung der Methodik auf ein größeres Gebiet zusammengestellt und anschließend eine erste Version des Wärmebelastungsindex für das Land Sachsen präsentiert werden. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse des Wärmebelastungsindex diskutiert und mit den Modellierungen zum Städtischen Hitzeinseleffekt nach KUTTLER (1997) verglichen werden.

6.1 Herausforderungen bei der Übertragung der Methodik von einer Stadt oder Kommune auf ein gesamtes Bundesland

Bei der Übertragung der Methodik zur Berechnung des hier vorgestellten Wärmebelastungsindex auf ein größeres Untersuchungsgebiet treten verschiedene Herausforderungen auf, die sich im Wesentlichen in drei Themenfelder unterteilen lassen:

- Beschaffung geeigneter Fernerkundungsdaten
- Umgang mit Bewölkung
- Verarbeitung und Aufbereitung größerer Eingangsdatenmengen

Auf diese Herausforderungen soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

6.1.1 Beschaffung geeigneter Fernerkundungsdaten

In den Wärmebelastungsindex fließen vier Eingangsparameter ein (vgl. Kapitel 4.1). Bei zweien davon handelt es sich um fernerkundungsbasierte Satellitendaten, die eine „Momentaufnahme“ eines einzigen Aufnahmezeitpunkts darstellen. Dies sind zum einen die Landsat-8- und Landsat-9-Daten, aus denen die Landoberflächentemperatur abgeleitet wird, sowie die Sentinel-2-Daten zur Ableitung des NDVI. Die Landsat-8/9-Satelliten erreichen gemeinsam eine temporale Auflösung von acht Tagen, während diese bei den Sentinel-2-Daten fünf Tage beträgt. Für die Berechnung des Index geeignete Eingangsdaten müssen während des gewählten Sommerzeitraums aufgenommen worden sein und weitere Kriterien wie Wolkenfreiheit, möglichst hohe Lufttemperaturen und Trockenheit, erfüllen (vgl. Kapitel 4.1). Dadurch liegt pro Jahr nur eine begrenzte Anzahl potenziell für den Index verwendbarer Satellitenaufnahmen vor.

Bei der Berechnung des Wärmebelastungsindex für eine Stadt oder Kommune reicht meist jeweils eine einzelne Landsat- oder Sentinel-Szene zur Abdeckung des gesamten Untersuchungsgebiets aus. Hier passende Aufnahmen zu finden, welche die erforderlichen Qualitätskriterien erfüllen, stellt in der Regel kein Problem dar. Zur vollständigen Abdeckung größerer Untersuchungsgebiete werden jedoch oft mehrere Aufnahmen benötigt. Im vorliegenden Beispiel von Sachsen sind dies, abhängig von der genauen Datenlage zum gewählten Zeitpunkt, mindestens vier Landsat- und sechs Sentinel-Szenen, die benötigt werden. Neben dem erhöhten Prozessierungsaufwand durch die

Verrechnung mehrerer Szenen ergibt sich eine Herausforderung insbesondere aus der erforderlichen Wolkenfreiheit der Daten. Geringe Wolkenbedeckungen können dabei im Zweifelsfall toleriert werden, jedoch sollten diese immer als unbrauchbare Werte behandelt werden und produzieren damit Datenlücken im Ergebnis.

Idealerweise werden zur Berechnung von Landoberflächentemperatur und NDVI jeweils nur Daten eines einzigen Aufnahmetages verwendet. Falls dies nicht mit weitestgehend wolkenfreien Szenen möglich ist, sollten möglichst wenig verschiedene und möglichst nah beieinanderliegende Aufnahmezeitpunkte je Indikator kombiniert werden.

Aufgrund der mehrtägigen Aufnahmefrequenz der Satellitendaten kann es in regnerischen und vielbewölkten Sommern jedoch durchaus dazu kommen, dass für den kompletten herangezogenen Sommerzeitraum für einen oder beide Eingangsdatensätze (Landsat und Sentinel) auch bei Kombination mehrerer Aufnahmezeitpunkte keine annähernd wolkenfreie Abdeckung des Untersuchungsgebiets möglich ist. Für einen solchen Fall wurden verschiedene Lösungsansätze in Betracht gezogen, die jedoch alle zu einer Qualitätsminderung im Endprodukt, dem Wärmebelastungsindex, führen:

Tabelle 2: Lösungsansätze bei unzureichender Datenlage und ihre potenzielle Nachteile

Lösungsansatz	Potenzielle Nachteile
Verwendung teilweise bewölkter Aufnahmen	erhöhter Aufwand durch anspruchsvollere Wolkenerfassung je nach Bedeckungsgrad massive Datenlücken
Verwendung von Landsat-Daten zur Ableitung des NDVI	nur bei fehlender Sentinel-Datenlage möglich, nicht umgekehrt bei fehlenden Landsat-Daten reduziert räumliche Auflösung des NDVI von 10 x 10 m auf 30 x 30 m
Verwendung von Daten, die Qualitätskriterien nicht vollständig erfüllen (hinsichtlich Temperatur, Trockenheit)	schlechtere Abbildung räumlicher Muster und Heterogenität (z. B. bei Landoberflächentemperatur an nicht so heißen Tagen) Über- oder Unterschätzung von Werten (z. B. bei NDVI in feuchten Perioden)
Verwendung von Daten (etwas) außerhalb des empfohlenen Sommerzeitraums	schlechtere Abbildung räumlicher Muster und Heterogenität (z. B. bei Landoberflächentemperatur an nicht so heißen Tagen) Über- oder Unterschätzung von Werten (z. B. bei NDVI in feuchten Perioden) NDVI-Werte können trockenheits- und hitzebedingte Vitalitätsmuster des (Hoch-) Sommers nicht ausreichend abbilden

Quelle: eigene Erstellung

Aufgrund der potenziellen Nachteile auf die Datenqualität des resultierenden Indikators sollten die in Tabelle 2 genannten Lösungsansätze bei unzureichender Datenlage nur unter Hinweis auf resultierende Datenlücken oder weniger aussagekräftigen Werte angewandt und die Nachteile durch Abwägung der verschiedenen Lösungsansätze für die konkret vorliegende Datenlage minimiert werden.

Tatsächlich konnten zum Zeitpunkt der Erstellung eines ersten Entwurfs des Wärmebelastungsindex für ganz Sachsen (Anfang September 2023) für die Sommerzeiträume 2022 und 2023 keine weitestgehend wolkenfreien Sentinel-2-Szenen beschafft werden. Deshalb wurde sich zunächst für einen der oben genannten Lösungsansätze entschieden, gering bewölkte Landsat-Daten aus dem Sommer 2022 zu verwenden und daraus auf Kosten der räumlichen Auflösung neben der Landoberflächentemperatur auch den NDVI zu abzuleiten. Glücklicherweise wurden wenige Tage später geeignete nahezu wolkenfreie Sentinel-2- und Landsat-Aufnahmen generiert, sodass im Rahmen dieses Berichts ein Wärmebelastungsindex mit der ursprünglichen, auf Landsat und Sentinel basierenden Methodik und Datengrundlage für Sachsen mit aktuellen Daten aus dem Jahr 2023 präsentiert werden kann.

Bei einer Kombination mehrerer Aufnahmezeitpunkte für einen der Indikatoren sollte des Weiteren berücksichtigt werden, dass es hier trotz jeweils getrennt nach Aufnahmezeitpunkt erfolgender Normierung der Daten (mehr zur

Normierung in Kapitel 4.2) zu einem in den Werten des Wärmebelastungsindex erkennbaren „Sprung“ am Übergang der Datensätze verschiedener Aufnahmezeitpunkte kommen kann. Hier sind möglichst ähnliche Ausgangsbedingungen zum Aufnahmezeitpunkt in Temperatur und Trockenheit sowie zeitliche Nähe der verwendeten Daten besonders wichtig, um diese Unterschiede zu minimieren.

6.1.2 Umgang mit Bewölkung

Bei einem größeren Untersuchungsgebiet wie Sachsen ist eine vollständig wolkenfreie Abdeckung mit den benötigten Satellitendaten nicht immer gegeben. In solchen Fällen muss eine Erfassung bewölkter Teilbereiche stattfinden, um diese anschließend im betroffenen Indikator (Landoberflächentemperatur bzw. NDVI) als Fehlwerte bzw. Datenlücke kennzeichnen zu können. Bei Fehlwerten in einem der vier Eingangsindikatoren für den Wärmebelastungsindex erhält dieser an den entsprechenden Stellen auch einen Fehlwert. Bei den Landsat-Daten bzw. der daraus abgeleiteten Landoberflächentemperatur ist die vollständige Entfernung bewölkter Bereiche besonders relevant, da diese oft außerhalb des eigentlichen Temperatur-Wertebereichs liegen, was sich durch die Normierung der Daten am Ende auf sämtliche Werte des Indikators Landoberflächentemperatur massiv auswirken kann. Beim NDVI entstehen bei unvollständiger Wolkendetektion „nur“ lokal verfälschte Werte in den bewölkten Bereichen, da der Wertebereich des NDVI sich (bei der hier durchgeführten Methodik und Datenlage) dadurch nicht verändert.

Für die Wolkenerfassung in Landsat- und Sentinel-Daten werden hier die entsprechenden Metadaten der jeweiligen Aufnahmen verwendet. Bei den Landsat-8- und Landsat-9-Daten liegen diese Informationen im *Quality Assessment Band*, bei den Sentinel-2-Daten in der *Scene Classification*. Enthalten sind hier jeweils Informationen zum Auftreten von Wolken mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit, dem Auftreten von Cirrus-Wolken und Wolkenschatten. Da im Rahmen der hier durchgeführten Methodik nur wolkenfreie oder annähernd wolkenfreie Satellitenaufnahmen verwendet werden sollen, wird die in den Metadaten jeweils enthaltene Klassifikation von Wolken und Wolkenschatten als ausreichend erachtet. Gegebenfalls kann hier bei Bedarf eine andere Wolkenerfassung der Wahl verwendet werden. Bei der vorliegenden geringen Bewölkung und einem Untersuchungsgebiet der Größe von Sachsen ist zudem eine visuelle Validierung der durchgeführten Wolkenerfassung möglich.

Bei der aus den Landsat-Daten abgeleiteten Landoberflächentemperatur lassen sich Ausreißer-Werte, die z. B. bei nicht vollständig entfernten Wolken auftreten, im Histogramm identifizieren und über Grenzwerte entfernen. Das Entfernen von Ausreißern bietet sich bei der Prozessierung des Indikators für die Landoberflächentemperatur außerdem auch unabhängig von eventueller Bewölkung an, da auch beispielsweise Feuer bzw. Brände oder stark reflektierende Oberflächen außergewöhnlich hohe oder niedrige Werte außerhalb des eigentlichen Wertebereichs erzeugen können. Ausreißer-Werte in den Eingangsdatensätzen haben aufgrund der durchgeführten Normierung aller Eingangsindikatoren (vgl. Kapitel 4.2) bei der Berechnung des Wärmebelastungsindex Einfluss auf alle Werte im jeweiligen normierten Eingangsindikator und sollten deshalb bei Bedarf und unter Berücksichtigung inhaltlicher Implikationen auf den Wertebereich der Daten entfernt bzw. angeglichen werden.

6.1.3 Verarbeitung und Aufbereitung größerer Eingangsdatenmengen

Allein das erhöhte benötigte Datenvolumen für die Abdeckung größerer Untersuchungsgebiete wie Sachsen bringt Herausforderungen in der Prozessierung mit sich. Natürlich ist bei größeren Datenmengen generell mit etwas längeren Verarbeitungszeiten zu rechnen. Davon abgesehen treten jedoch bei der Erstellung des Wärmebelastungsindex für größere Gebiete weitere Herausforderungen auf, auf die im Weiteren genauer eingegangen werden soll.

So werden zur Abdeckungen größerer Gebiete mit Satellitendaten jeweils mehrere Einzelaufnahmen benötigt. Dies kann nicht nur die Datenbeschaffung geeigneter Aufnahmen erschweren (vgl. Kapitel 6.1.1), sondern bringt auch

zusätzliche Prozessierungsschritte mit sich, da Datensätze beispielsweise zunächst nach Aufnahmezeitpunkt getrennt vorprozessiert und normiert werden müssen, bevor sie zu einem Datensatz für das gesamte Untersuchungsgebiet zusammengeführt werden können.

Bei der Berechnung der Gebäudevolumendichte, welche auf LOD-Daten (3D-Gebäudedaten) beruht (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2), handelt es sich um den einzigen der vier Eingangsindiktoren, der auf Vektordaten (vorliegend im Shapefile-Format) basiert. Dies bringt wiederum andere Herausforderungen mit sich:

Für eine Abdeckung Sachsens werden hier mehrere Tausend einzelne LOD-Shapefiles benötigt. Diese sind in ihrer Summe verhältnismäßig rechenintensiv (zumindest in Relation zu den anderen drei Rasterdaten-basierten Eingangsindikatoren des Wärmebelastungsindex). Sie müssen für die weitere Verarbeitung zusammengeführt werden, was jedoch aufgrund der Größenbegrenzung von Shapefile-Daten (2 GB) nur aufgeteilt auf mehrere Datenpakete möglich ist, die wiederum einzeln vorprozessiert und in hochaufgelöste Raster transformiert werden müssen, bevor eine Zusammenführung der Gebäudevolumendichte-Daten für ganz Sachsen erfolgen kann.

6.2 Ergebnisse für Sachsen

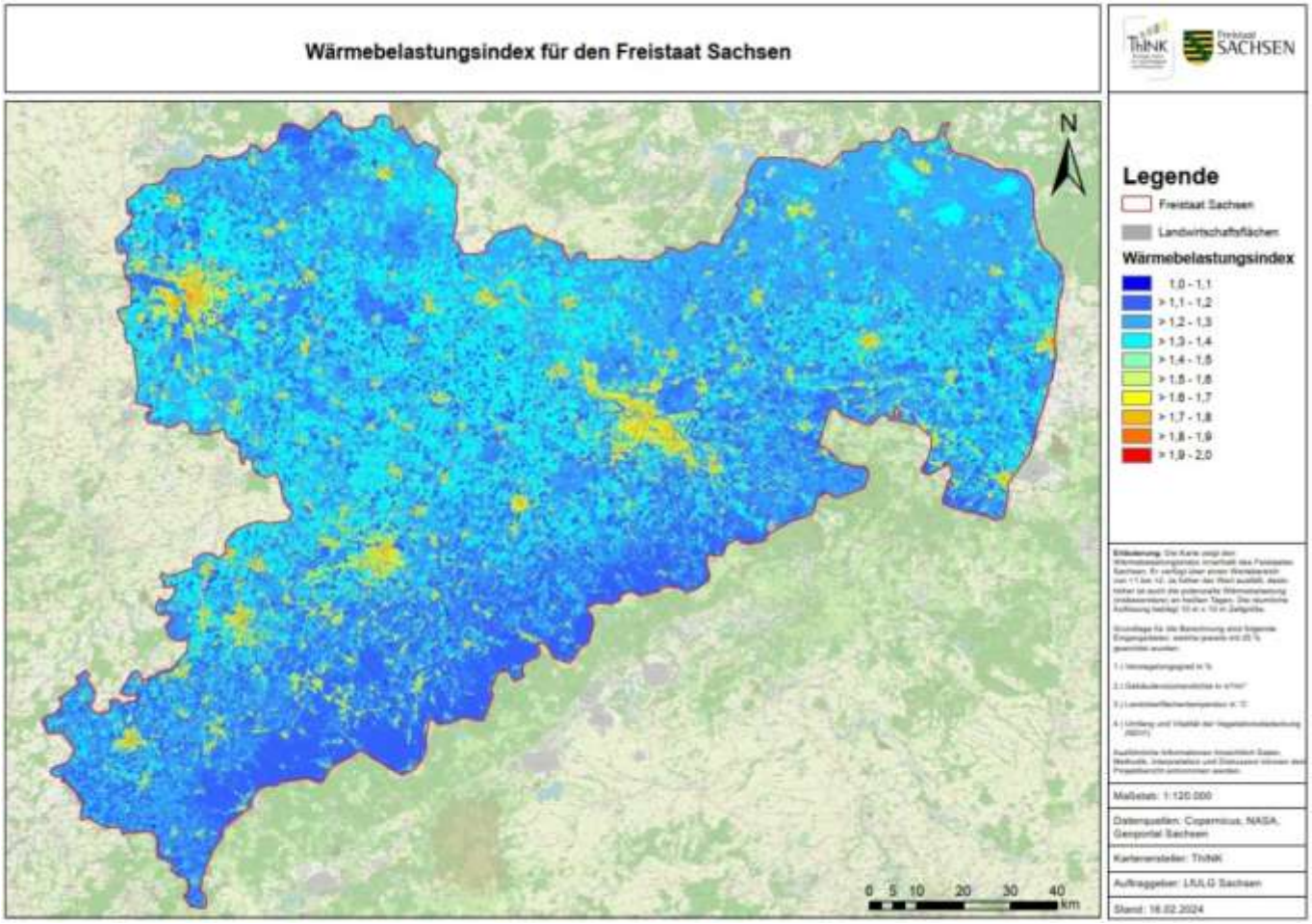


Abbildung 34: Ermittelter Wärmebelastungsindex für Sachsen

Quelle: eigene Erstellung

Abbildung 34 zeigt den Wärmebelastungsindex für ganz Sachsen, welcher unter Anwendung der in Kapitel 4 beschriebenen Methodik und unter Berücksichtigung der in Kapitel 6.1 aufgeführten Herausforderungen bei der Übertragung der Methodik auf ein größeres Untersuchungsgebiet berechnet wurde. Für eine detaillierte Betrachtung des Wärmebelastungsindex wird die Verwendung des hochaufgelösten PDFs empfohlen. Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Wärmebelastungsindex Sachsens aus dem Stadtgebiet von Chemnitz:

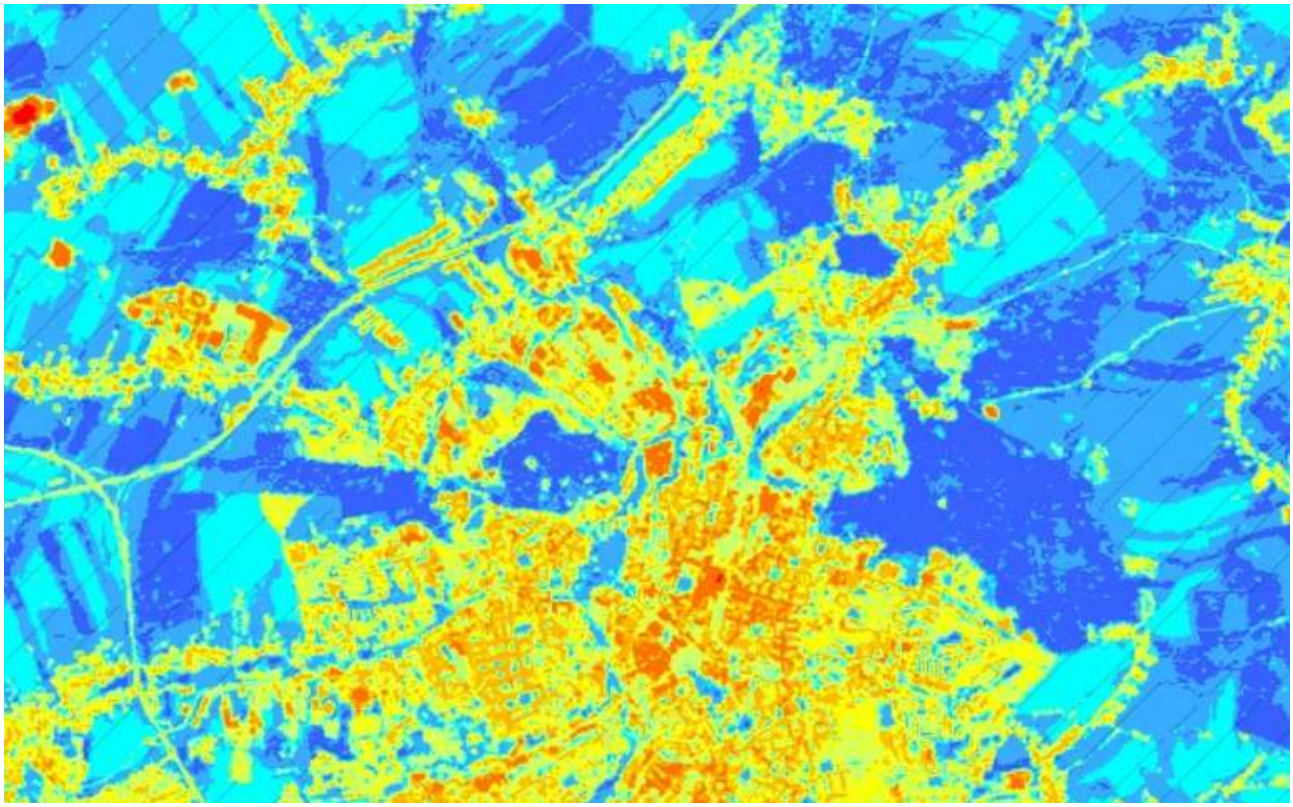


Abbildung 35: Ausschnitt aus dem Wärmebelastungsindex Sachsens für einen Teil des Stadtgebiets von Chemnitz mit Schraffur von Landwirtschaftsflächen

Quelle: eigene Erstellung

Für eine allgemeine Einordnung der Ergebnisse des Wärmebelastungsindex und Interpretation der verschiedenen auftretenden Werte sei auf Kapitel 4.3.5 verwiesen. In diesem Kapitel soll vor allem auf Besonderheiten und Unterschiede im Wärmebelastungsindex eingegangen werden, die beim für ganz Sachsen ermittelten Index im Gegensatz zum Index einer einzelnen Stadt oder Kommune (z. B. Chemnitz) auftreten.

Für den hier gezeigten Wärmebelastungsindex Sachsens wurden Landsat-8/-9-Szenen vom 07. und 08.09.2023 zur Ableitung der Landoberflächentemperatur verwendet, sowie Sentinel-2-Aufnahmen vom 10.09.2023. Im Aufnahmezeitraum vom 7. bis 10. September 2023 lagen ausreichend hohe Lufttemperaturen, Sonnenstunden sowie kein Niederschlag vor (beispielsweise an DWD-Wetterstation Chemnitz: Tagesmaximaltemperaturen zwischen 27,4°C und 29,1°C; 12,2 bis 12,5 Sonnenstunden; 0 mm Niederschlag).

Bei der Betrachtung des Index im Überblick des gesamten Untersuchungsgebiets Sachsen heben sich die größten Städte Leipzig, Dresden (mit Freital), Chemnitz, Zwickau und Plauen deutlich von ihrem Umland ab. Auch etwas kleinere Städte wie Görlitz, Freiberg oder Bautzen, sind (wenn auch flächenmäßig deutlich kleiner) als überwärmte Gebiete innerhalb Sachsens bereits im gesamtsächsischen Kartenüberblick eindeutig auszumachen. Die höher liegenden Bereiche des Erzgebirges nahe der Tschechischen Grenze weisen zudem niedrigere Werte auf als ländliche Regionen im Rest des Landes. Landwirtschaftlich genutzte Flächen weisen im Vergleich untereinander sehr heterogene Werte (von sehr niedrig bis mittel) auf. Bei hochaufgelöster Betrachtung einzelner Teilflächen lassen sich Siedlungsgrenzen, unterschiedliche Landnutzungen sowie Hitze-Hotspots oder Grünflächen innerhalb von

Städten ebenso ausmachen wie beim Wärmebelastungsindex für ein kommunales Untersuchungsgebiet (vgl. Abbildung 26).

Die Landoberflächentemperatur musste zur vollständigen Abdeckung des Untersuchungsgebiets aus Landsat-Aufnahmen zweier Aufnahmetage zusammengestellt werden (07. und 08.09.2023). Die Satellitendaten beider Aufnahmen wurden separat vorprozessiert und normiert, um Temperaturunterschiede zwischen beiden Aufnahmezeitpunkten anzugleichen (vgl. Kapitel 6.1.1). Der Übergang der Daten beider Aufnahmezeitpunkte ist in der normierten Landoberflächentemperatur (überwiegend außerhalb von Siedlungen) teilweise etwas erkennbar, die Wertedifferenzen am Übergang beider Landsat-Szenen liegen hier jedoch selbst in den gut erkennbaren Bereichen bei deutlich unter 0,1 normierter Landoberflächentemperatur (gesamter Wertebereich 1 bis 2). Im klassifizierten Wärmebelastungsindex sind die entsprechenden Differenzen nicht mehr zu erkennen (vgl. Abbildung 36).

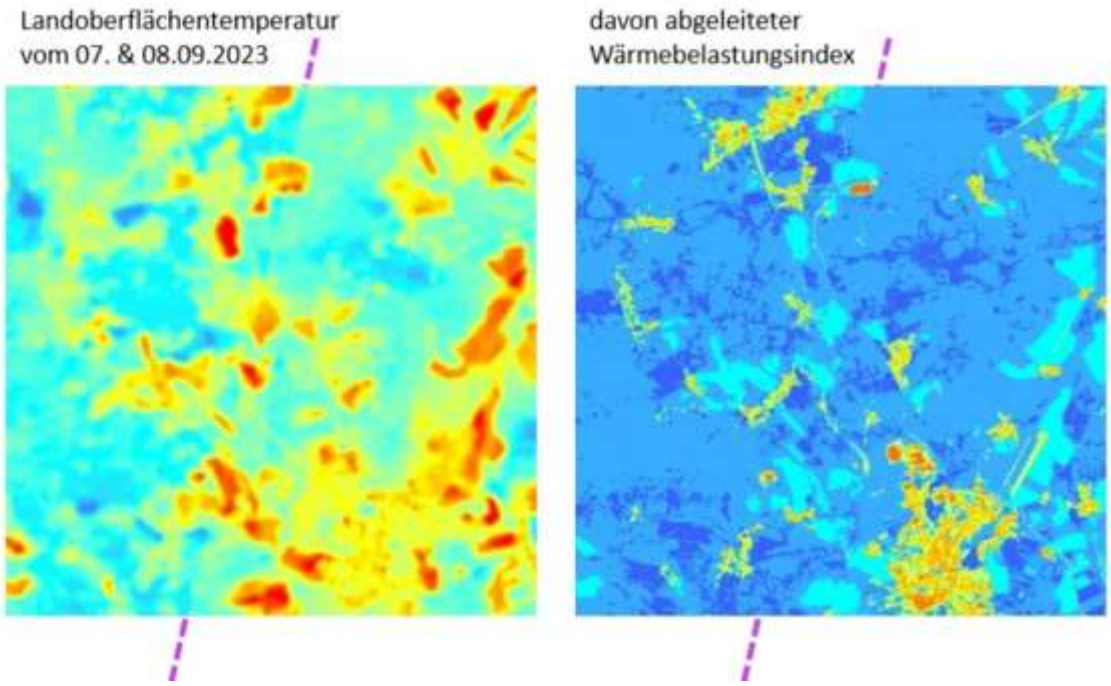


Abbildung 36: Normierte Landoberflächentemperatur und Wärmebelastungsindex am Übergang von Landsat-Szenen zweier Aufnahmezeitpunkte

Quelle: eigene Erstellung

Abbildung 37 zeigt den Wärmebelastungsindex von Sachsen (Abbildung 34) und den Wärmebelastungsindex von Chemnitz (Abbildung 26) für einen Ausschnitt im Stadtgebiet von Chemnitz nebeneinandergestellt sowie in Form einer Differenzkarte beider Indizes.

Größere Differenzen zwischen beiden Indizes treten im Stadtgebiet auf flächig nicht auf, sondern fast ausschließlich in schmalen Streifen entlang der Klassengrenzen zwischen eher hohen und eher niedrigen Werten, z. B. am Rand von Grünflächen oder Häuserblöcken. An den Nord- und Ostseiten von Gebäuden liegen dabei eher negative Differenzwerte vor, d. h. die entsprechenden Wärmebelastungswerte im Index von Sachsen sind höher, während an den betroffenen Süd- und Westseiten die Werte des Index von Chemnitz höher sind. Auf den Grünflächen innerhalb des gewählten Ausschitts sind zwischen beiden Indizes zudem leichte Unterschiede zu erkennen, die weitestgehend jedoch unter ± 0,1 liegen und deshalb in der Differenzkarte nicht hervorgehoben werden.

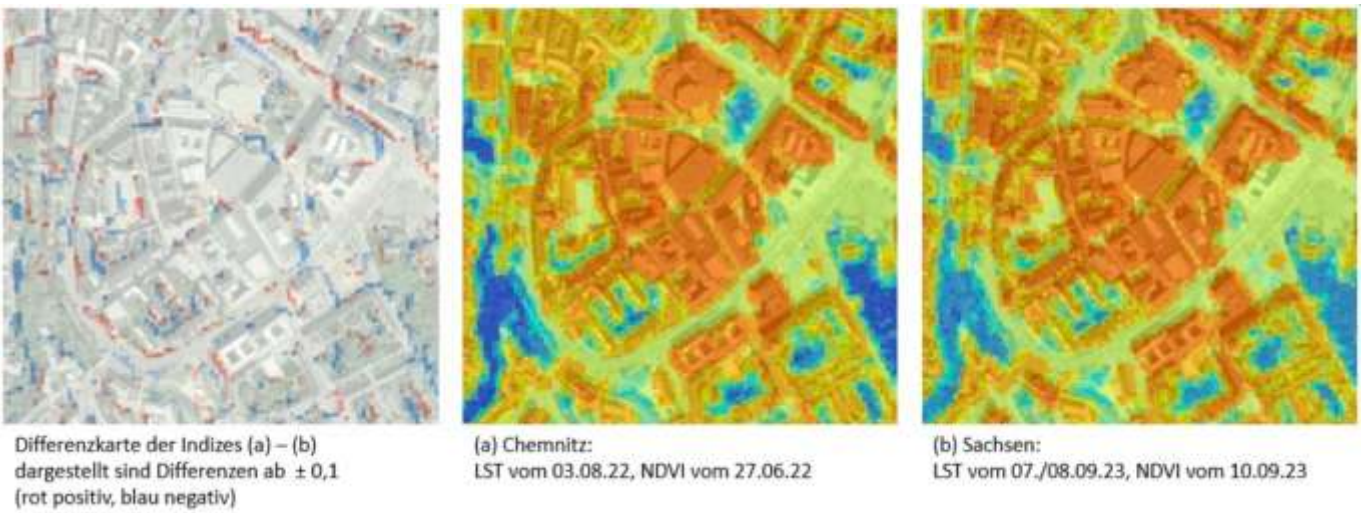


Abbildung 37: Differenzkarte der Wärmebelastungsindizes von Chemnitz und Sachsen

Quelle: eigene Erstellung

6.3 Diskussion der Ergebnisse für Sachsen

Nachfolgend sollen die Ergebnisse zur Entwicklung eines Wärmebelastungsindex für Sachsen (Kapitel 6.2) diskutiert werden. Dabei lässt sich grundsätzlich festhalten, dass sich die Methodik zur Erstellung eines Wärmebelastungsindex für ein Kommunalgebiet oder eine Stadt erfolgreich auf ein größeres Untersuchungsgebiet wie Sachsen übertragen lässt.

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, treten dabei im Vergleich zur Erstellung eines Index für ein kleines Untersuchungsgebiet verschiedene Herausforderungen hinsichtlich Verarbeitungsaufwand, zusätzlich hinzukommender Verarbeitungsschritte und Beschaffung geeigneter Daten auf. Während sich die ersten beiden relativ problemlos in die für den kommunalen Index bestehende Methodik einarbeiten lassen, ist letztere Herausforderung tatsächlich in ihrer Komplexität extrem abhängig von der jeweils bestehenden Datenlage, d. h. von Untersuchungsgebiet und gewünschter Aktualität des zu berechnenden Index. Für Sachsen konnten für das Jahr 2023 geeignete Fernerkundungsdaten beschafft werden, welche die Erstellung eines aussagekräftigen Index ermöglichen. Es sei aber hinsichtlich einer Fortschreibung des Wärmebelastungsindex für Sachsen oder der Übertragung auf ein anderes Untersuchungsgebiet zu erwähnen, dass es bei den hier verwendeten Eingangsdaten im schlechtesten Fall durchaus dazu kommen kann, dass für ein gewünschtes Jahr keine vollständig geeigneten Daten vorliegen. Für einen solchen Fall wurden verschiedene Lösungsansätze aufgeführt, unter Anwendung derer ein brauchbarer Wärmebelastungsindex des entsprechenden Jahres mit etwaigen Qualitätsabstrichen im Einzelfall trotzdem erstellt werden kann (vgl. Kapitel 6.1.1).

Die Betrachtung des Wärmebelastungsindex für den Freistaat Sachsen zeigt, dass inbesondere die größeren Städte sich in ihrer Gesamtheit deutlich als Wärmeinseln von Umland abheben. Aber auch kleinere Ortschaften und Siedlungen zeigen lokal Überwärmung auf und lassen sich deutlich von der nicht bebauten Umgebung differenzieren (vgl. Abbildung 34). Da der Wärmebelastungsindex einen relativen Vergleich der Überwärmung innerhalb eines Untersuchungsgebietes darstellt, ermöglicht die Berechnung des Index von Sachsen einen Vergleich der verschiedenen sächsischen Kommunen untereinander hinsichtlich ihrer Wärmebelastung. Ein quantitativer Vergleich des Wärmeinseleffekts verschiedener Städte erfolgt hier allerdings nicht direkt auf gesamtstädtischer Ebene, sondern kann über die lokal vorliegende Überwärmung an jeder Rasterzelle und die Ausprägung und Dichte überwärmter Bereiche innerhalb eines Stadtgebiets abgeleitet werden. Bei Bedarf können aus dem Index Statistiken zur durchschnittlichen, maximalen oder minimalen Wärmebelastung innerhalb eines ausgewählten Gebiets, z. B.

einer Stadt oder eines Quartiers gewonnen werden. Beispiele für eine solche Auswertung des Wärmebelastungsindex von Chemnitz finden sich in Abbildung 28 (Wärmebelastung im Umkreis sozialer Einrichtungen) oder in Abbildung 31 (Betroffenheitsanalyse verschiedener Stadtteile von Chemnitz von Wärmebelastung). Dieses Vorgehen lässt sich entsprechend zum Vergleich verschiedener sächsischer Städte bzw. Kommunen heranziehen.

Wie in Abbildung 34 ersichtlich, stellt der Wärmebelastungsindex allerdings auch räumliche Muster von Wärmebelastung außerhalb von Städten und Siedlungen dar. Gut zu erkennen ist dies u. a. an den im Allgemeinen etwas niedrigeren Werten außerhalb von Siedlungen im Erzgebirge im Vergleich zu anderen ländlichen Gebieten in Sachsen. Diese resultieren v. a. aus der niedrigeren Landoberflächentemperatur aufgrund der Gebirgslage. Ebenso zu erwähnen ist die Heterogenität der abgebildeten Werte auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Diese ergibt sich aus der unterschiedlichen konkreten landwirtschaftlichen Nutzung sowie dem zeitlichen Wechsel (hinsichtlich Fruchtfolge, Erntezeitpunkt, Brache etc.) von Vegetation. Beides schlägt sich deutlich im NDVI sowie der Landoberflächentemperatur zum Aufnahmezeitpunkt verwendeter Satellitenszenen nieder. Der Wärmebelastungsindex wird nicht als geeignet angesehen, qualifizierte Aussagen zur Überwärmung auf Landwirtschaftsflächen zu treffen, da er immer nur eine „Momentaufnahme“ der Eingangsdaten abbildet und diese auf Landwirtschaftsflächen besonders unbeständig sind. Aus diesem Grund wird seitens ThINK empfohlen, landwirtschaftliche Flächen bei der Verwendung des Wärmebelastungsindex schraffiert darzustellen (vgl. Abbildung 35) oder auszublenden. Nicht landwirtschaftlich genutzte Bereiche außerhalb von Siedlungen, z. B. Wald/ Forst, können mithilfe des Wärmebelastungsindex hinsichtlich ihrer Vitalität bewertet werden, jedoch sollten auch hier bei der Interpretation der Ergebnisse die Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Eingangsdaten berücksichtigt werden. Grundsätzlich wurde der Wärmebelastungsindex allerdings für die Bewertung von Wärmebelastung innerhalb von Städten bzw. Siedlungen entwickelt und liefert vor allem dort aussagekräftige und vergleichbare Daten.

Abbildung 36 verdeutlicht, dass auch die Verwendung von fernerkundungsbasierten Eingangsdaten verschiedener Aufnahmezeitpunkte (zur Abdeckung des Untersuchungsgebiets), hochwertige Ergebnisse liefern kann. Bei entsprechender Vorprozessierung zeigen sich im hier ermittelten Wärmebelastungsindex von Sachsen keine Unterschiede zwischen Eingangsdatensätzen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte (vgl. Abbildung 36). Hier sei jedoch darauf hingewiesen, dass für den hier gezeigten Index Landsat-Aufnahmen von zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit sehr ähnlichen Wetterlagen verwendet werden konnten. Liegen die Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Eingangsdaten (gezwungenermaßen) weiter auseinander und/oder weisen unterschiedliche Wetterbedingungen auf, sind die Übergänge zwischen den verwendeten Satellitenszenen womöglich trotz Normierung stellenweise deutlich stärker erkennbar (vor allem auf Ackerflächen und bei Vegetation).

Im Vergleich des für Sachsen ermittelten Wärmebelastungsindex mit dem Index von Chemnitz (vgl. Abbildung 37) zeigt sich nicht nur, dass der für Sachsen prozessierte Index für das Stadtgebiet von Chemnitz kaum Unterschiede zum kommunal ermittelten Index aufweist. Es wird außerdem deutlich, dass die angewandte Methodik auch hinsichtlich einer Fortschreibung mit Eingangsdaten verschiedener Zeitpunkte stabile Ergebnisse liefert. Beide Indizes basieren nicht nur auf Fernerkundungsdaten verschiedener Jahre (2022 und 2023), sondern auch verschiedener Aufnahmezeitpunkte innerhalb beider Jahre (Juni/August und September/September). Trotzdem sind die Unterschiede (im städtischen Bereich) nur gering bzw. beschränken sich vor allem auf schmale Ränder an Klassengrenzen, überwiegend an den Rändern von Häuserblöcken. Diese resultieren möglicherweise aus der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung, die zu den Aufnahmezeitpunkten der Landsat-Daten Anfang August (Index Chemnitz) im Vergleich zu Mitte September (Index Sachsen) Einfluss auf die Landoberflächentemperatur nimmt. Leichte Differenzen (größtenteils unter ± 0,1) sind zudem im Bereich städtischer Grünflächen zu erkennen. Niedrigere Werte deuten hier auf verminderte Vitalität aufgrund von erhöhtem Trockenstress im Jahr der verwendeten Eingangsdaten oder aber auch auf einen Aufnahmezeitpunkt spät im Sommer hin. Die innerstädtische Heterogenität zwischen stark überwärmten dicht bebauten und hoch versiegelten Hitze-Hotspots mit besonders

hoher Wärmebelastung sowie weniger stark überwärmten begrünten Bereichen wird trotz der geringen Unterschiede in beiden Indizes gleichermaßen sichtbar.

6.4 Vergleich der Ergebnisse mit Modellierungen von Kuttler

Zur Identifizierung städtischer Hitzeinseln (**U**rban **H**eat **I**sland, UHI) (vgl. Kapitel 2.1) und Quantifizierung der städtischen Überwärmung existieren verschiedene Ansätze, welche beispielsweise aus der Einwohnerzahl, der Landnutzung oder Bebauungscharakteristika abgeleitet sind (KUTTLER 1997). An dieser Stelle soll der von ThINK erarbeitete Wärmebelastungsindex mit einer Modellierung des LfULG nach KUTTLER (1997) verglichen werden, die auf baulichen Gegebenheiten, basierend auf Landnutzungs-, Biotop-, und Versiegelungsdaten, beruht (LFULG 2020).

Abbildung 38 stellt beide Ansätze gegenüber. Der städtische Hitzeinseleffekt liegt dabei in einer Auflösung von 1 x 1 km vor, weshalb der Wärmebelastungsindex für diese Darstellung zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls auf 1 km Auflösung heruntergerechnet wurde. Beide Kenngrößen (Wärmebelastungsindex und Hitzeinseleffekt nach KUTTLER) lassen sich quantitativ nicht direkt miteinander vergleichen, da der Wärmebelastungsindex ein einheitsloses Maß lokaler Wärmebelastung, basierend auf verschiedenen normierten Eingangsdatensätzen darstellt, der städtische Hitzeinseleffekt dagegen ein quantitatives Maß urbaner Überwärmung in Form von Temperaturdifferenzen.

Im qualitativen Vergleich wird deutlich, dass der Hitzeinseleffekt nach KUTTLER Städte bzw. Siedlungen eher in ihrer Gesamtheit als Hitzeinseln klassifiziert, wobei ein deutlicher Zusammenhang zwischen Siedlungsgröße und Ausmaß des Effekts (gemessen als Temperaturdifferenz überwärmter Bereiche zum Umland) ersichtlich ist. Der Wärmebelastungsindex von ThINK zeigt (auch bei angeglichener Auflösung) eine räumlich stärkere Differenzierung im Siedlungsbereich, bei der beispielsweise innerstädtische Grünflächen zu lokal vergleichsweise niedrigen Werten im Innenstadtbereich führen können, während beim Hitzeinseleffekt ein Gradient der Überwärmung von Stadtzentren zu städtischen Randbereichen dominiert. Die kleinräumige Heterogenität im ländlichen Bereich beim Wärmebelastungsindex ist darauf zurückzuführen, dass nach der angewandten Methodik auch kleine Siedlungen lokal hohe Wärmebelastungen im Vergleich zum Umland aufweisen können, sofern sie eine ausreichend hohe Bebauungsdichte und Versiegelung, sowie wenig Begrünung aufweisen und sich dies auch in den vorliegenden Landoberflächentemperaturen wiederspiegelt (vgl. Kapitel 4.2).

Zudem wird der Wärmebelastungsindex unabhängig von der vorliegenden Landnutzung (indirekt fließt diese natürlich über den Versiegelungsgrad und die Gebäudevolumendichte teilweise mit ein) für alle Flächen gleichermaßen berechnet. Landwirtschaftliche, zum Aufnahmezeitpunkt der verwendeten Satellitendaten brachliegende Flächen können dadurch vergleichsweise hohe Werte aufweisen. Da diese temporären lokalen Überwärmungen keinen siedlungsbezogenen Wärmeinseleffekt darstellen, wird seitens ThINK dringend empfohlen, Landwirtschaftsflächen bei Verwendung des Wärmebelastungsindex als solche zu kennzeichnen (z. B. durch Schraffur) oder zu maskieren. Eine entsprechende Kennzeichnung ist in Abbildung 35 zu sehen.

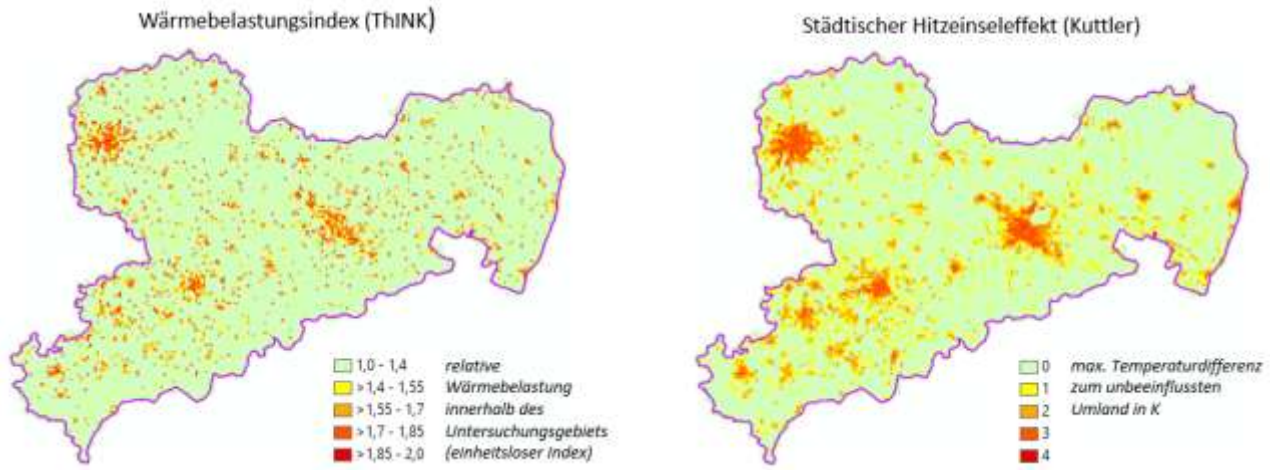


Abbildung 38: Gegenüberstellung des Wärmebelastungsindex von ThINK und des Städtischen Hitzeinseleffekts nach Kuttler

Quelle: eigene Erstellung; Datengrundlage rechts: LfULG

Im Vergleich von Eingangs- und Ausgangsdaten beider Kenngrößen lässt sich festhalten, dass der von ThINK entwickelte Wärmebelastungsindex ein einheitsloses Maß der relativen Wärmebelastung innerhalb des Untersuchungsgebiets liefert und dadurch die Identifikation und vergleichende Einordnung verschiedener überwärmter Bereiche im Untersuchungsgebiet ermöglicht. Durch die hohe Auflösung von 10 x 10 m lassen sich außerdem sehr kleinräumig Hitze-Hotspots und „Klima-Oasen“ innerhalb einer Stadt oder Siedlung differenzieren. Der Wärmebelastungsindex eignet sich deswegen dazu, Aussagen über kleinräumige Hitzeanpassungsbedarfe zu treffen. Die größtenteils fernerkundungsbasierten Eingangsdaten sind frei verfügbar, lassen sich laufend mit aktuellen Daten fortschreiben und umfassen vielfältige Parameter, die zur urbanen Hitzebelastung beitragen, da sie sowohl gemessene Landoberflächentemperaturen als auch Einflüsse auf das Bioklima durch Bebauungscharakteristika (bauliche Dichte und Höhe), Oberflächenversiegelung und Vegetation berücksichtigen.

Das Verfahren nach KUTTLER liefert im Gegensatz dazu ein quantitatives Maß der städtischen Überwärmung als Temperaturdifferenz städtischer Hitzeinseln im Vergleich zum Umland. Während sich Hitzeinseln im Ganzen hiermit gut identifizieren, vom Umland abgrenzen und hinsichtlich ihrer maximalen Ausprägung quantifizieren lassen, ist eine kleinräumige Lokalisierung von Hitze-Hotspots und „Klima-Oasen“ innerhalb einer Stadt oder Siedlung nicht im gleichen Umfang wie beim Wärmebelastungsindex möglich. Inhaltlich fließen beim dargestellten Verfahren nach KUTTLER teilweise ähnliche Aspekte in die Modellierung ein wie bei der Berechnung des Wärmebelastungsindex (Bebauung, Versiegelung, Vegetation im Rahmen von Landnutzung und Berücksichtigung von Biotopen) (LFULG 2020). Der Wärmebelastungsindex von ThINK bietet jedoch den großen Vorteil, dass die Datengrundlage zur Vegetation ebenso wie die miteinfließende Landoberflächentemperatur fernerkundungsbasiert ist (vgl. Kapitel 4.1) und der Index so kurzfristig aktualisiert oder für verschiedene besonders heiße, trockene oder feuchte Jahre gegenüber gestellt werden kann.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in der Einleitung formulierte Zielstellung konnte im Rahmen des Projektes erfolgreich umgesetzt werden. Die von ThINK entwickelte Methodik zur Berechnung eines kommunalen Wärmebelastungsindex konnte dabei dermaßen erweitert werden, dass der Wärmebelastungsindex in der gleichen Qualität und Detailschärfe für das ganze Bundesland Sachsen berechnet werden konnte. Dabei galt es einige Herausforderungen zu überbrücken, die bei kleinen Untersuchungsgebieten nur eine geringe Rolle spielen. In erster Linie handelte es sich dabei um die Suche nach möglichst wolkenfreien Satellitenszenen, denn nur, wenn diese flächendeckend vorliegen, lassen sich die Ergebnisse sinnvoll interpretieren. Die notwendigen Schritte zur Verarbeitung der erhöhten Datenmengen (mehrere Satellitenszenen, mehrere 3D-Gebäude-Datensätze), konnten in das Verfahren implementiert werden, ebenso wie eine Wolkenerfassung.

Verglichen mit dem bisher vorliegenden Produkt nach KUTTLER, ist der nun berechnete Wärmebelastungsindex mit einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m wesentlich detaillierter und beruht auf vier sehr belastbaren Eingangsdatensätzen, welche alle mit dem städtischen Wärmeinseleffekt in Verbindung stehen. Das LfULG Sachsen kann den Index nun allen Gemeinden und Landkreisen in Sachsen zur Verfügung stellen, ohne, dass diese eigenständig entsprechenden Untersuchungen zur Wärmebelastung beauftragen müssen. Durch die gesamtsächsische Untersuchung lassen sich die Ergebnisse des Wärmebelastungsindex außerdem für verschiedene Kommunen direkt miteinander vergleichen.

Die vier Eingangsdaten des Wärmebelastungsindex können in regelmäßigen Zeiträumen fortgeschrieben werden, sodass stets ein aktuelles Produkt vorliegt. Damit ist es möglich, zeitnah bauliche oder landschaftliche Veränderungen abzubilden. Das vorliegende Projekt soll zeitnah in die zweite Phase gehen.

Ein weiterer Aspekt, der innerhalb dieses Berichts zwar nicht vertiefend betrachtet wurde, aber viel Potenzial bietet, ist die Verwendung der vier Eingangsindikatoren des Wärmebelastungsindex für weitere Fragestellungen. Beispielsweise lassen sich aus der Landoberflächentemperatur und insbesondere dem NDVI flächendeckende Aussagen zur Vitalität von Grünflächen treffen. Höhere Landoberflächentemperaturen und geringere NDVI-Werte können bereits frühzeitig Hinweise auf Trockenschäden im Stadtgrün oder in Wald und Forst liefern.

Wir hoffen, mit unseren Untersuchungen spannende Erkenntnisse geliefert und das Potenzial von Fernerkundungsdaten in stadtklimatischen Analysen aufgezeigt zu haben. Weiterhin würden wir uns sehr freuen, wenn die erzeugten Daten vom LfULG sowie den Städten, Gemeinden und Landkreisen als Grundlage für entsprechende Fragestellungen genutzt werden und eine Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung darstellen können.

Literaturverzeichnis

BONAFONI, S., BALDINELLI, G., & P. VERDUCCI (2017): Sustainable strategies for smart cities: Analysis of the town development effect on surface urban heat island through remote sensing methodologies. In: Sustainable Cities and Society, Heft 29, S. 211-218

BRONTO, V. C. & H. BULKELEY (2013): A survey of urban climate change experiments in 100 cities. In: Global environmental change, Heft 23/1, S. 92-102

BRUNS, J. & V. SIMKO (2017): Stable hotspot analysis for intra-urban heat islands. In: GI Forum 2017, Heft 5, S. 79-92

CARMIN, J., DODMAN, D. & E. CHU (2013): Urban climate adaptation and leadership. From Conceptual Understanding to Practical Action. In: OECD Regional Development Working Papers, Heft 2013/26, OECD Publishing

DEUTSCHES KLIMAPORTAL (2020): Stadtklima – Wie wir auch in Zukunft im Klima unserer Städte gut leben können. http://www.deutschesklimaportal.de/DE/Themen/3_Stadtklima/Stadtklima_node.html, 08.07.2020

DWD (2020a): Stadtklima – die Städtische Wärmeinsel. https://opendata.dwd.de/, 21.11.2022

DWD (2020b): Stadtklima. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=10255, 21.11.2022

ESTOQUE, R. C., MURAYAMA, Y., & S. W. MYINT (2017): Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of South-east Asia. In: Science of the Total Environment, Heft 577, S. 349-359

GANDHI, G. M., PARTHIBAN, S., THUMMALU, N. & A. CHRISTY (2015): NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and gis – A case study of Vellore District. In: Procedia Computer Science, Heft 57, S. 1199-1210

GIS RESOURCES (2023): Why does NDVI, NDBI, NDWI Ranges From -1 to 1? https://gisresources.com/ndvi-ndbi-ndwi-ranges-1-1/, 07.11.2023

GRIMMOND, S., XU, T. & A. BAKLANOV (2014): Towards integrated urban weather, environment and climate services. In: WMO Bulletin, Heft 63/1, S. 10-14

GROTHMANN, T., DEHNHARDT, A., WAGNER, J., WELLING, M. (2021): Kosten-Nutzen-Analysen in der Klimaanpassungsplanung und -politik. Wofür sie nutzbar sind und was für ihre Nutzbarkeit wichtig ist. https://www.ioew.de/publikation/kosten_nutzen_analysen_in_der_klimaanpassungsplanung_und_politik, 24.01.2023

GUILLEVIC, P., GÖTTSCHE, F., NICKESON, J., HULLEY, G., GHENT, D., YU, Y., TRIGO, I., HOOK, S., SOBRINO, J.A., REMEDIOS, J., ROMÁN, M. & F. CAMACHO (2018): Land Surface Temperature Product Validation Best Practice Protocol. Version 1.1. In: Best Practice for Satellite-Derived Land Product Validation (p. 58): Land Product Validation Subgroup (WGCV/CEOS)

IMHOFF, M. L., ZHANG, P., WOLFE, R. E. & L. BOUNOUA (2009): Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. In: Remote sensing of environment, Heft 114/3, S. 504-513

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Berlin: IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/IPCC2007-SYR-german.pdf, 14.04.2021

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014a): Klimaänderung 2014. Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/AR5-WGII_SPMgerman.pdf, 14.04.2021

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014b): Climate Change 2014: Impacts, adaption, and vulnerability. Kernbotschaften des Berichts. Yokohama: IPCC https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ipcc_sachstandsbericht_5_teil_2_bf.pdf, 14.04.2021

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021a): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Yokohama: IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1, 17.02.2022

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021b): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge: Cambridge University Press

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2022): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

IPCC DATA DISTRIBUTION CENTRE (2023): Glossary R. https://www.ipcc-data.org/ guidelines/pages/glossary/ glossary_r.html, 15.02.2024

KURMUTZ, U., GUDE, M., MAERCKER, J., KNOPF, D., KNETSCH, S., GEBHARDT, O., KOBER, H., LERM, M., REINHARDT, F., SITTIG, Y. & B. VETTER (2012): Handbuch Klimawandelgerechte Stadtentwicklung für Jena. In: Schriften zur Stadtentwicklung, Heft 3, S. 1-156

KURMUTZ, U., KNOPF, D., MAERCKER, J., KNETSCH, S., DR. MANN, M., BISCHOFF, S., NOZIK, A. (2018): Grüne Klimaoasen im urbanen Stadtraum Jenas. S. 61

KUTTLER, W. (1997): Städtische Klimamodifikation. In: VDI-Berichte, Heft 1330. Düsseldorf: VDI-Verlag, S.87-108

LFULG (2020): Städtischer Hitzeinseleffekt. https://www.klima.sachsen.de/kommunen-24039.html?_cp=%7B%7D, 14.02.2024

LI, Z. L., TANG, B. H., WU, H., REN, H., YAN, G., WAN, Z., ... & J. A. SOBRINO (2013): Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. In: Remote sensing of environment, Heft 131, S. 14-37

MENG, Q., ZHANG, L., SUN, Z., MENG, F., WANG, L., & Y. SUN (2018): Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. In: Remote Sensing of Environment, Heft 204, S. 826-837

MIRZAEI, P. A. (2015): Recent challenges in modeling of urban heat island. In: Sustainable Cities and Society, Heft 19, S. 200-206

PARLOW, E. (2011): Besonderheiten des Stadtklimas. In: Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U. & P. Reuber (Hrsg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. Heidelberg: Spektrum, S. 287-291

RASUL, A., BALZTER, H., SMITH, C., REMEDIOS, J., ADAMU, B., SOBRINO, J., … & Q. WENG (2017): A review on remote sensing of urban heat and cool islands. In: Land, Heft 6/2, 38, S. 1-10

ROMAN, A. & U. TUDOR. (2016): Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. In Landscape archaeology on the northern frontier of the roman empire at porolissum - an interdisciplinary research project, Cluj Napoca: Mega Publishing House

SEOS-PROJECT (2020): Einführung in die Fernerkundung - 1. Physikalische Grundlagen. http://lms.seos-project.eu/learning_modules/remotesensing/remotesensing-c01-p01.de.html, 19.07.2020

STADT JENA (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Stadtbaumkonzept. In: Schriften zur Stadtentwicklung, Heft 7, https://planen-bauen.jena.de/sites/default/files/2019-05/07-B%C3%A4ume_in_Jena_2016_www_0.pdf, 09.12.2022

STEWART, I. D. & T. R. OKE (2012): Local climate zones for urban temperature studies. In: Bulletin of the American Meteorological Society, Heft: 93/12, S. 1879-1900

TEC-SCIENCE (2020): Planck’sches Strahlungsgesetz und Wien’sches Verschiebungsgesetz. https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/temperatur/plancksches-strahlungsgesetz/, 16.07.2020

TOMLINSON, C. J., CHAPMAN, L., THORNES, J. E. & C. BAKER (2011): Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review. In: Meteorological Applications,Heft 18/3, S. 296-306

WENG, Q. (2009): Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Heft 64/4, S. 335-344

ZHOU, D., BONAFONI, S., ZHANG, L. & R. WANG (2017): Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. In: Science of the Total Environment, Heft 628, S. 415-429

ZHOU, D., XIAO, J., BONAFONI, S., BERGER, C., DEILAMI, K., ZHOU, Y., ... & J. A. SOBRINO (2019): Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. In: Remote Sensing, Heft 11/1, S. 48

Herausgeber:
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E- Mail: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren:
Dennis Kehl, Lisa Mastaler, Jakob Maercker
Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz GmbH
Telefon: + 49 3641 63 98 872
E-Mail: info@think-jena.de

Redaktion:
Dennis Kehl, Lisa Mastaler, Jakob Maercker
Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz GmbH
Telefon: + 49 3641 63 98 872
E-Mail: info@think-jena.de

Fotos:
Name, Institution *oder* Vorname, Nachname *oder* entsprechend der Vorgabe des Urhebers

Redaktionsschluss:
28.02.2024

Hinweis:
Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter https://publikationen.sachsen.de heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis
Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.
Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

Täglich für
ein gutes Leben.
www.lfulg.sachsen.de