

DEUTSCHER WETTERDIENST

Abteilung Klima- und Umweltberatung

SYNTHEBERICHT

Stadtklimatische Untersuchungen in Halle (Saale)

Auswertung von Klimamessungen und Modellsimulationen für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Auftraggeber:

Landesamt für Umweltschutz
Sachsen-Anhalt
FG 33 Klima, Erneuerbare Energien,
Nachhaltigkeit, Umweltallianz,
Geschäftsstelle AG Klima
Reideburger Str. 47
06116 Halle (Saale)

wissenschaftliche
Bearbeitung:

Dipl.-Geogr. Kristin Hoffmann
Dr. Frank Kreienkamp

Potsdam, den 14.05.2019

.....
Dr. Frank Kreienkamp
Leiter des Regionalen
Klimabüros Potsdam

.....
Dipl.-Geogr. Kristin Hoffmann

Dieser Bericht ist urheberrechtlich geschützt, außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte ist eine Vervielfältigung oder Weitergabe dieses Berichtes an Dritte sowie die Mitteilung seines Inhaltes, auch auszugsweise, nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes gestattet.

INHALT		Seite
I	Zusammenfassung	3
II	Aufbau des Syntheseberichtes	4
III	Projektfragen	5
1	Messungen	12
1.1	Historische und temporäre Klimamessungen	12
1.2	Windprofile	16
1.3	Kfz-basierte Profilmessfahrten	17
1.4	Straßenbahnbasierte Profilmessfahrten	18
2	KLAM_21 – Simulationen	23
3	Fahrgastbefragung	28
4	RayMan	30
5	MUKLIMO_3 – Simulationen	33
6	Schlussbemerkungen	38
IV	Abbildungsverzeichnis	40
V	Tabellenverzeichnis	41
VI	Ansprechpartner	42

I Zusammenfassung

Zur Analyse des Klimas der Stadt Halle (Saale) wurden im Zeitraum 2014 bis 2018 umfangreiche Messungen und Simulationsrechnungen durchgeführt. Ziel war es, aktuelle Grundlagendaten zu den klimatischen Verhältnissen zu schaffen und die Auswirkungen des Klimawandels auf das Hallenser Klima zu untersuchen.

Das Messprogramm umfasste temporäre Klimamessungen an ausgewählten Standorten im Stadtgebiet, Messfahrten mit einem mit meteorologischer Messtechnik ausgestatteten Fahrzeug, Messungen des vertikalen Windprofils mit einem SODAR (SOund Detecting And Ranging) und Messungen mit Hilfe von mit meteorologischer Sensorik ausgestatteten Straßenbahnen. Mit diesen Messungen konnte die räumliche und zeitliche Struktur der städtischen Wärmeinsel an den Messpunkten und entlang der Fahrstrecken erfasst werden.

Simulationen wurden mit dem Wärmehaushaltsmodell RayMan zur Untersuchung der thermischen Belastung in Straßenbahnen, mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 zur Untersuchung der nächtlichen Kaltluftdynamik für die städtebauliche Ist-Situation und einen Plan-Zustand und dem mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 zur Untersuchung der sommerlichen Temperaturverhältnisse der Vergangenheit und der Auswirkungen des Klimawandels durchgeführt. Die Simulationen ermöglichen eine flächenhafte Beschreibung der städtischen Wärmeinsel, der nächtlichen Kaltluftströme und der thermischen Belastung in den Straßenbahnen.

Zusätzlich dazu wurde eine Befragung der Fahrgäste der Hallenser Straßenbahnen zur Untersuchung ihres thermischen Empfindens im Sommer in Abhängigkeit ausgewählter situativer und individueller Determinanten durchgeführt.

Aus dem Projekt gingen insgesamt fünf Teilberichte hervor, in denen die einzelnen Untersuchungskomponenten ausführlich beschrieben sind. Der vorliegende Synthesebericht vereint die wesentlichen Erkenntnisse dieser fünf Teilberichte.

II Aufbau des Syntheseberichtes

Der Synthesebericht fasst als erstes die zentralen Ergebnisse der Messungen und Simulationen zusammen. Dabei wird auf die ausführlichen Passagen im jeweiligen Teilbericht verwiesen.

Im Kapitel 1 (meteorologische Messungen) werden die Ergebnisse der vorhandenen historischen und der im Rahmen des Projektes durchgeführten temporären Messungen vorgestellt. Dieses umfasst eine Analyse des beobachteten Klimawandels auf der Basis der Stationsmessungen (Abschnitt 1.1). Im Abschnitt 1.2 enthält die Analyse der durchgeführten Messungen des vertikalen Windprofils mit einem SODAR. Im Abschnitt 1.3 werden die aus den Kfz-basierten thermischen Profilmessfahrten gewonnenen Erkenntnisse vorgestellt. Der Abschnitt 1.4 fasst die Analyseergebnisse der straßenbahnbasierten Messungen zusammen.

Das Kapitel 2 thematisiert die Resultate, die aus den mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 durchgeführten Simulationen für die städtebauliche Ist-Situation und einen Plan-Fall unter Annahme einer idealisierten sommerlichen, windschwachen Strahlungsnacht hervorgegangen sind.

Die Resultate der Befragung der Hallenser Straßenbahnfahrgäste zu ihrem thermischen Empfinden folgen im Kapitel 3.

Daran schließt sich das Kapitel 4 zur Berechnung ausgewählter thermischer Indizes für die Hallenser Klimatram mittels Rayman an.

Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse der MUKLIMO_3-Simulationen zur Veränderung der sommerlichen Temperaturverhältnisse – verursacht durch den Klimawandel – in Halle vorgestellt.

Abschließend werden im Kapitel 6 Schlussbemerkungen zusammengefasst, die wichtig sind für den Umgang mit den Erkenntnissen aus der Gesamtuntersuchung.

III Projektfragen

Mit den langjährigen und temporären Messungen wurden folgende Fragen beantwortet:

1) *Wie hat sich das Klima der Stadt Halle (Saale) seit Beginn der Wetteraufzeichnungen entwickelt und verändert?*

Die Temperatur hat von 1951-1980 bis 1981-2010 um rund 0,6 K zugenommen.

Deutliche Zunahme der Anzahl der Sommertage (+7) und Abnahme der Anzahl der Frosttage (-4) im Zeitraum 1961-1990 bis 1981-2010.

Kein klimatologischer Trend (Zu-/Abnahme) der jährlichen Niederschlagsmengen im Zeitraum 1951-2014

Schwache Abnahme der Anzahl der Tage mit Schneedecke im Zeitraum 1951-2014

Stabile relative Luftfeuchte im Jahresmittel im Zeitraum 1951-2018

Abnahme der Nebelneigung durch verbesserte Luftreinheit im Zeitraum 1951-2014

Kein klimatologischer Trend hinsichtlich Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Zeitraum 2010-2014

a) *Wodurch zeichnet sich das Klima von Halle (Saale) im Allgemeinen aus?*

Jahresmittel der Lufttemperatur: 9,1 °C (1961-1990), 9,6 °C (1981-2010)

Mittleres jährliches Niederschlagsaufkommen: 462 mm (1961-1990), 490 mm (1981-2010)

Symptomatische Trockenheit (geringe Niederschlagsmengen auf Grund der Lage im Regenschatten des Harzes und Minderung des ozeanischen Einflusses durch vorwiegend westliche bis südwestliche Anströmrichtungen)

Erhebliche Schwankungen der jährlichen Niederschlagsmengen und Sonnenscheindauer

2) *Durch welche lokalklimatischen Besonderheiten zeichnet sich das Klima von Halle (Saale) aus?*

a) *Welche Ausprägungen zeigt die räumlich-zeitliche Variabilität des Temperaturfeldes?*

Mehr Sommertage und heiße Tage sowie weniger Frost- und Eistage in der Stadt als im Umland.

Urbane Wärmeinsel (temporäre Wetterstationen):

Im Mittel 2014-2017: rund 1,2 K (Jahresmittel), rund 0,5 K während der Tages-, rund 2,0 K während der Nachtstunden; rund 1,5 K im Frühling und Sommer, rund 1,1 K im Herbst, rund 0,8 K im Winter

Im Einzelfall: bis zu 8,8 K Differenz zwischen Stadt und Umland

Tagesgang Wärmeinsel am stärksten ausgeprägt im Mai, Juni, am geringsten während der Wintermonate

Die Innenstadt ist während einer wolkenarmen, windschwachen, strahlungsintensiven Hochdruckwetterlage im Sommer im Vergleich zur begrünten Saaleaue (Franzigmark) in Abhängigkeit der Tageszeit überwärmt.

Während der Zeitspanne von 21:00 bis 23:59 Uhr ergeben sich i. d. R. die größten Abweichungen der Quadranten zur Umlandstation Franzigmark, d. h. es treten die höchsten Anomalien auf (Mittel 2015-2018: rund 2,2 K). Innerhalb der Zeitspanne von 09:00 bis 11:59 Uhr kommt es hingegen zu den geringsten Unterschieden innerhalb der Stadt bzw. unter den Quadranten (Mittel 2015-2018: rund 0,2 K)

i) Welche Unterschiede ergeben sich dabei in Abhängigkeit von Großwetterlage und Bebauungsstruktur?

Bei Anströmung aus nördlichen bis nordwestlichen Richtungen ergibt sich die stärkste Überwärmung in der Stadt – unabhängig von der Bebauung.

Die Stärke bzw. das Niveau der Überwärmung eines Quadranten sind direkt proportional zum Bebauungs- bzw. Versiegelungsgrad → Der Quadrant Brandbergweg ist mit rund 0,2 K im Vergleich zu allen anderen 30 Quadranten der am wenigsten überwärmte Quadrant (Jahresmittel 2015-2018). Der Quadrant Torstraße weist im Jahresmittel (2015-2018) mit rund 2,2 K die größte positive Anomalie auf.

b) Welche Strukturen und Intensitäten zeigen die sommerlich-nächtlichen Kaltluftverhältnisse in Halle (Saale)?

Das Windfeld zeigt eine starke Beeinflussung durch Bebauung und Orographie.

Die bodennahen Windgeschwindigkeiten sind sehr gering

Ein hoher Schwachwindanteil während windschwacher Strahlungsnächte am Standort Franzigmark aus Westnordwest und Nordnordwest deutet auf einen talaufwärts gerichteten Kaltluftstrom.

Die ebenfalls hohe Belegung der westnordwestlichen Windrichtungssektoren am Standort Kröllwitz während windschwacher Strahlungsnächte impliziert, dass der Stationsstandort, wie derjenige am Standort Franzigmark, von tiefer gelegenen Bereichen im Nordwesten mit Kaltluft versorgt wird.

i) Existiert ein nächtliches Windsystem (Saaletalwind) in Halle (Saale)?

Die Windrosen und SODAR-Messungen zeigen einen schwachen Saaletalwind im Süden bis zur Innenstadt (Rennbahn, Abwasserpumpwerk) mit einer Mächtigkeit von etwa 80 m. In Bodennähe treten Fließgeschwindigkeiten bis zu 0,7 m/s auf. In größeren Höhen (bis 50 m über Grund) werden mit abnehmender Rauigkeit auch über 1,5 m/s erreicht.

Standort Pferderennbahn: In größeren Höhen treten bis zu 1,4 m/s auf. Die Kaltluftschicht erreicht im Norden bis zu 70 m Mächtigkeit.

ii) Kann eine vermutete Rückströmung im Saaletal im Norden der Stadt nachgewiesen werden?

Die Windrosen und SODAR-Messungen zeigen eine Rückströmung im Norden von Halle (Franzigmart, Klärwerk Nord – stromaufwärts).

Die Messungen weisen geringe Strömungsgeschwindigkeiten im Bodenniveau < 1,0 m/s und geringe Mächtigkeiten < 80 m über Grund auf.

c) Welche klimatischen Änderungen sind künftig in Halle (Saale) zu erwarten?

Weitere Zunahme der Lufttemperatur.

Zunahme der Anzahl der heißen und Sommertage, Abnahme der Frost- und Eistage.

Anhebung des Niveaus der urbanen Wärmeinsel.

3) Wie gestaltet sich die thermische Belastungssituation innerhalb öffentlicher Verkehrsmittel (hier: am Beispiel von Straßenbahnen)?

Im Gesamtzeitraum ist es in der Straßenbahn im Mittel um 9,4 °C wärmer als draußen.

Im Mittel (2015-2018) ist es im Winter um 13,7 °C, im Frühling um 9,8 °C, im Sommer um 5,2 °C und im Herbst um 7,9 °C wärmer in der Straßenbahn als draußen.

Die Temperatur in der Straßenbahn fällt i. d. R. nicht unter 5 °C.

Im Extremfall ergeben sich im Winter bei strengem Frost bis zu 24,4 K Unterschied zwischen der Innen- und Außentemperatur.

Im Sommer kann sich die Straßenbahn auf bis zu 46 °C aufheizen, während außen „nur“ 40 °C gemessen werden.

Die gemessene gefühlte Temperatur in der Straßenbahn liegt im Mittel im Jahr und während aller Jahreszeiten oberhalb der Außentemperatur.

Die Lufttemperatur in der Straßenbahn zeigt wie die Wetterstationen einen typischen Tagesgang der Lufttemperatur.

Sie nimmt im Tagesverlauf mit zunehmendem Sonnenstand und steigender Außentemperatur zu.

Die Innenraumtemperatur übersteigt i. d. R. den dazugehörigen Außenmesswert.

Die Zunahme der Temperatur in der Straßenbahn verläuft in den Morgenstunden anfangs gedämpft, dann zunehmend rascher (im Sommer auch intensiver als außen).

Am Abend setzt die Abkühlung in der Straßenbahn gegenüber der Außentemperatur zeitlich verzögert ein. Zudem nimmt die Temperatur innen weniger rasch und intensiv ab.

Mit den KLAM 21-Simulationen wurden folgende Fragen beantwortet:

1) *Wie gestalten sich die Kaltluftverhältnisse in Halle (Saale) und Umgebung während einer sommerlichen Strahlungsnacht?*

Zu Beginn einer simulierten Nacht sind im gesamten Modellgebiet keine nennenswerten Kaltluftvolumenströme vorhanden. Es überwiegen die lokalen Kaltluftproduktionsraten gegenüber der Kaltluftadvektion.

Bereits nach 15 Minuten heben sich kaltluftbildende Flächen sehr gut gegenüber Flächen, die keine Kaltluft bilden, ab.

Kaltluftvolumenströme bilden sich erst im Laufe der Nacht zunächst außerhalb der Stadt, in den engen, stärker geneigten Seitentälern der Saale.

Die Saalestadt wird erst zum Ende einer simulierten Nacht von Kaltluft durch- und überströmt. Auf Grund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten der Kaltluft in Halle (Saale) findet nur ein sehr langsamer Luftaustausch zwischen der überwärmten Innenstadt und der sie durchströmenden Kaltluft, die aus dem Umland herantransportiert wird, statt.

Im Saaletal entwickeln sich im Verlauf der simulierten Strahlungsnacht zwei entgegengesetzte Talströmungen, die nördliche davon ist talaufwärts und die südliche ist talabwärts gerichtet. Sie erreichen mittlere Fließgeschwindigkeiten von ca. 0,5 m/s bis 1,0 m/s. Im Bereich der Peißnitz treffen die Strömungen aufeinander.

2) *Wo liegen Kaltluftentstehungsgebiete innerhalb des Untersuchungsgebietes?*

Gute Kaltluftproduzenten, also Bereiche mit einer hohen effektiven nächtlichen Ausstrahlung, sind die freien und begrünten Flächen der Anhöhen im Umland von Halle (Saale). Dazu gehören z. B. diejenigen im Bereich des Petersberges, der Porphyrkuppen bei Brachwitz sowie die Hangkanten zwischen Angersdorf und Delitz, die südlich der Stadt vorgelagerten Auengebiete der Saaleniederung sowie innerstädtische Grünflächen (Berg-Zoo, Botanischer Garten, städtische Parkanlagen usw.)

3) Wo im Untersuchungsgebiet sammelt sich nächtlich gebildete Kaltluft?

Das Saale- und das Reidetale, zwischen denen sich Halle (Saale) erstreckt, sind zwei potentielle Kaltluftammelgebiete. Die Kaltluft sammelt sich in allen konkaven Geländeformen des Modellgebietes (Saale und ihre Nebentäler, Mulden, Senken usw.).

4) Wie ändert sich die nächtliche Kaltluftsituation in Halle (Saale) unter Berücksichtigung simulierter städtebaulicher Änderungen (betrifft: Bebauung und Flächennutzung)?

Positive und negative Differenzen in der Kaltluftströmung sind vornehmlich zu Beginn der simulierten Strahlungsnacht und dabei nur direkt über den von städtebaulichen Änderungen betroffenen Flächen sowie ihrer unmittelbaren Umgebung auszumachen.

Die Auswirkungen städtebaulicher Änderungen (Plan-Zustand) halten sich im Bereich der sehr kleinen Planflächen in engen Grenzen und relativieren sich im Verlauf der Nacht.

5) Existiert ein vermuteter aber bis dato noch nicht bestätigter Saaletalwind?

Die KLAM_21-Simulationen zeigen einen sehr schwach ausgeprägten nächtlichen Saaletalwind im Bereich der Saale des südlichen Teils von Halle (Saale).

6) Zeigen die KLAM_21-Simulationen für den städtebaulichen Ist-Fall die mittels Messungen erfassten wesentlichen nächtlichen Durchlüftungsverhältnisse von Halle (Saale)?

Die mittels KLAM_21 berechneten Kaltluftmächtigkeiten und –strömungsgeschwindigkeiten passen gut zu den beobachteten Verhältnissen, da sie sehr ähnliche Werte für die betrachteten Parameter ausgeben.

Die eingangs zur Befragung der Hallenser Straßenbahnfahrergäste definierten Fragen zur thermischen Belastung können wie folgt beantwortet werden:

1) Schätzen die Fahrgäste die thermischen Bedingungen innerhalb der Straßenbahn richtig ein?

Nein, die Fahrgäste unterschätzten die Messwerte im Mittel um 2,4 °C.

2) Stimmen die Fahrgastschätzungen zur Lufttemperatur in der Straßenbahn mit den zugehörigen Messungen überein?

Nein, die Temperaturmesswerte wurden deutlich unterschätzt (in rund 97 % der Fälle).

3) Unterscheidet sich das thermische Empfinden der Fahrgäste in der Straßenbahn in Abhängigkeit von individuellen Determinanten (hier: Geschlecht, Alter, Bekleidung)?

Die individuellen Determinanten wirken unterschiedlich auf das thermische Empfinden. Das Geschlecht spielte beispielsweise keine Rolle, hingegen aber das Alter. Wider Erwarten empfanden die Fahrgäste mit zunehmendem Alter die thermischen Bedingungen als angenehm.

Die Bekleidung verhielt sich in Abhängigkeit von ihrem Grad (sommerlich zu winterlich bekleidet) umgekehrt proportional zur thermischen Belastung.

4) Unterscheidet sich das thermische Empfinden der Fahrgäste in der Straßenbahn in Abhängigkeit von situativen Determinanten (hier: Fahrdauer, Wartezeit, Hektik, Traumauslastung)?

Die Determinanten Hektik/Eile und Fahrdauer zeigten wider Erwarten keinen Einfluss auf das thermische Empfinden. Aber die Faktoren Wartezeit und Auslastung der Straßenbahn verhielten sich direkt proportional zur Wärmebelastung.

5) Wie wirkt sich die kombinierte Wirkung individueller und situativer Gegebenheiten (hier: Alter und Bekleidung; Geschlecht und Bekleidung) auf das thermische Empfinden der Fahrgäste in der Straßenbahn aus?

Der Einfluss situativer und individueller Determinanten in Kombination wird durch den Tagesgang der Lufttemperatur überlagert.

6) Determiniert die Witterung das thermische Empfinden in der Straßenbahn?

Ja, je wärmer es draußen ist, desto wärmer werden die thermischen Bedingungen in der Straßenbahn empfunden.

Mit den RayMan-Simulationen wurden folgende Fragen beantwortet:

1) Geben die Modellrechnungen die beobachteten Werte wieder?

Die Simulationsergebnisse fügen sich gut in die beobachteten Werte ein.

2) Welches Ausmaß nimmt die thermische Belastung im Extremfall (Hitzeperiode) an?

In der Straßenbahn werden an einem heißen Tag in der Tram um 5 °C höhere Temperaturen (PET und PT) gefühlt als außerhalb. Es ergibt sich eine starke Wärmebelastung (PT: > +32 °C bis +38 °C; PET: 35 °C; thermisches Empfinden: heiß)

3) Passen die Aussagen der Fahrgäste zu den simulierten Werten?

Die Befragungsergebnisse geben insgesamt wieder, dass es den Fahrgästen tendenziell etwas zu warm war, was gut zu der simulierten schwachen bis mäßigen thermischen Belastung passt.

Mit den MUKLIMO_3-Simulationen wurden folgende Fragen beantwortet:

1) Geben die MUKLIMO_3-Simulationen die beobachteten sommerlichen Temperaturverhältnisse in Halle (Saale) wieder?

Die beobachteten Werte passen sehr gut zu den MUKLIMO_3-Resultaten (Evaluierungslauf) für Halle (Saale), die für die Saalestadt etwa 30 Sommertage und rund sechs heiße Tage im Bereich Kröllwitz (Stationsstandort) zeigen.

Die Beobachtungen zeigen wie die MUKLIMO_3-Simulationen stadtstrukturbedingte Unterschiede in der Temperaturverteilung von Halle (Saale). Aus den Messungen und Simulationen geht hervor, dass die stark bebauten und versiegelten Innenstadtbereiche im

Sommer am stärksten thermisch belastet sind. Das Umland weist hingegen eine vergleichsweise gute abendliche Abkühlung auf.

Messungen und Simulationen zeigen gleichermaßen, dass die Anzahl der Sommertage und heißen Tage in der dicht bebauten Innenstadt von Halle (Saale) am höchsten ist.

2) Wodurch wird die Ausprägung der sommerlichen Temperaturverhältnisse beeinflusst?

Die räumliche Variabilität der Lufttemperatur (und daraus abgeleiteter Parameter) im Stadtgebiet von Halle (Saale) wird stark durch die Überlagerung der Auswirkungen der Bebauung (städtischer Wärminseleffekt) und der orographischen Einflüsse auf die Lufttemperatur geprägt.

3) Wie gestalten sich die künftigen sommerlichen Temperaturverhältnisse unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels in Halle (Saale)?

Die MUKLIMO_3-Simulationen zeigen in Abhängigkeit des zugrunde gelegten Emissions-szenarios eine Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage und heißen Tage. Im Median über das jeweils für die Simulationen zugrunde gelegte Ensemble ist bis zur Mitte des Jahrhunderts (2031-2060) mit rund 5 bis 14 zusätzlichen Sommertagen zu rechnen. Zum Ende des Jahrhunderts (2071-2100) sind es 10 bis 35 weitere solcher Tage.

Gleichzeitig wird auch die mittlere jährliche Anzahl heißer Tage bis 2031-2060 um rund 0,5 bis 2,5 Tage pro Jahr und bis 2071-2100 um 2 bis 8 Tage pro Jahr ansteigen.

Die Auswertung der langen Messreihen zeigte eine Zunahme der Lufttemperatur seit Messbeginn. Zukünftig wird aller Wahrscheinlichkeit nach mit einem weiteren Temperaturanstieg in der Region zu rechnen sein. Darauf deuten die Ergebnisse der MUKLIMO_3-Simulationen hin.

1 Messungen

1.1 Historische und temporäre Klimamessungen

Die Analyse der Messungen ergab, dass die Lufttemperatur (Abbildung 1) in der Region Halle (Saale) seit Messbeginn (1951) um rund 0,6 K gestiegen ist. Mit der allgemeinen Temperaturzunahme korrespondierend geht i. d. R. eine mehr oder minder stark ausgeprägte Zunahme der Anzahl der Sommertage und heißen Tage sowie eine Abnahme der Anzahl der Frost- und Eistage einher. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich im Mittel die Klimaerwärmung in der Region Halle (Saale) manifestiert hat (Teilbericht 1, Abschnitt 6.2.1).

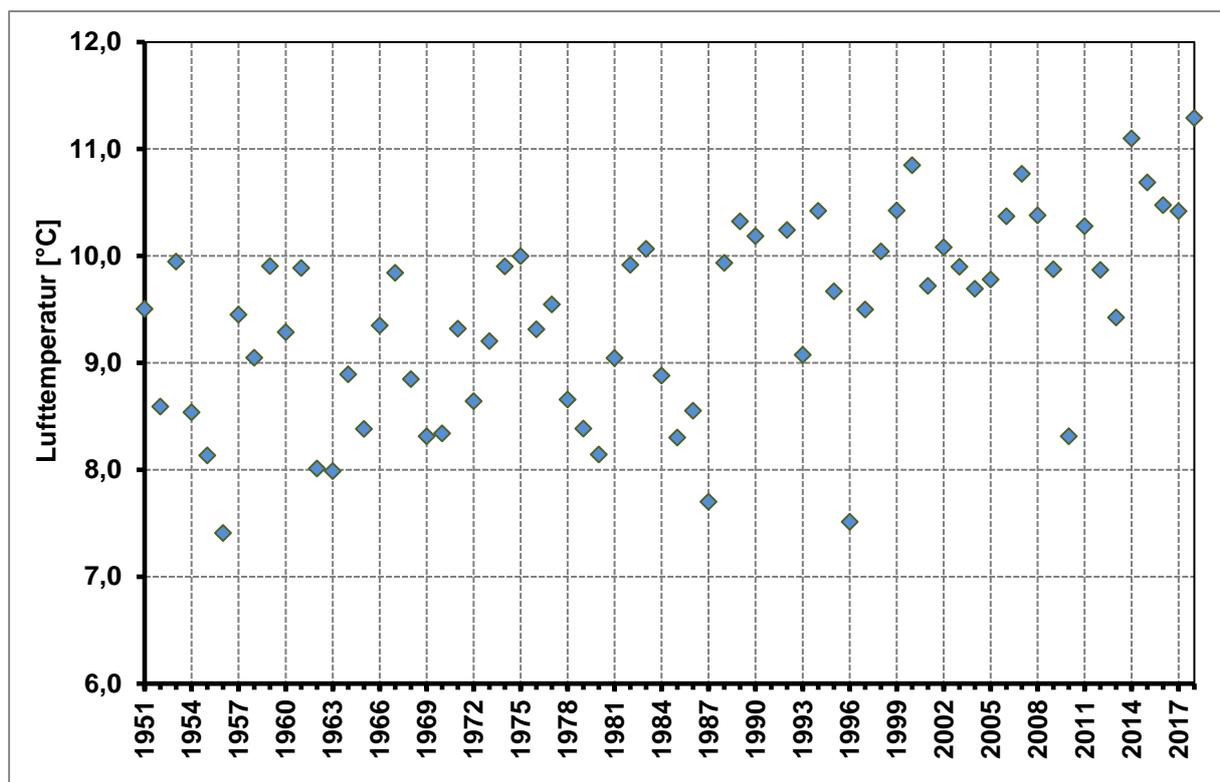


Abbildung 1: Verlauf des Jahresmittels der Lufttemperatur, Halle-Kröllwitz (1951-2018, ohne 1991)

Die Auswertung der langjährigen Niederschlagsdaten (Abbildung 2) ergab eine erhebliche Schwankung der jährlichen Niederschlagsmengen. So trat beispielsweise in Halle-Kröllwitz 2010 mit rund 720 mm die bisher größte und mit rund 266 mm 1982 die geringste Jahressumme auf. Ein eindeutiger Trend beim mittleren jährlichen Niederschlagsaufkommen in Halle-Kröllwitz zu einer Zu- oder Abnahme ist nicht erkennbar (Teilbericht 1, Abschnitt 6.2.2).

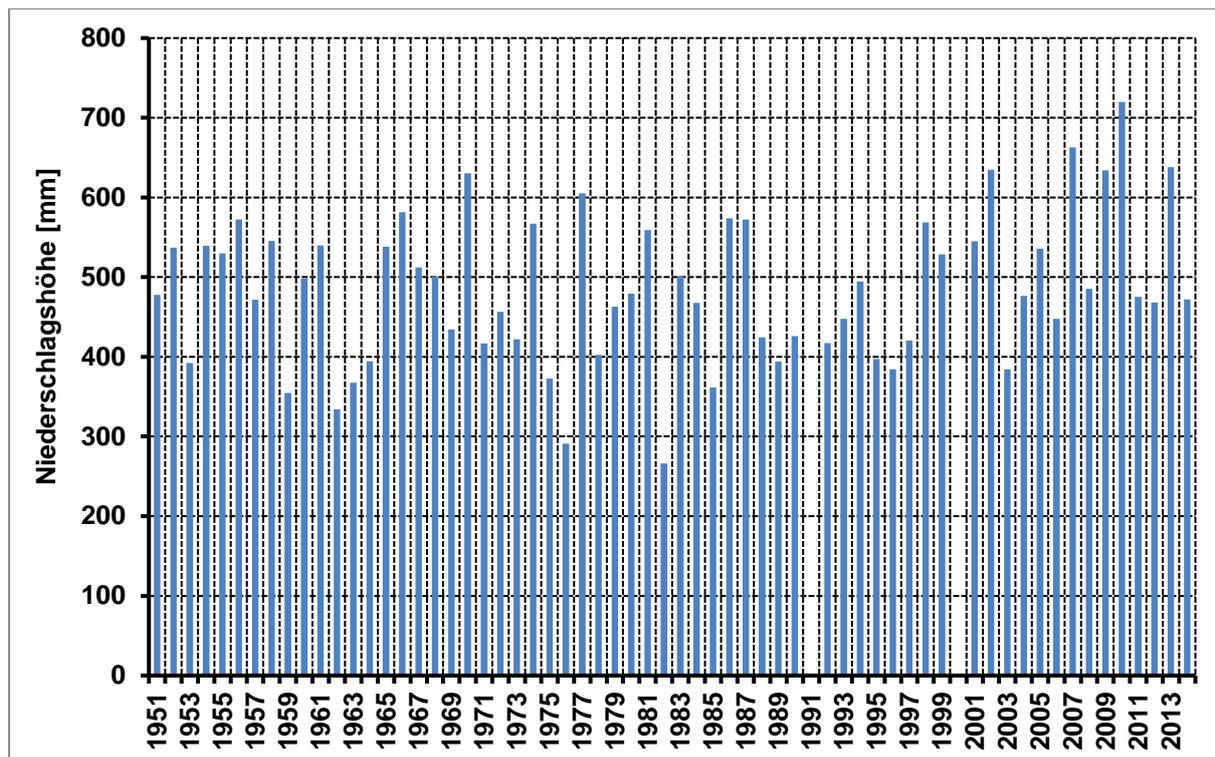


Abbildung 2: Entwicklung der Jahressummen der Niederschlagshöhe, Halle-Kröllwitz (1951-2014, ohne 1991, 2000)

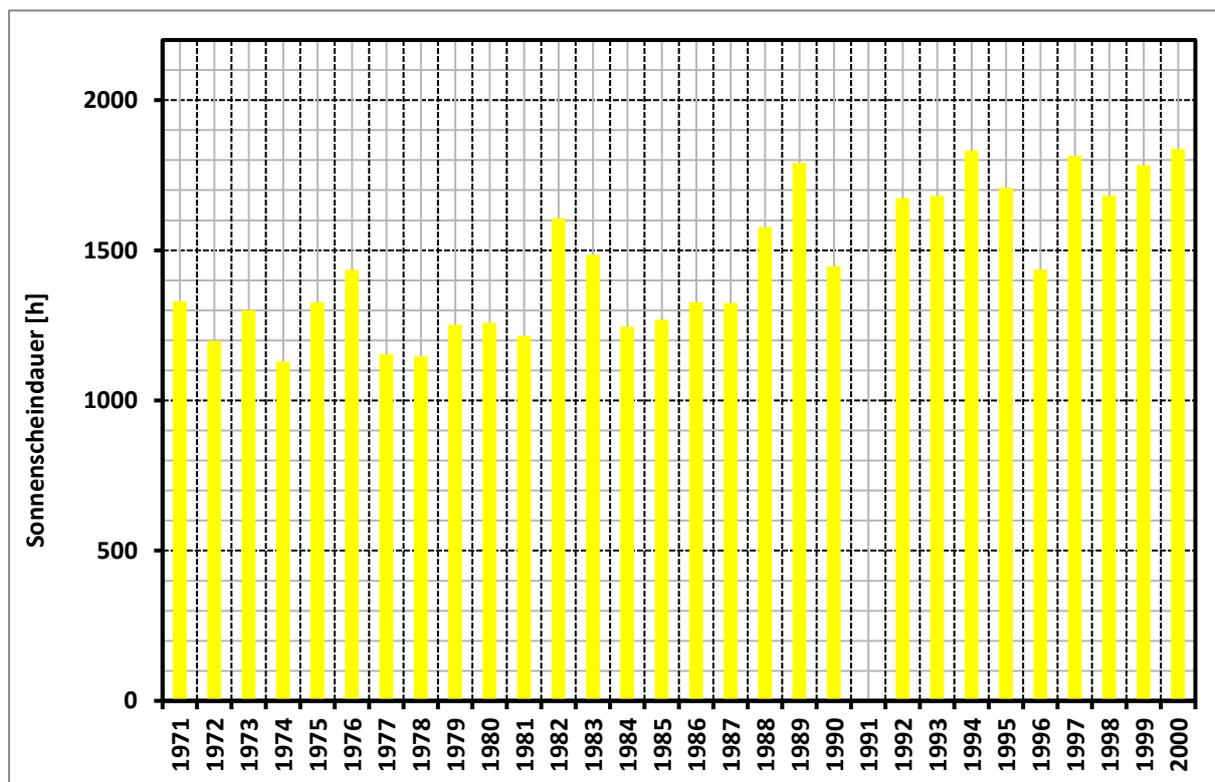


Abbildung 3: Entwicklung der Jahressummen der Sonnenscheindauer, Bad Lauchstädt (1971-2000, ohne 1991)

Der allgemeine Anstieg der Lufttemperatur wirkt sich zwangsläufig auf die Schneebedeckung aus. Einerseits kann es dazu kommen, dass die Niederschläge in der kalten Jahreszeit öfter

in flüssiger Form fallen, andererseits, dass Tauprozesse zwischenzeitlich häufiger und zum Ende des Winters früher auftreten. Die mittlere Anzahl der Tage mit Schneebedeckung in Halle (Saale) weist einen leichten Rückgang auf (Teilbericht 1, Abschnitt 6.6.2).

Mit Blick auf die relative Luftfeuchte ergeben sich keine signifikanten Veränderungen. Der langjährige Mittelwert ist seit Messbeginn relativ stabil und schwankt in einem relativ engen Korridor (Teilbericht 1, Abschnitt 6.2.3).

Es liegen nur sehr lückenhaft Daten zur Sonnenscheindauer vor. Deshalb wurde zur Auswertung auf Daten von Bad Lauchstädt zurückgegriffen. Die Schwankung der Jahressumme der Sonnenscheindauer innerhalb der einzelnen Jahre ist beachtlich (Abbildung 3). Mit Abnahme der Dimming-Effekte durch die Luftverschmutzung ist die Sonnenscheindauer leicht gestiegen (Teilbericht 1, Abschnitt 6.2.4).

Es liegen nur sehr lückenhaft Daten zum Wind vor. Die Schwankung innerhalb der einzelnen Jahre ist beachtlich. Ein klimatologischer Trend ist nicht zu beobachten (Teilbericht 1, Abschnitt 6.2.5).

Im Rahmen des Projektes wurden in Ergänzung der vorliegenden langen Datenreihen von Halle-Kröllwitz an drei ausgewählten Standorten im Untersuchungsraum temporär Klimamessungen durchgeführt. Dabei erfasste die Station Franzigmark (Informationen zur Station im Teilbericht 1, Abschnitt 5 und 5.2.1.3) den ländlichen Hintergrund. Die Stationen Commerzbank und Diesterweg (Informationen zu den Stationen im Teilbericht 1, Abschnitt 5 sowie 5.2.1.1 und 5.2.1.2) erfassten unterschiedliche Teilaspekte der städtischen Wärmeinsel.

Der Vergleich der für die genannten Stationen ausgewerteten Daten zeigte, dass die Größenordnung der städtischen Wärmeinsel abhängig ist vom Zeitpunkt im Jahr und der Uhrzeit, wodurch sie sich unterschiedlich stark ausgeprägt (Abbildung 4).

Die Station Commerzbank wird durch eine Umgebung mit sehr hoher Bebauungsdichte geprägt. Folglich ergab sich an diesem Standort im Mittel die höchste städtische Überhitzung (rund 1,2 °C). Der städtische Baukörper führt zu einer Dämpfung der täglichen Temperaturamplitude (Teilbericht 1, Abschnitt 7.2.2).

Die Station Diesterweg liegt in einem besser durchgrüntem weniger stark bebauten Bereich von Halle. Auch hier ist eine hohe städtische Überhitzung messbar. Bei den Tagesmaxima der Temperatur wurden an dieser Wetterstation die höchsten Messwerte erreicht. Das absolute Maximum der Lufttemperatur von 40,0 °C wurde am 4. Juli 2015 gemessen. Die grünere Umgebung an der Station Diesterweg ermöglicht jedoch in der Nacht eine bessere Abkühlung als an der Station Commerzbank (Teilbericht 1, Abschnitt 7.2.2).

Die Auswertungen ergaben weiterhin, dass die Stadt im Mittel im Frühling um rund 1,5 K wärmer ist als ihr Umland. Der Tagesgang der innerstädtischen Überwärmung ist im Sommer gegenüber den übrigen Jahreszeiten am stärksten ausgeprägt. Die geringsten Differenzen ergeben sich zwischen 06:00 und 18:00 Uhr (UTC). Im Gegensatz dazu sind von 20:00 bis 00:00 Uhr (UTC) und 00:00 bis 03:00 Uhr (UTC) die größten Differenzen zwischen Stadt und Umland zu erwarten. Während der Sommermonate ist die Saalestadt im Mittel rund 1,5 K

gegenüber dem Umland erwärmt. Für den Herbst lassen sich die größten Differenzen zwischen Stadt und Umland zwischen 20:00 und 00:00 Uhr UTC sowie 18:00 und 06:00 Uhr (UTC) ausmachen. Im Mittel ist die Stadt im Herbst um rund 1,1 K wärmer als ihr Umland. Im Winter ergibt sich gegenüber allen anderen Jahreszeiten insgesamt ein schwach ausgeprägter Tagesgang der innerstädtischen Überwärmung. Allgemein sind im Winter die geringsten Differenzen (rund 0,1 bis 0,2 K) zwischen 11:00 und 13:00 Uhr (UTC) zu erwarten. Die größten Unterschiede treten allgemein zwischen 18:00 und 00:00 Uhr (UTC) sowie 00:00 und 07:00 Uhr (UTC) auf. Im Mittel ist die Stadt im Winter um rund 0,8 K wärmer als ihr Umland (Teilbericht 1, Abschnitt 7.2.2).

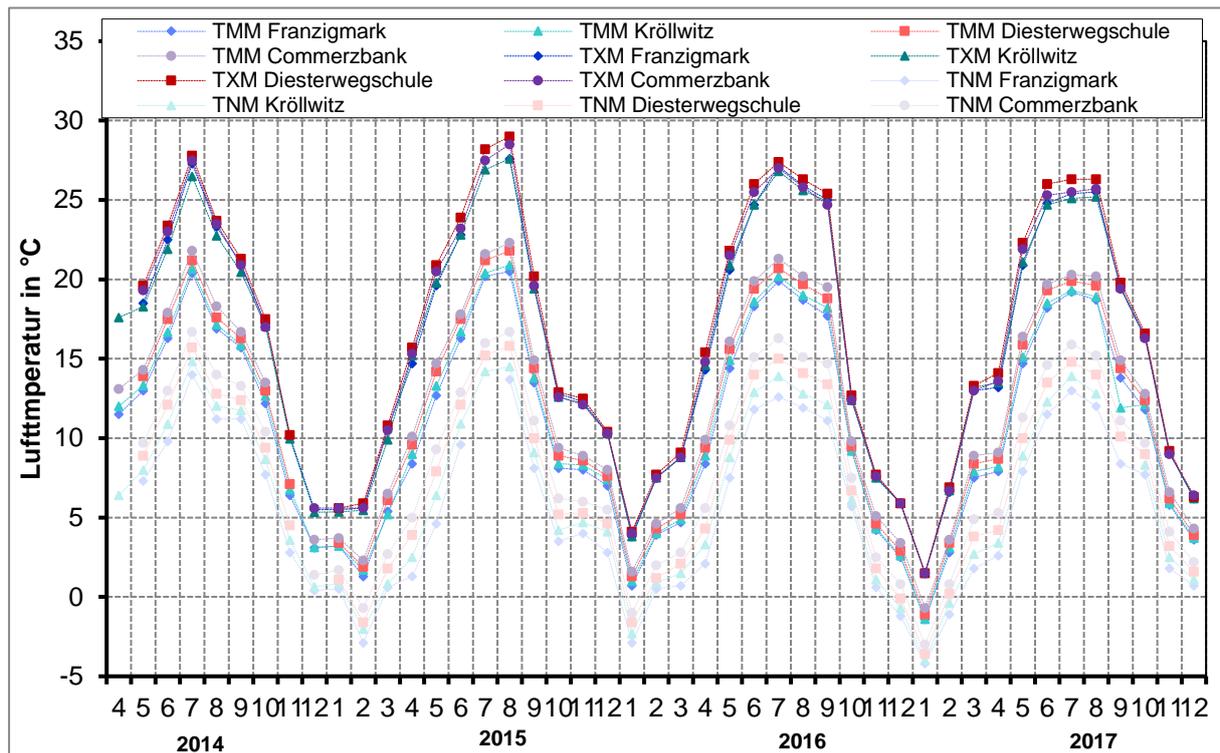


Abbildung 4: Verlauf der mittleren monatlichen Tagesmittel, -maxima und -minima im Messzeitraum

Die Tendenzen, die bei der Auswertung der Lufttemperatur für die verschiedenen Stationen bereits festgestellt wurden, schlagen sich auch in den aus der Lufttemperatur abgeleiteten Parametern nieder. So verzeichnete der Standort Diesterweg in allen Einzeljahren die meisten heißen Tage. Die wenigsten heißen Tage und Sommertage wurden erwartungsgemäß für den Standort Kröllwitz ermittelt. Innerhalb der einzelnen Messjahre wurden die meisten Tropennächte am Standort Commerzbank registriert. Für den städtisch unbeeinflussten Standort Franzigmark ergaben sich die wenigsten Tropennächte. Die wenigsten Frost- und Eistage waren am Standort Commerzbank zu verzeichnen, die meisten am Standort Franzigmark.

Aus der Betrachtung der gemessenen Werte der Lufttemperatur und daraus abgeleiteter Parameter ergeben sich für den Zeitraum 01.04.2014 bis 31.12.2017 zusammenfassend deutliche Hinweise auf flächennutzungs- bzw. stadtstrukturbedingte Temperaturunterschiede im

Untersuchungsgebiet: Innerstädtische, stark bebaute Bereiche heben sich gegenüber begrünten, gewässernahen, freien oder locker bebauten Arealen ganzjährig als thermisch überwärmte Gebiete ab.

Allgemein sind die Messwerte an den Stationen stark durch die lokalen Standortbedingungen (hier: Art der Flächennutzung, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad, Orographie) determiniert. Im Vergleich der Stationswerte untereinander macht sich der Einfluss des Stadtkörpers besonders am Standort Commerzbank bemerkbar, der sich im Mittel als wärmster und hinsichtlich der Luftfeuchte als trockenster von allen Standorten abhebt. Die höchsten Werte der relativen Luftfeuchte wies – auf Grund ihrer Lage nahe der Saale in gut begrünter Umgebung – im Durchschnitt die Station Franzigmark auf.

1.2 Windprofile

Zusammenfassend lässt sich anhand der ausgewerteten SODAR-Messdaten folgendes konstatieren: Stellten sich einigermaßen gute Bedingungen ein, waren diese nicht über die Andauer einer ganzen Nacht stabil genug. Entweder waren die Bedingungen zu Beginn der Nacht in der ersten Nachthälfte halbwegs gut, setzten sich aber nicht bis zum Ende der Nacht fort, oder es stellten sich erst in der zweiten Nachthälfte annähernd gute Bedingungen ein. Dennoch geben die vorliegenden Daten in ersten Ansätzen Aufschluss darüber, wie sich die nächtliche Durchlüftung im Untersuchungsraum ausprägt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich bei guten strahlungsnächtlichen Bedingungen im Tal der Hallenser Saale in Bodennähe ein talabwärts gerichteter Wind einstellen kann (Abbildung 5). Die bodennahen Kaltluftflüsse weisen allerdings geringe Strömungsgeschwindigkeiten im Bodenniveau ($< 1,0$ m/s) und geringe Mächtigkeiten (< 80 m über Grund) auf. Im Norden der Stadt kann es in der Saaleniederung innerhalb der zweiten Nachthälfte zur Ausbildung einer Rückströmung (aus nordwestlichen Richtungen) kommen. Diese weist – je nach Höhe – Geschwindigkeiten von 0,4 bis 1,4 m/s auf. Die Kaltluftschicht erreicht bis zu etwa 70 m Mächtigkeit (Teilbericht 1, Abschnitt 7.3).

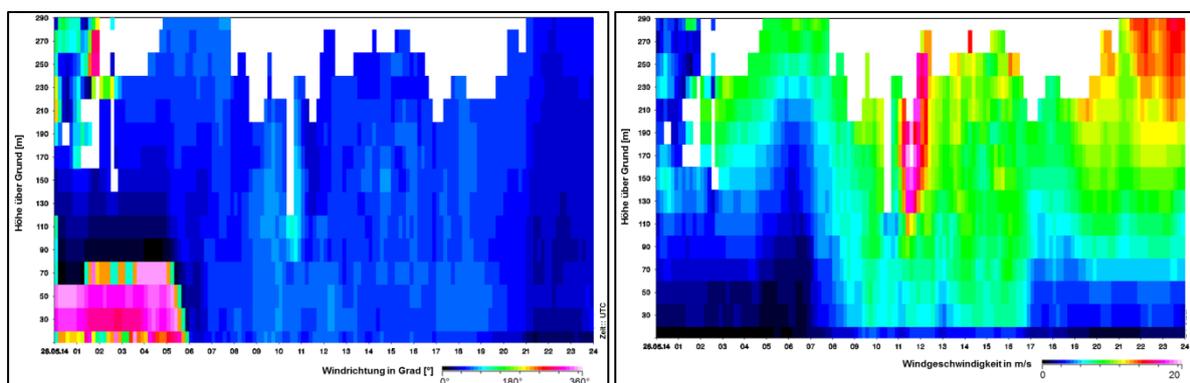


Abbildung 5: Zeit-Höhen-Diagramm der Windrichtung (links) und Windgeschwindigkeit (rechts), Abwasserpumpwerk (Süd), 26.05.2014 (UTC)

Basis: 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m

1.3 Kfz-basierte Profilmessfahrten

Die Wettersituation entsprach bei allen Fahrten – mit kleinen Einschränkungen – einigermaßen gut den Idealbedingungen einer autochthonen Wetterlage, so dass lokalklimatische Effekte in ausreichender Form in Erscheinung treten konnten.

Die Analyse der Profilmessfahrten zeigt, dass die innerstädtische Überwärmung im Vergleich aller Fahrten während der frühen Morgenstunden am stärksten ausgeprägt war.

Sie zeichnete sich besonders intensiv im Zentrumsbereich (Marktplatz) und den angrenzenden Straßen und in weiteren dicht bebauten bzw. stark versiegelten Quartieren rings um das Zentrum entlang der beiden Messstrecken ab (Abbildung 6 und Abbildung 7). Während der Nachmittagsfahrten zeigten sich z. T. Abschnitte, die durch enge, schattige Innenstadtschluchten führten (z. B. Leipziger Straße) zunächst als weniger stark überwärmte Areale. Im Bereich der Dölauer Heide ergaben sich stellenweise sogar negative Abweichungen (- 1 K). Breite, besonnte Flächen (z. B. An der Magistrale) in stark bebauten Quartieren stachen am Nachmittag teils als etwas stärker erwärmte Areale hervor, als die Innenstadt.

Insgesamt war die Wärmeinsel am späten Nachmittag bzw. frühen Abend recht schwach ausgeprägt. Am Abend verstärkte sie sich zunehmend.

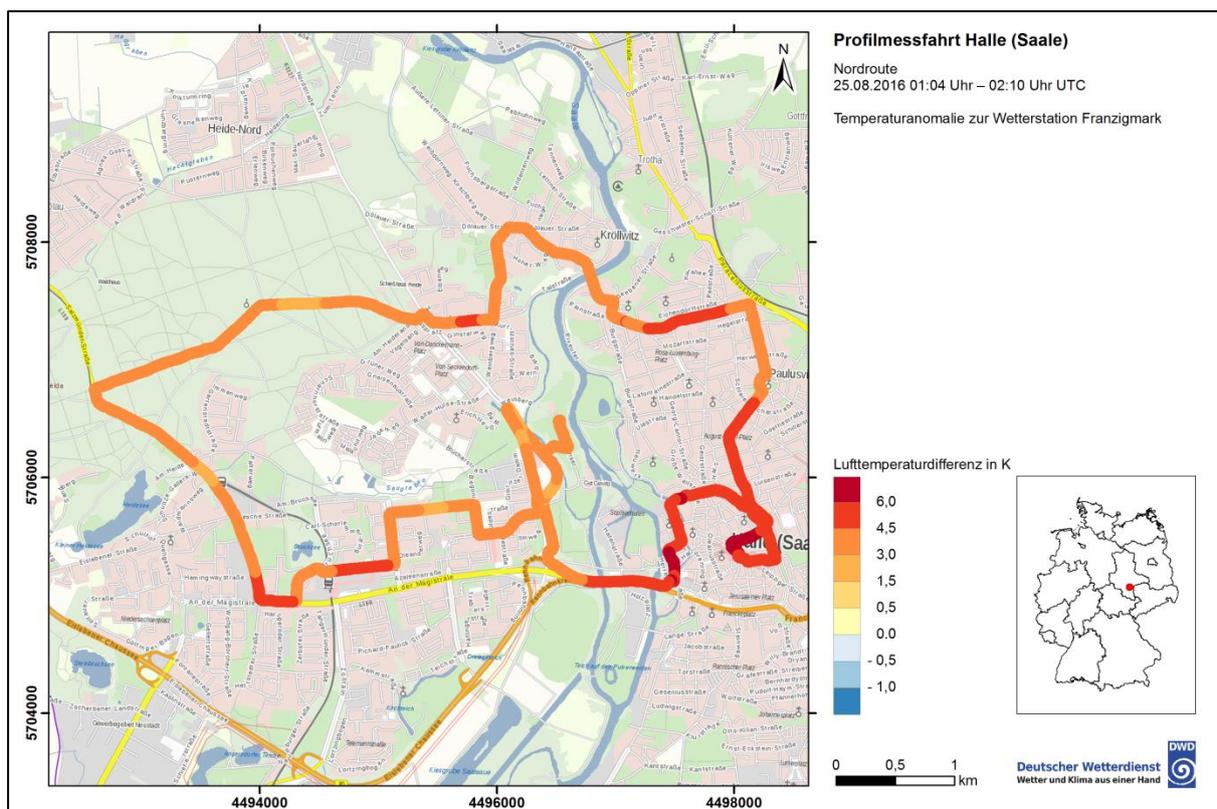


Abbildung 6: Profilmessfahrt, 25.08.2016, früh Nord von 01:04 bis 02:10 Uhr UTC
 Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA

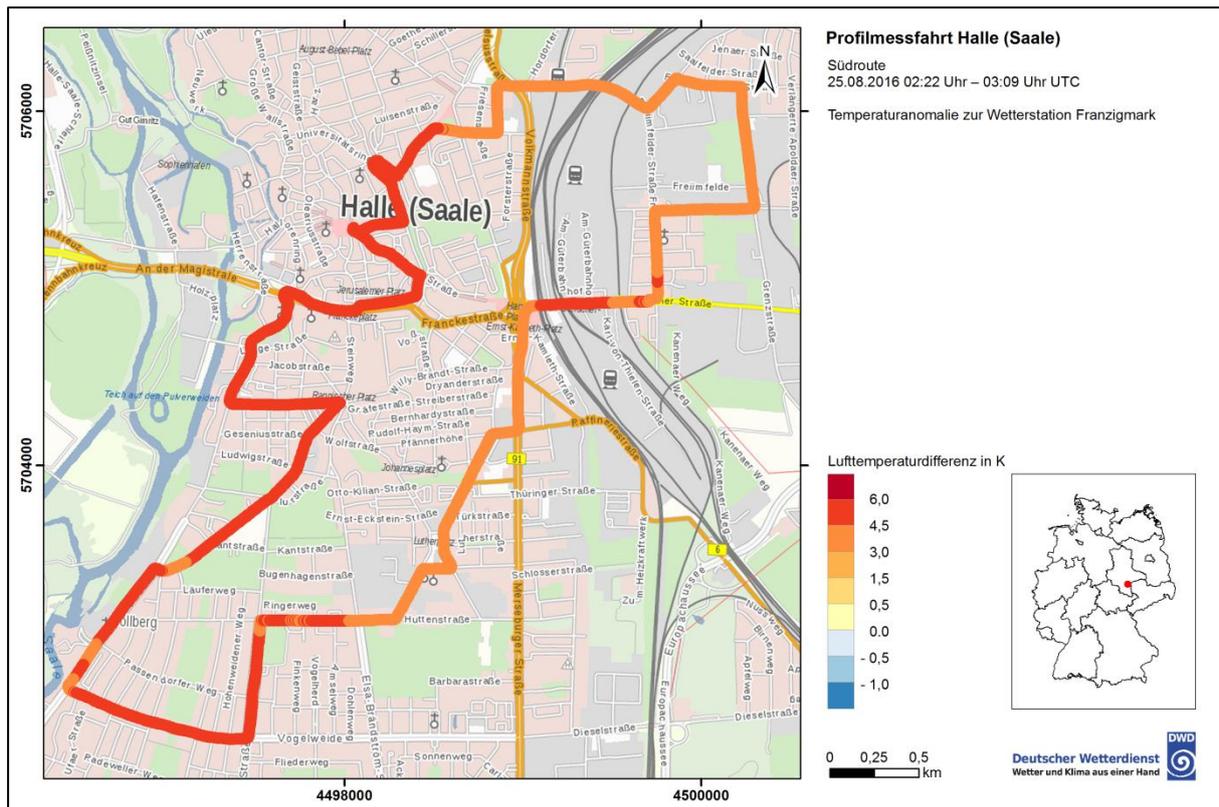


Abbildung 7: Profilmessfahrt, 25.08.2016, früh Süd von 02:22 bis 03:09 Uhr UTC
 Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA

Die Profilmessergebnisse bestätigen wie die Stationsmessergebnisse, dass die Innenstadt thermisch stärker belastet ist und sich stadtstrukturbedingt Unterschiede in der Ausprägung des Lokalklimas im Hallenser Untersuchungsgebiet ergeben (Teilbericht 1, Abschnitt 7.4.2).

1.4 Straßenbahnbasierte Profilmessfahrten

Es wurden Differenzen zwischen den gemessenen Tramdaten und Daten ausgewählter Wetterstationen gebildet (räumliche Anomaliewerte). Als Referenz zur Berechnung der räumlichen Temperaturanomale dienten die Daten der beiden im Vergleich am wenigsten durch den Stadtkörper von Halle (Saale) beeinflussten Wetterstationen Kröllwitz und Franzigmark. Im Vergleich der Anomalieresultate waren die größeren Unterschiede für Franzigmark auszumachen. Deshalb werden im Weiteren beispielhaft die Ergebnisse basierend auf den berechneten Anomalien zu Franzigmark gezeigt (Teilbericht 1, Abschnitt 7.4.3). Zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit sind nachfolgend nur 12 der 31 Quadranten dargestellt (Abbildung 8 und Abbildung 9).

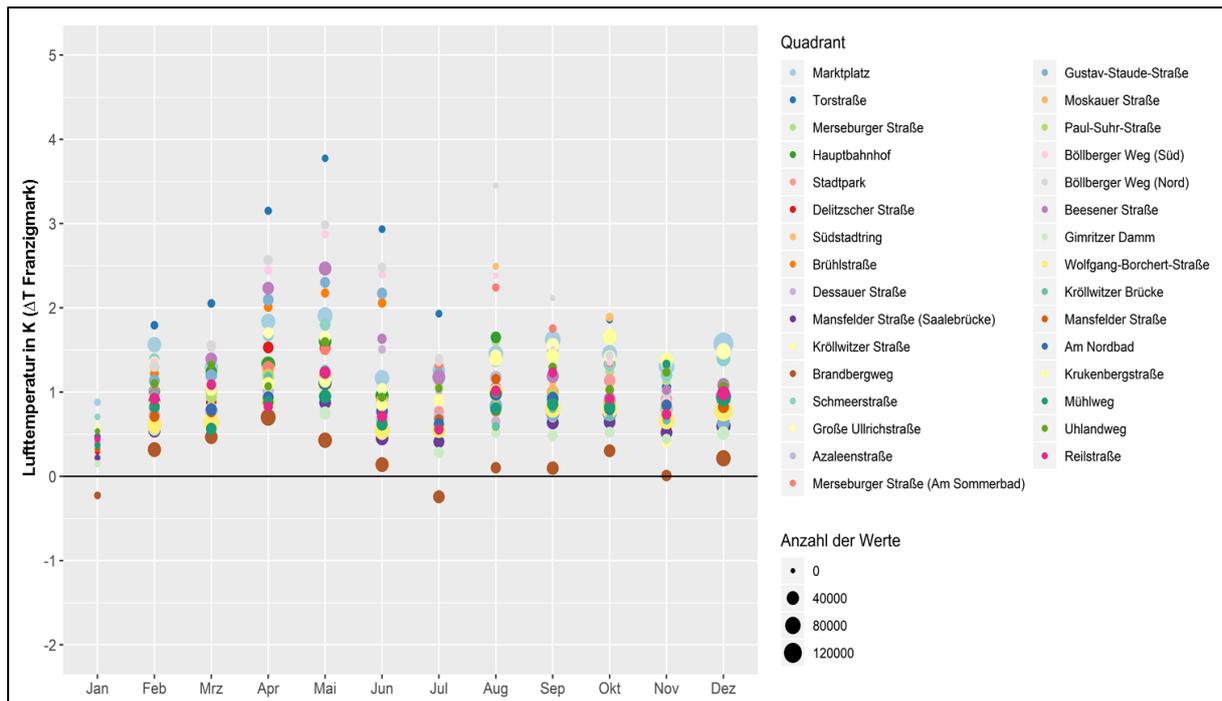


Abbildung 8: Mittlere monatliche Temperaturanomalien (außen), 2015 – 2018, Halle (Saale)

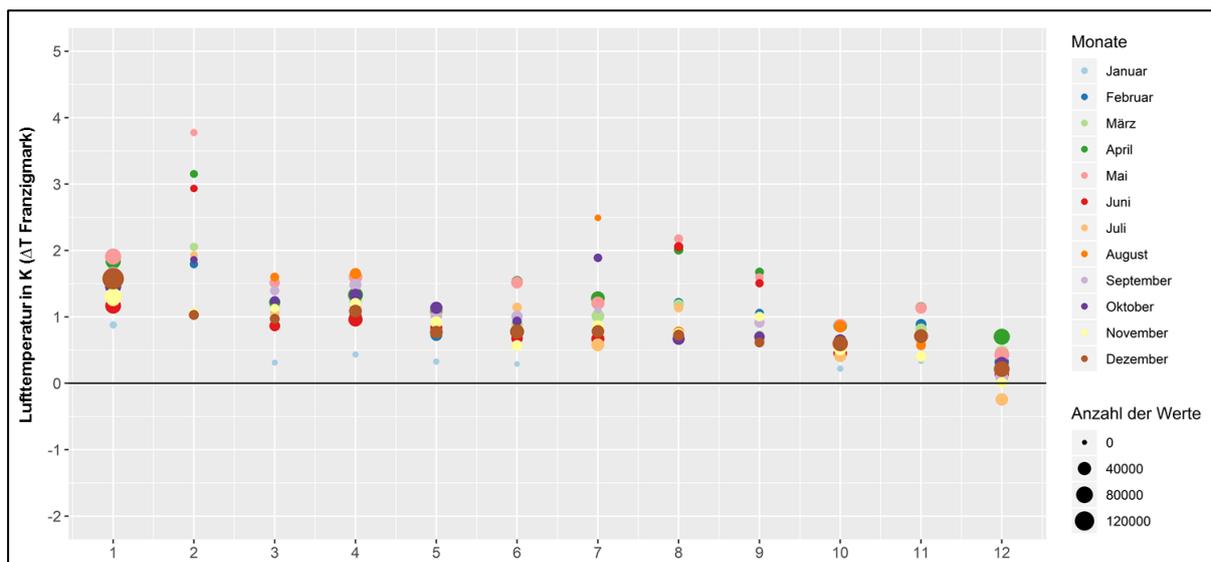


Abbildung 9: Mittlere monatliche Temperaturanomalien (außen) ausgewählter Quadranten, 2015 – 2018, Halle (Saale)

Die Auswertungen ergaben, dass alle Quadranten – mit Ausnahme des Quadranten 12 (Brandbergweg) – in allen Monaten (Mittel 2015-2018) gegenüber dem Stationsstandort Franzzigmark überwärmt waren.

Die Überwärmung fällt bei denjenigen Quadranten, die stärker versiegelt und / oder bebaut sind (z. B. Marktplatz (1), Torstraße (2)), höher aus, als bei denjenigen mit einem größeren Frei- oder Grünflächenanteil (Brandbergweg). Stadtstrukturbedingte Unterschiede, die das städtische Temperaturfeld in seiner Ausprägung beeinflussen (über unterschiedliche Flächennutzung, Bauungsart, Versiegelungsgrad), machen sich erst in den späten Abend-, Nacht-

und frühen Morgenstunden sichtlich bemerkbar. In Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad und Grünflächenanteil bildet sich ein heterogenes Temperaturfeld in der Stadt aus. Tagsüber halten sich die Auswirkungen in engen Grenzen. Das urbane Temperaturfeld gestaltet sich dann eher homogen.

Die Quadranten waren über alle Jahre und Monate gemittelt während der GWL 4 (Winkelförmige Westlage, WW) und 5 (Südwestlage, antizyklonal, SWA) mit jeweils rund 1,9 K am deutlichsten überwärmt.

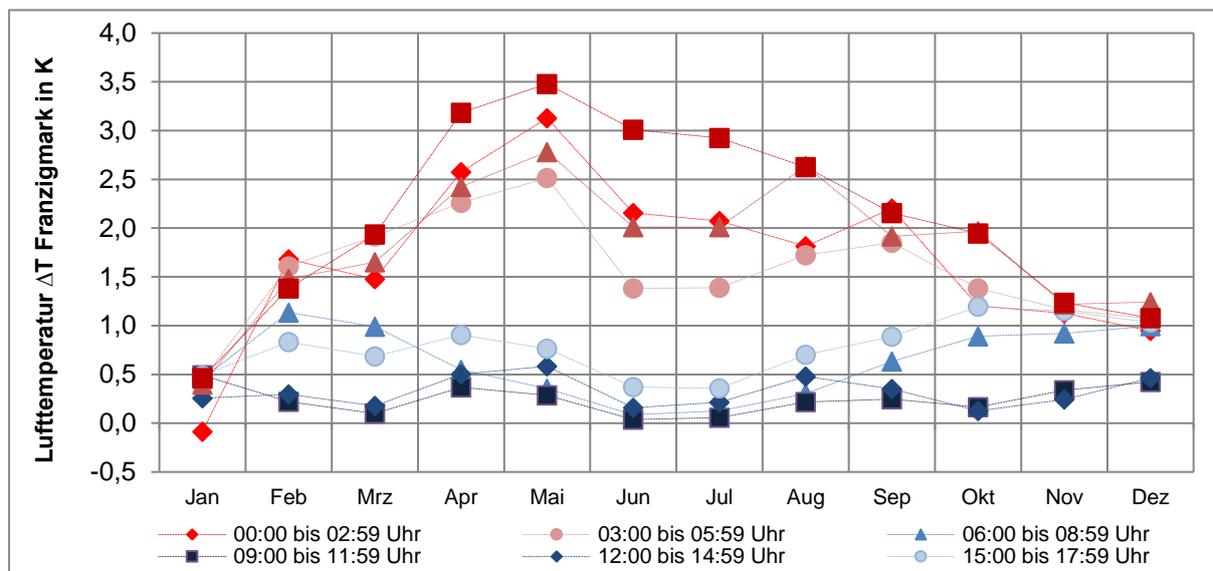


Abbildung 10: Vergleich der Überwärmung der Monate gemittelt über die 12 Quadranten ($\Delta T_{\text{Franzigmark}}$) nach Uhrzeiten für den Gesamtzeitraum 2015-2018

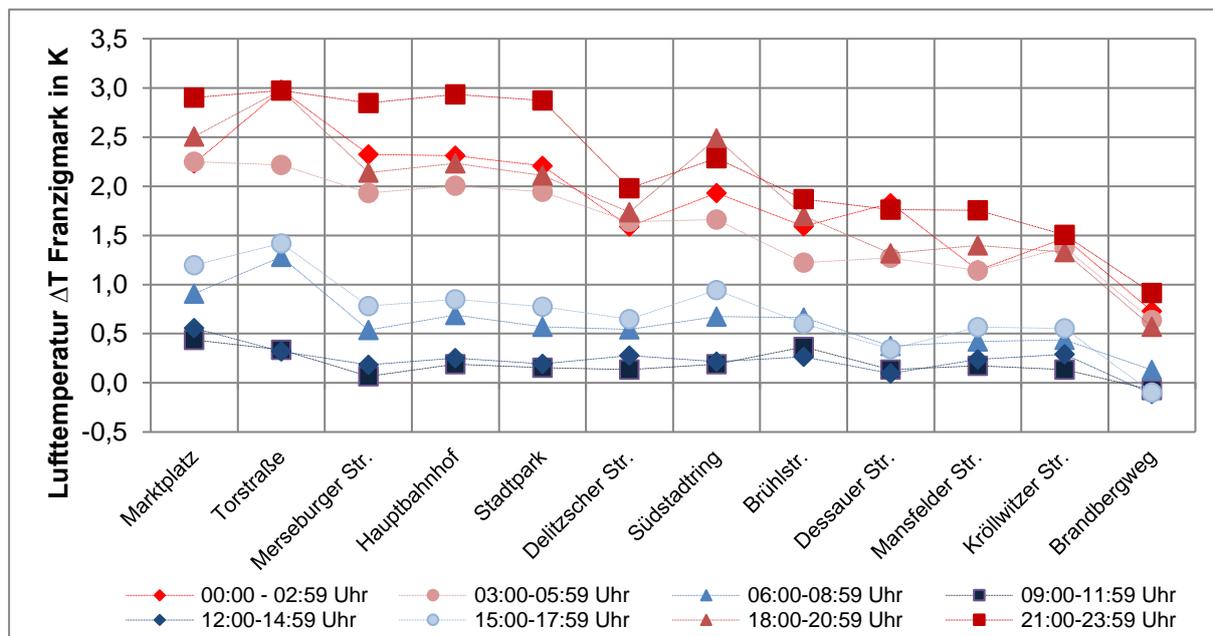


Abbildung 11: Vergleich der Überwärmung der 12 Quadranten ($\Delta T_{\text{Franzigmark}}$) während ausgewählter Uhrzeiten gemittelt über alle Monate im Gesamtzeitraum 2015-2018

Stadtstrukturbedingte Unterschiede, die das städtische Temperaturfeld in seiner Ausprägung beeinflussen (über unterschiedliche Flächennutzung, Bauart, Versiegelungsgrad), machen sich erst in den späten Abend-, Nacht- und frühen Morgenstunden sichtlich bemerkbar. In Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad und Grünflächenanteil bildet sich ein heterogenes Temperaturfeld in der Stadt aus. Tagsüber halten sich die Auswirkungen in engen Grenzen. Das urbane Temperaturfeld gestaltet sich dann eher homogen (Abbildung 10, Abbildung 11)

Eine gesonderte Auswertung der Überwärmung der Quadranten nach der Anströmrichtung (Teilbericht 1, Abschnitt 7.4.3.10) ergab, dass i. d. R. über den gesamten Messzeitraum bei Anströmungen aus nördlichen bis nordwestlichen Richtungen die stärkste Überwärmung in der Stadt – unabhängig vom Quadranten – auftrat (Abbildung 12).

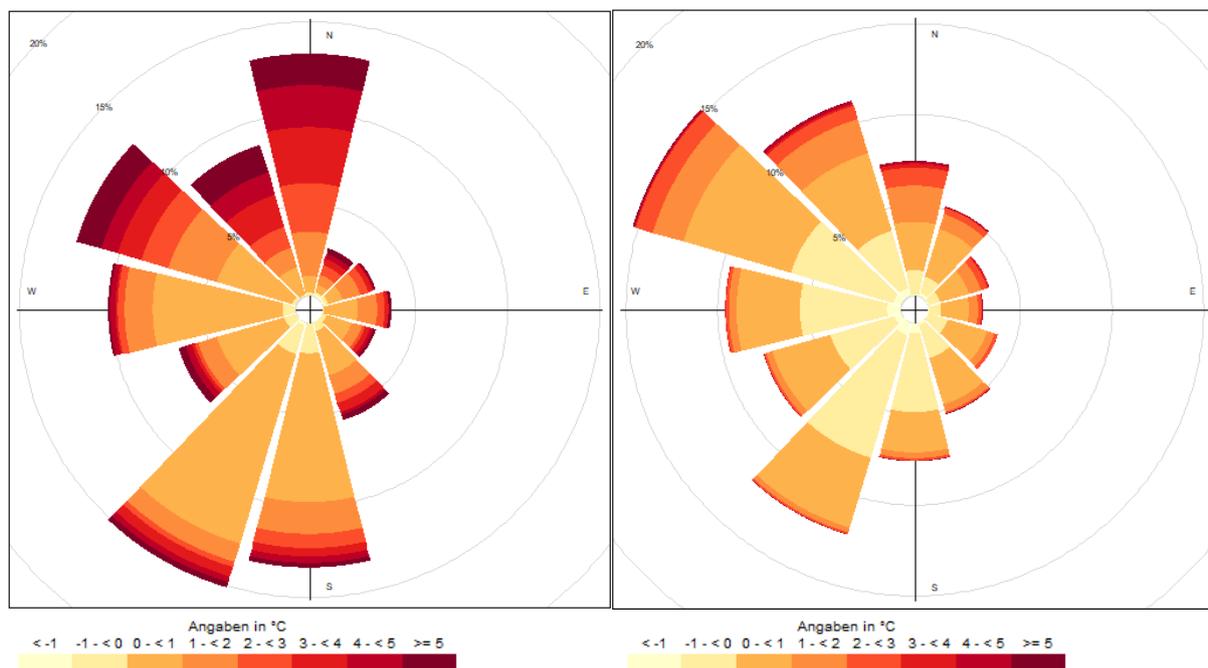


Abbildung 12: Temperatur-Windrichtungsrosen 2015-2018 (links: Torstraße; rechts: Brandbergweg)

In einem Exkurs (Teilbericht 1, Abschnitt 7.4.3.11) wurden die Temperaturdifferenzen zwischen den im Fahrgastraum der Klimatram und den außen an dieser Straßenbahn gemessenen Temperaturwerten betrachtet.

Es wird deutlich, dass die Innentemperatur der Klimatram abgesehen von einigen Ausreißern i. d. R. die Marke von 5 °C nicht unterschritten hat (Abbildung 13). Die Beheizung der Straßenbahn während des Winterhalbjahres scheint demnach sehr gut zu funktionieren. Es kamen im Winterhalbjahr Unterschiede zwischen der Fahrgastinnenraum- und Außentemperatur in der Klimatram von bis zu 15 K zustande, sofern im Winter strenger/starker Frost mit Temperaturen < -10 °C bis \geq -15 °C auftrat. Die Auswertungen ergaben, dass die Innenraumtemperatur im Sommerhalbjahr in seltenen Fällen Werte von rund 46 °C erreichte, während außen etwa *nur* 40 °C vorherrschten. Im Vergleich von Globe- und Außentemperatur ergeben sich ähnliche Resultate, weshalb auf eine nähere Erläuterung und grafische Darstellung dazu verzichtet wird.

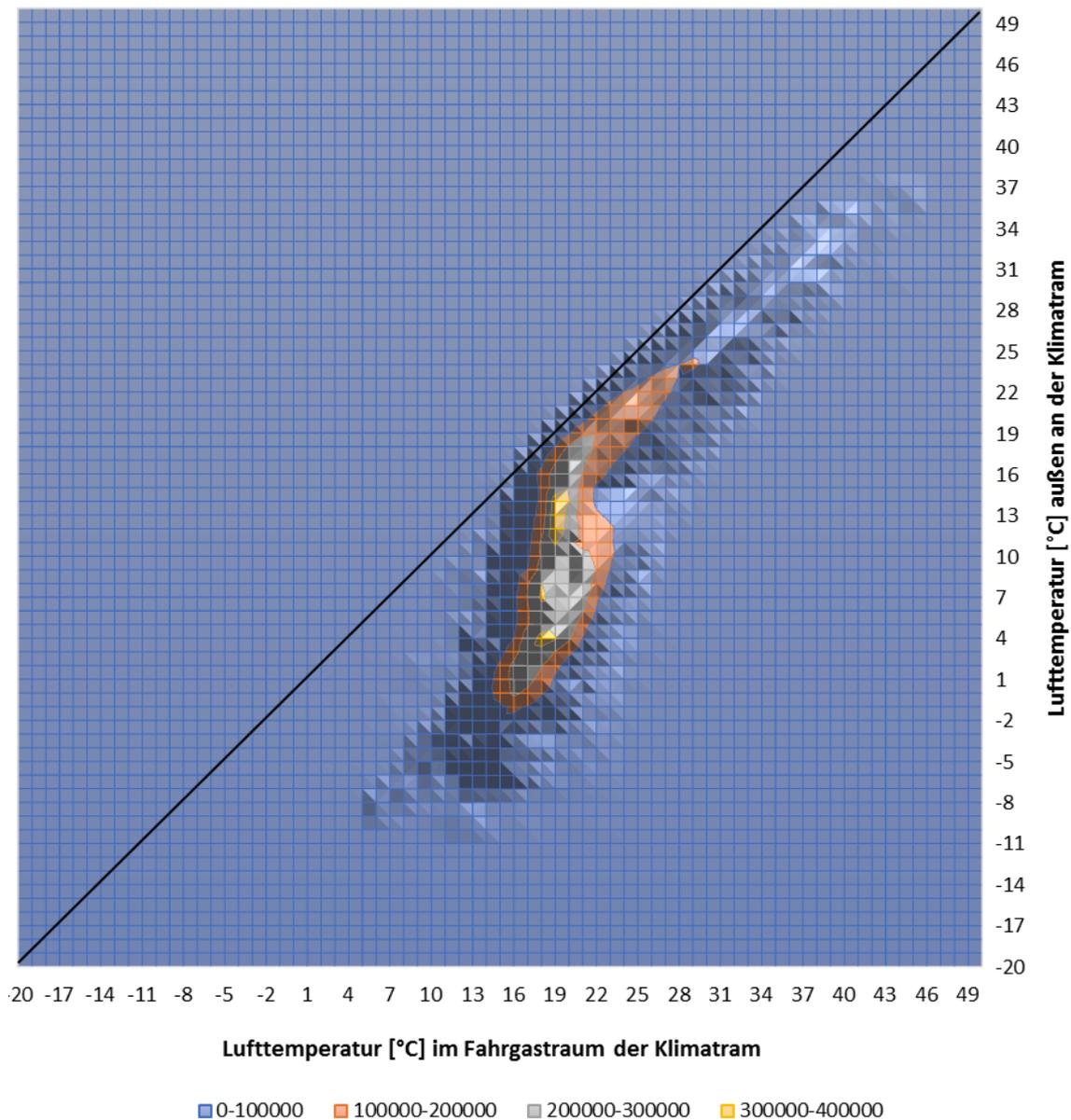


Abbildung 13: Gegenüberstellung der im Fahrgastraum der Klimatram und außen an der Klimatram gemessenen Lufttemperatur

Ab dem Frühjahr oder noch im Herbst, vornehmlich aber während der Sommermonate, dann aber auch nur während der Vormittagsstunden, kann es zu einem – wenn auch zumeist nur schwach ausgeprägten – umgekehrten Temperaturverhältnis kommen. Dies bedeutet, dass es draußen wärmer sein kann, als in der Straßenbahn. Die berechneten absoluten negativen Minima für den Frühling, Sommer und Herbst bestätigen diese Annahme. Bei einer Außentemperatur ab etwa 15 °C bis etwa 27 °C kann es in der Straßenbahn auch mal für einige Zeit um wenige Grad kühler sein als draußen. Wie bereits angedeutet, ist damit aber vornehmlich nur während der Morgen- und frühen Mittagsstunden zu rechnen.

2 KLAM_21 – Simulationen

Zur Untersuchung der nächtlichen Kaltluftverhältnisse während einer idealisierten sommerlichen Strahlungsnacht wurde das Modell KLAM_21 eingesetzt (Teilbericht 2).

Das im Rahmen des Stadtklimaprojektes untersuchte Modellgebiet erstreckt sich in einem 75 km x 75 km großen Gesamtgebiet (Abbildung 14) mit einer zugrundeliegenden Gitterweite von 25 m. Dies entspricht der derzeit maximal möglichen Ausdehnung eines Rechengebietes für die angegebene Auflösung, für die mittels KLAM_21 Simulationen durchgeführt werden können.

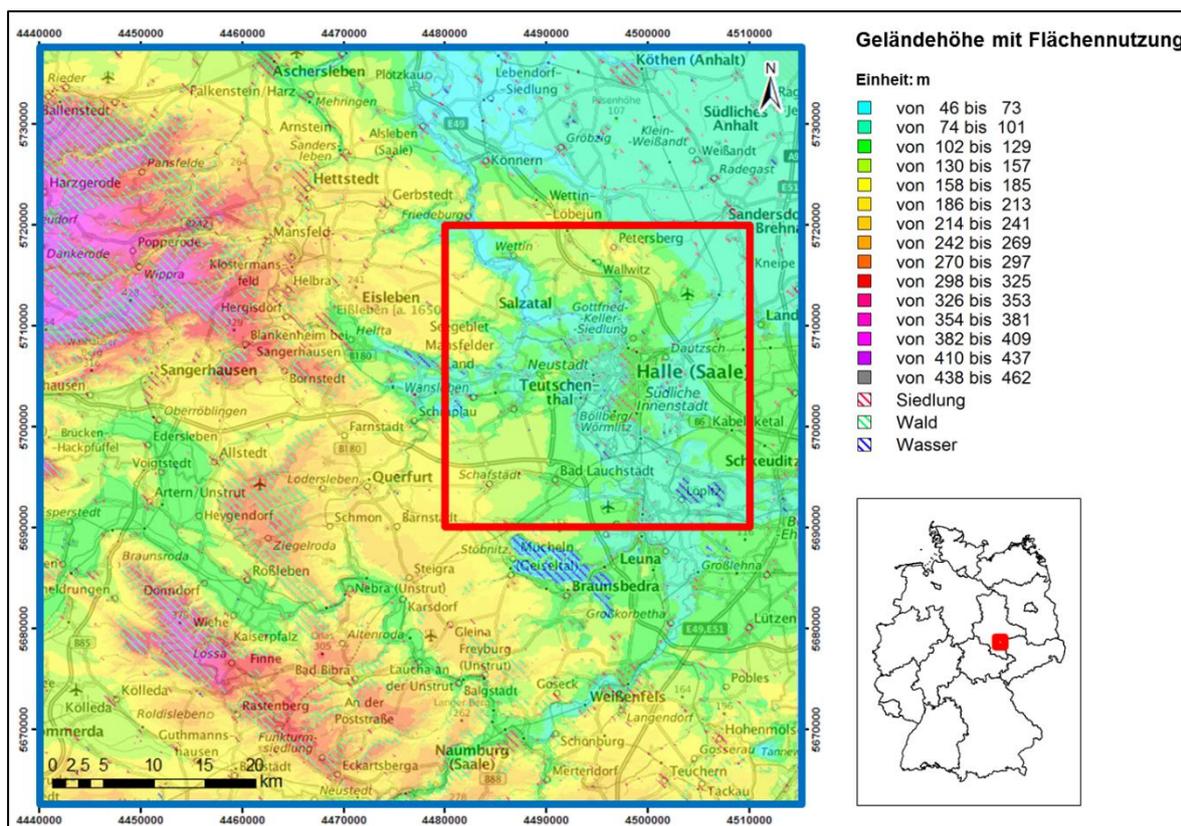


Abbildung 14: Lage der Stadt Halle (Saale) im KLAM_21-Modellgebiet und Geländehöhen in m über NN für den großen Gebietsausschnitt (75 km x 75 km) und den kleinen Gebietsausschnitt (30 km x 30 km)

Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

Die Simulationsergebnisse der ersten Stunden zeigen die kaltluftproduzierenden Flächen im Umland der Stadt Halle (Abbildung 15). In der Stadt dominiert lokale Kaltluftproduktion gegenüber Kaltluftadvektion aus dem Umland. Allerdings besteht auf Grund des hohen Versiegelungsgrades nur wenig Kaltluftbildungspotential (innerstädtische Grünflächen). Mit der Zeit beginnt die Kaltluft dem Geländegefälle folgend in tiefer gelegene Bereiche zu strömen.

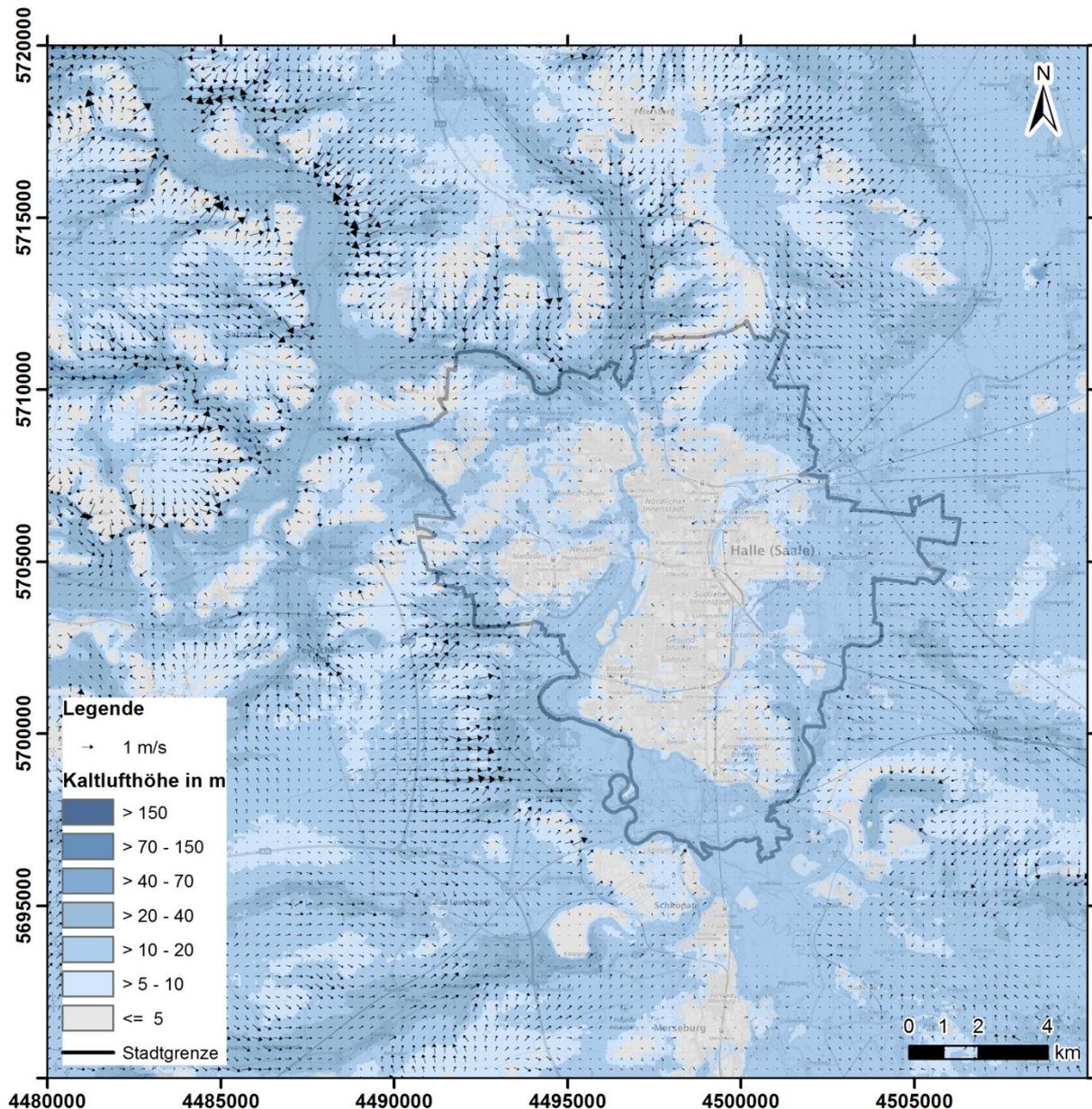


Abbildung 15: Kaltluflthöhe und Strömungsfeld (Höhenmittel) nach 1 Stunde Simulationszeit

Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

In der Frühphase (erste Stunden) der Simulation erfolgt keine nennenswerte Kaltluftzufuhr aus dem Umland in das Stadtgebiet. Über größeren innerstädtischen Grünflächen findet lokal Kaltluftproduktion statt. Im weiteren Verlauf der simulierten Strahlungsnacht fließt die über den Freiflächen von Anhöhen entstehende Kaltluft weiterhin konstant in die Talstrukturen der Saale, Reide, Götsche, Salza und Laweke und füllt diese mit Kaltluft auf. An den Hängen können Geschwindigkeiten von 1,0 – 2,0 m/s erreicht werden. Die Talstrukturen füllen sich in Abhängigkeit der zugeführten Kaltluftmenge, Größe ihres Querschnittes, Geländeneigung und Oberflächenrauigkeit unterschiedlich rasch mit Kaltluft.

Nach der Hälfte der simulierten Strahlungsnacht ist das gesamte Untersuchungsgebiet bereits gut mit Kaltluft aufgefüllt. Lediglich der Petersberg und weitere ihn umgebende Anhöhen

(Blonsberg, Abatassinenberg, Heideberg etc.) im Norden von Halle (Saale) ragen aus der Kaltluftschicht heraus, ebenso wie die Asendorfer Kippe zwischen Stedten und Dornstedt, die östlichen Ausläufer der Plateaufläche nördlich des Süßen Sees bei Seeburg und Hohnstedt sowie Teile der Innenstadt von Halle (Saale). Die Nördliche Innenstadt, die Altstadt, die Südliche Innenstadt und Teile der Stadtviertel Lutherplatz/Thüringer Bahnhof und Gesundbrunnen von Halle (Saale) zeichnen sich selbst noch nach vier Stunden Simulationszeit als Flächen ohne nennenswerte Kaltfluthöhe ab. Weil diese Bereiche höher liegen, reicht die Dicke der Kaltluftschicht noch nicht für ein Durch- und Überströmen aus. Die Kaltluftadvektion ist noch immer zu schwach, um auch diese Bereiche über Straßenzüge, Schienentrassen oder durch Häuserschluchten zu erreichen.

Im südlichen Abschnitt des Hallenser Saaletals hat sich hingegen ein schwacher, nach Nordosten gerichteter Talabwind etabliert, gespeist durch Kaltluft, die von den Hangflächen zwischen Delitz am Berge und Angersdorf abfließt. Dieser Saaletalwind ist äußerst schwach hinsichtlich seiner Fließgeschwindigkeit (0,1 - 0,5 m/s) und erreicht Höhen von etwas über 50 m über Grund.

Der Saaledurchbruch zwischen den Porphyrkuppen bei Kröllwitz und Giebichenstein verhindert ein weiteres vollständiges Durchströmen dieses Taldurchbruchs in Richtung des Flussgefälles. Der Durchbruch ist so eng, dass die Kaltluft sich davor sammelt und indifferente Strömungsrichtungen aufweist bis hin zu Rückströmungstendenzen (0,1 - 0,5 m/s). Dies führt dazu, dass die beiden entgegengesetzten Strömungen etwa in Höhe der Rennbahn aufeinandertreffen und eine Ablenkung nach Osten, in Richtung des zentralen Stadtgebietes, erfolgt. Dieser Saaletalwind wird angesichts der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe kaum spürbar sein und wegen seiner geringen Mächtigkeit auch nicht zu einem merklichen Belüftungseffekt der Innenstadt beitragen.

Etwa auf Höhe der Orte Friedeburg (Saale) und Rothenburg fällt eine talaufwärts gerichtete Strömung im Saaletal nördlich von Halle (Saale) auf. Die Kaltluftzufuhr von den begleitenden Hängen und Seitentälern ist ausreichend ergiebig, so dass die Kaltluftschicht im Saaletal schnell an Mächtigkeit gewinnt. Hier wächst die Dicke der Kaltluftschicht auf etwa 40 bis 70 m an. Wegen der starken Verengung des Saaletales bei Rothenburg kann sie aber im Laufe der Zeit nicht mehr schnell genug durch diese entweichen und sucht sich einen anderen Weg.

Seitens der Stadt Halle (Saale) wurden für die Simulation des Plan-Zustandes exemplarisch sieben Planflächen benannt (Abbildung 16), die künftig von einer Nutzungsänderung betroffen sein könnten. Die Unterschiede zwischen der bisherigen und der geplanten Landnutzung halten sich insgesamt in engen Grenzen. Zwar verteilen sich die geplanten Nutzungsänderungen dispers im Modellgebiet, allerdings sind sie – abgesehen von zwei geplanten Industriegebieten – überwiegend von kleinräumiger Natur (< 1 ha).

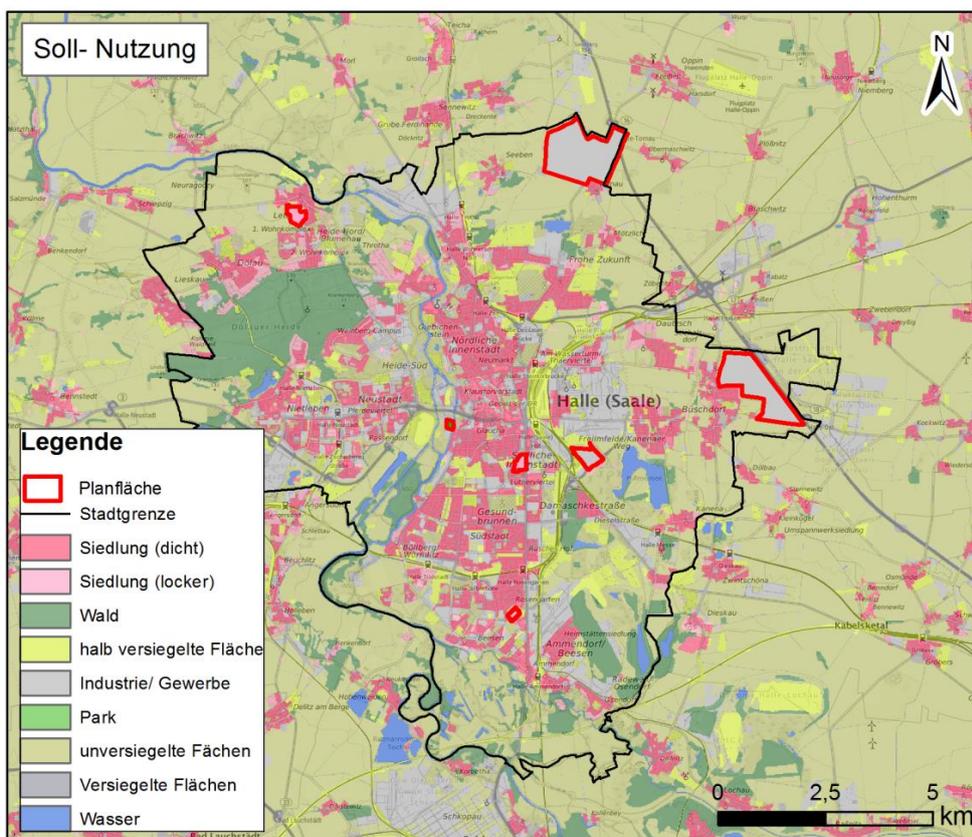
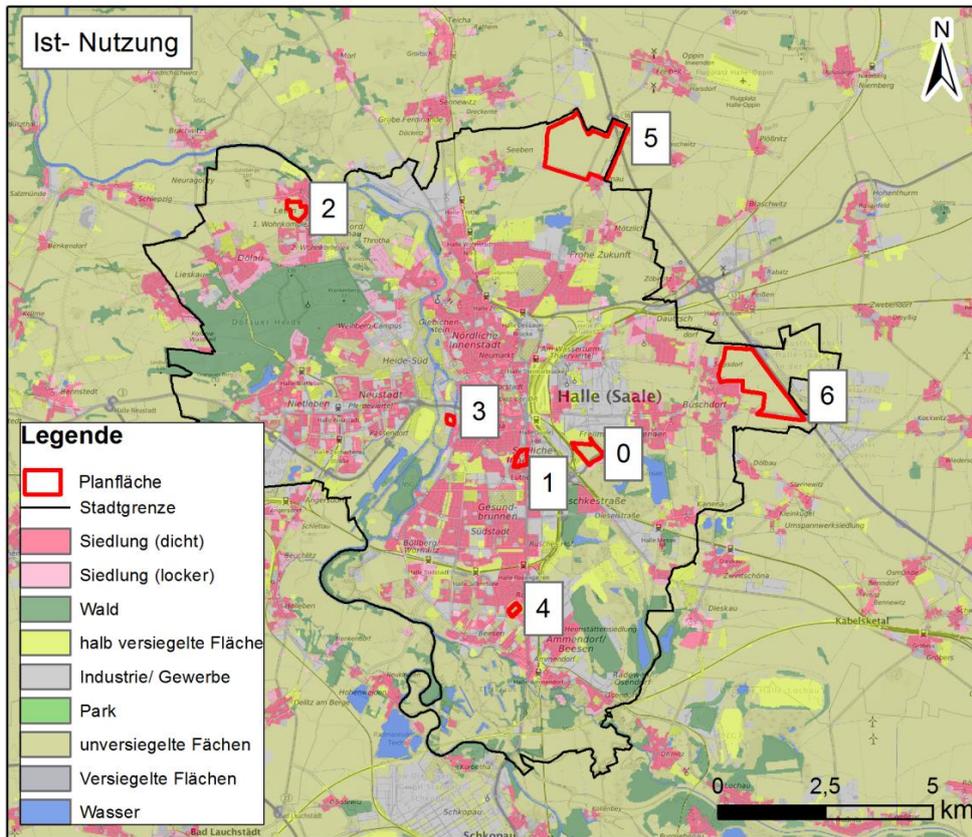


Abbildung 16: Flächennutzung um Halle (Saale) für den Ist- und Plan-Zustand

Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

Die größten Abweichungen vom Istzustand treten zu Beginn der simulierten Strahlungsnacht, während der ersten Nachthälfte, auf. In diesem Zeitfenster spielt der Einfluss der Oberflächenrauigkeit noch eine vergleichsweise erhebliche Rolle. Dieser wird jedoch relativ rasch im Verlauf der Strahlungsnacht und mit Anwachsen der Kaltfluthöhe nachlassen. Daneben machen sich die Veränderungen der Landnutzung im Plan-Zustand vor allem bei der lokalen Kaltluftproduktion bemerkbar. Flächen, die im Ist-Zustand vergleichsweise viel Kaltluft produziert haben (z. B. Acker, Grünland, Wiese), fallen im Plan-Zustand durch Umwidmung in Flächen (Industrie-, Gewerbe-, Wohnbebauung), deren Kaltluftproduktion gegen Null geht, weg (im Folgenden auch als Erwärmungsflächen bezeichnet). Zugleich stellt die neue Bebauung ein Strömungshindernis dar. Es ist über den Plangebieten zumeist mit einer Herabsetzung der lokalen Kaltluftproduktion zu rechnen, v. a. im Bereich von Flächen mit geplantem Bebauungszuwachs. Anfängliche negative Entwicklungen werden sich im Plan-Zustand, einmal abgesehen vom Bodenniveau, allmählich im Verlauf der simulierten Nacht – über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelt – näherungsweise aufheben.

3 Fahrgastbefragung

In der Zeit vom 20. bis 22. Juni 2016 wurde die Befragung durch 7 Beschäftigte des DWD, 6 Azubis der Halleschen Verkehrs AG (HAVAG) und eine Studentin der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU) realisiert (Teilbericht 3). Aus rechtlichen und arbeitsorganisatorischen Gründen kam für die Durchführung lediglich ein Zeitfenster von 07:00 bis 20:00 Uhr in Frage. Die erhobenen Daten wurden im Nachgang der Befragung im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit digitalisiert und statistisch ausgewertet.

Resümierend kann festgehalten werden, dass die Befragungsbedingungen hinsichtlich der Witterung nicht optimal gewesen sind. Am ersten Tag herrschte keine Wärmebelastung im Untersuchungsraum vor. Erst am zweiten und dritten Befragungstag stellte sich im Laufe des Tages eine schwache bis mäßige thermische Belastung ein. Eine Verschiebung der Befragung war jedoch nicht möglich, denn der Termin war an weitere unumgängliche Bedingungen geknüpft. Generell besitzen die Resultate daher nur für den Befragungszeitraum mit seinen Witterungsbedingungen Gültigkeit. Sie liefern erste Erkenntnisse zum thermischen Empfinden von Fahrgästen innerhalb von Straßenbahnen für schwache thermische Belastungssituationen.

Insgesamt wurden im weiter o. g. Zeitraum 1.367 Straßenbahnfahrgäste befragt. Damit wurde das angestrebte Ziel weit übertroffen. Es kann davon ausgegangen werden, dass aus der Halleser Stichprobe brauchbare Ergebnisse abgeleitet werden konnten. In 8 Fällen davon musste das Interview abgebrochen werden. Letztlich gingen 1.359 Fragebögen in die Auswertungen ein.

Es konnte nachgewiesen werden, dass das thermische Empfinden in der Straßenbahn an den Tagesgang der Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet gekoppelt ist. Morgens, wenn die Lufttemperatur langsam ansteigt, ist die gefühlte thermische Belastung in der Straßenbahn noch gering. Sie steigt im Tagesverlauf mit der Lufttemperatur an (Abbildung 17). Während die Lufttemperatur in den Abendstunden bereits etwas zurückgeht, „hinkt“ die thermische Belastung ihr etwas hinterher. Folglich verschob sich das thermische Empfinden im Verlauf des Tages mit zunehmender Außentemperatur (gemessen, hier Mittelwert über den Gesamtzeitraum) von *angenehm* über *etwas zu warm*, *zu warm* bis hin zu *viel zu warm*. Die Auswertungen ergeben weiterhin, dass auch die Schätzwerte der Innentemperatur für alle thermischen Empfindungsklassen i. d. R. mit dem Tagesgang der Lufttemperatur progressiv höher ausfielen.

Die Auswertungen nach ausgewählten individuellen Determinanten ergaben, dass die Fahrgäste die thermischen Bedingungen mit zunehmendem Alter *angenehm* empfanden. Hinsichtlich des Geschlechtes konnten keine signifikanten Unterschiede im thermischen Empfinden festgestellt werden. Wohingegen sich die Bekleidung in Abhängigkeit von ihrem Grad umgekehrt proportional zur thermischen Belastung verhielt. Diejenigen Fahrgäste die sommerlich bekleidet waren, haben die thermischen Bedingungen in der Straßenbahn als *etwas zu warm* empfunden.

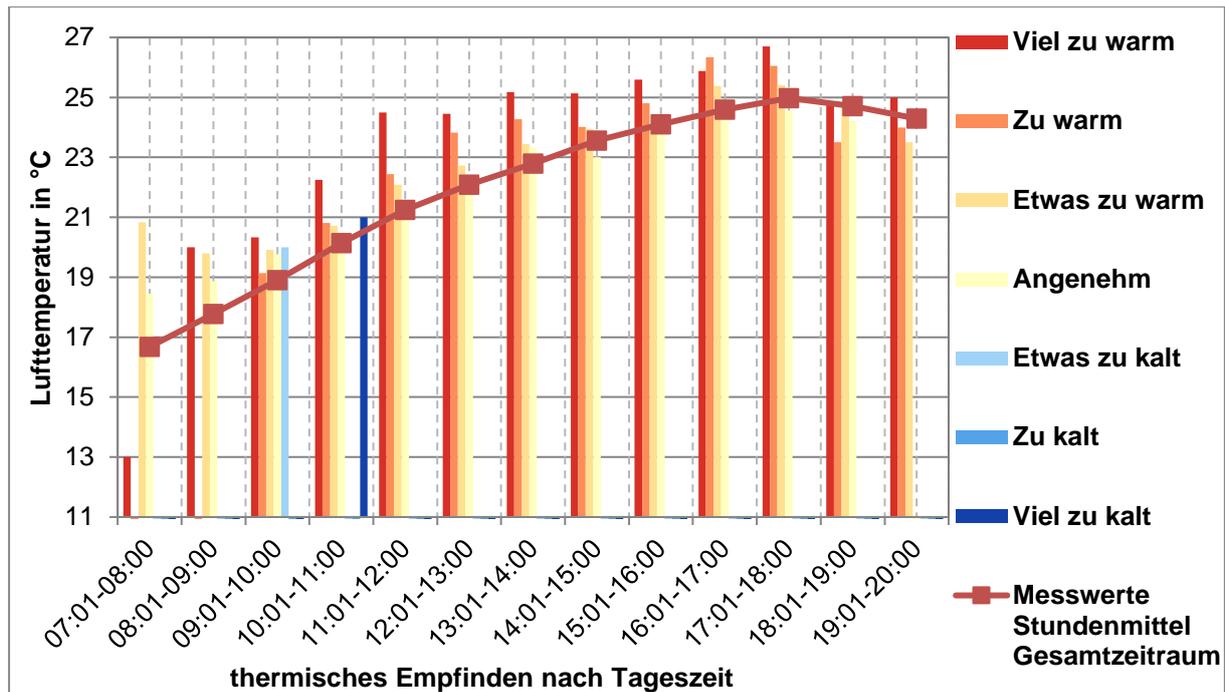


Abbildung 17: Schätzwerte der Lufttemperatur (außen) in Abhängigkeit vom thermischen Empfinden in der Straßenbahn im gesamten Befragungszeitraum vom 20. - 22.06.2016, (n = 1.359)

Je wärmer es draußen war und je länger die befragten Fahrgäste auf die Straßenbahn gewartet hatten, desto mehr wurden die thermischen Bedingungen in der Straßenbahn von ihnen als *etwas zu warm* empfunden. Die Fahrgäste empfanden die thermischen Bedingungen in der Straßenbahn als *viel zu warm*, je mehr Passagiere sich zum jeweiligen Befragungszeitpunkt im Fahrgastraum befanden.

Abschließend bleibt zu vermuten, dass auf Grund der anfänglich fehlenden und sich im weiteren Verlauf ergebenden mäßigen thermischen Belastung an den Befragungstagen, die Antworten nicht wie erwartet ausgefallen sind. Die gesonderte Betrachtung des 22.06.2016 im Vergleich zum Gesamtzeitraum deutet ansatzweise darauf hin. Bei stärkerer thermischer Belastung im Befragungszeitraum hätte sich der Einfluss der situativen Determinanten, Auslastung der Straßenbahn und Hektik, neben den individuellen Determinanten, Bekleidung und Alter, vermutlich stärker im thermischen Empfinden der Fahrgäste niedergeschlagen.

4 RayMan

Zur Berechnung der thermischen Belastung (Hitzebelastung auf den menschlichen Organismus) in Hallenser Straßenbahnen wurde das eindimensionale Modell RayMan Pro genutzt.

Die thermophysiologische Belastungssituation in der Straßenbahn wird über den human-biometeorologischen Index PET (physiologisch äquivalente Temperatur) und PT (gefühlte Temperatur) beschrieben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Thermisches Empfinden, Gefühlte Temperatur und entsprechende thermophysiologische Belastung sowie thermischer Komfort*

Thermisches Empfinden	Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)	Gefühlte Temperatur (PT)	Thermophysiologische Belastung
Sehr kalt	4 °C	< -39 °C	Extreme Kältebelastung
Kalt	8 °C	-39 °C bis < -26 °C	Starke Kältebelastung
Kühl	13 °C	-26 °C bis < -13 °C	Mäßige Kältebelastung
Leicht kühl	18 °C	-13 °C bis <0 °C	Schwache Kältebelastung
Komfortabel	20 °C	0 °C bis +20 °C	Keine thermische Belastung
Leicht warm	23 °C	> +20 °C bis +26 °C	Schwache Wärmebelastung
Warm	29 °C	> +26 °C bis +32 °C	Mäßige Wärmebelastung
Heiß	35 °C	> +32 °C bis +38 °C	Starke Wärmebelastung
Sehr Heiß	41 °C	> +38 °C	Extreme Wärmebelastung

*Tabelle: gestaltet nach KAUNZNER 2017, S. 14, TINZ, JENDRITZKY 2014, S. 2; KUTTLER 2004b, S. 270

Die Simulation der thermischen Belastung in der Klimatram für den Zeitraum der durchgeführten Fahrgastbefragung vom 20.-22.06.2016 ergab, dass während des Großteils der Befragungszeit keine (19 %) bis schwache (46 %), thermische Belastung vorherrschte (Abbildung 18). Erst am zweiten und dritten Befragungstag ergab sich im Tagesverlauf eine schwache bis mäßige Wärmebelastung. Kurzzeitig wurde starke Wärmebelastung erreicht (3 %). Dieses Ergebnis passt gut zu den Stations- und Straßenbahnmesswerten, für die im selben Zeitraum ebenfalls keine bis hauptsächlich schwache und z. T. auch mäßige thermische Belastung festgestellt werden konnte.

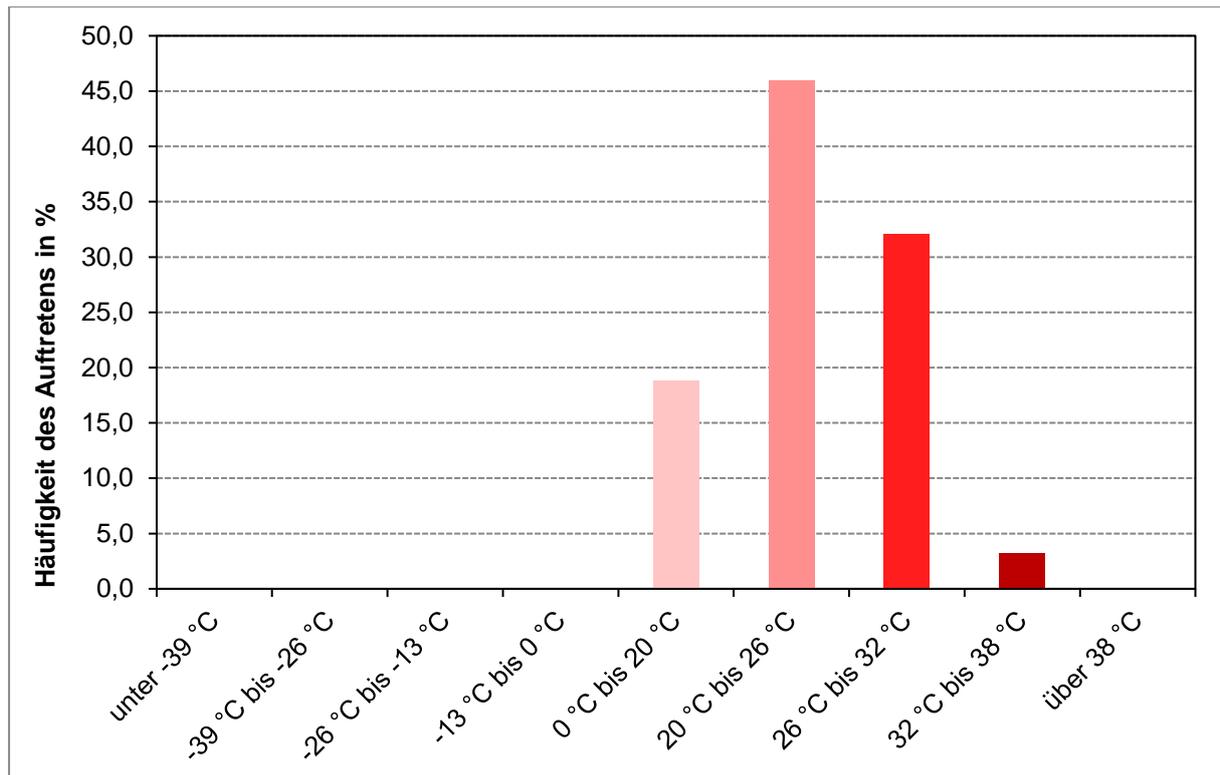


Abbildung 18: Thermische Belastungsstufen (Basis: berechnete gefühlte Temperatur (PT)) in der Klimatram (20.-22.06.2016)

Am Beispiel der Untersuchung einer sommerlichen Hitzeperiode (erste Juliwoche 2015) wurde mit RayMan untersucht, unter welchen thermischen Bedingungen die Fahrgäste die Hallenser Straßenbahnen nutzen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die innerhalb der Tram gemessenen Werte der Lufttemperatur und Globetemperatur (gefühlte Lufttemperatur) i. d. R. höher sind als die außen an der Straßenbahn und den Wetterstationen gemessenen Werte der Lufttemperatur und Globetemperatur. Die RayMan-Simulationen bestätigen dies (Abbildung 19). Folglich waren die Passagiere in der Straßenbahn einer verstärkten Wärmebelastung ausgesetzt, die zur bereits vorhandenen Hitze im Freien hinzukam.

Ferner konnte gezeigt werden, dass die Werte der PET und der gefühlten Temperatur in der Innenstadt höher und die Windgeschwindigkeit niedriger sind als im randstädtischen Bereich bzw. Umland der Saalestadt. Die gefühlte Temperatur in der Bahn ist im Zentrum höher, während sie niedriger wird, wenn die Bahn außerhalb der Innenstadt fährt.

PET und PT an und in der Straßenbahn zeigen an einem heißen Tag einen typischen Tagesgang, der sich hinsichtlich seines allgemeinen Verlaufs nicht wesentlich von dem der Lufttemperatur – gemessen an einer Wetterstation - unterscheidet. Die in der Tram simulierten Werte von PET und PT zeigen außerdem ab den späten Nachmittagsstunden im Vergleich zu den für außen berechneten Werten einen zeitlich deutlich verminderten Rückgang. Zudem erfolgt die Abkühlung der PET- und PT-Innenwerte auf wesentlich geringerem Niveau als für die PET- und PT-Außenwerte. In der Straßenbahn werden i. d. R. um 5 °C höhere PET- und PT-Werte gefühlt als außerhalb.

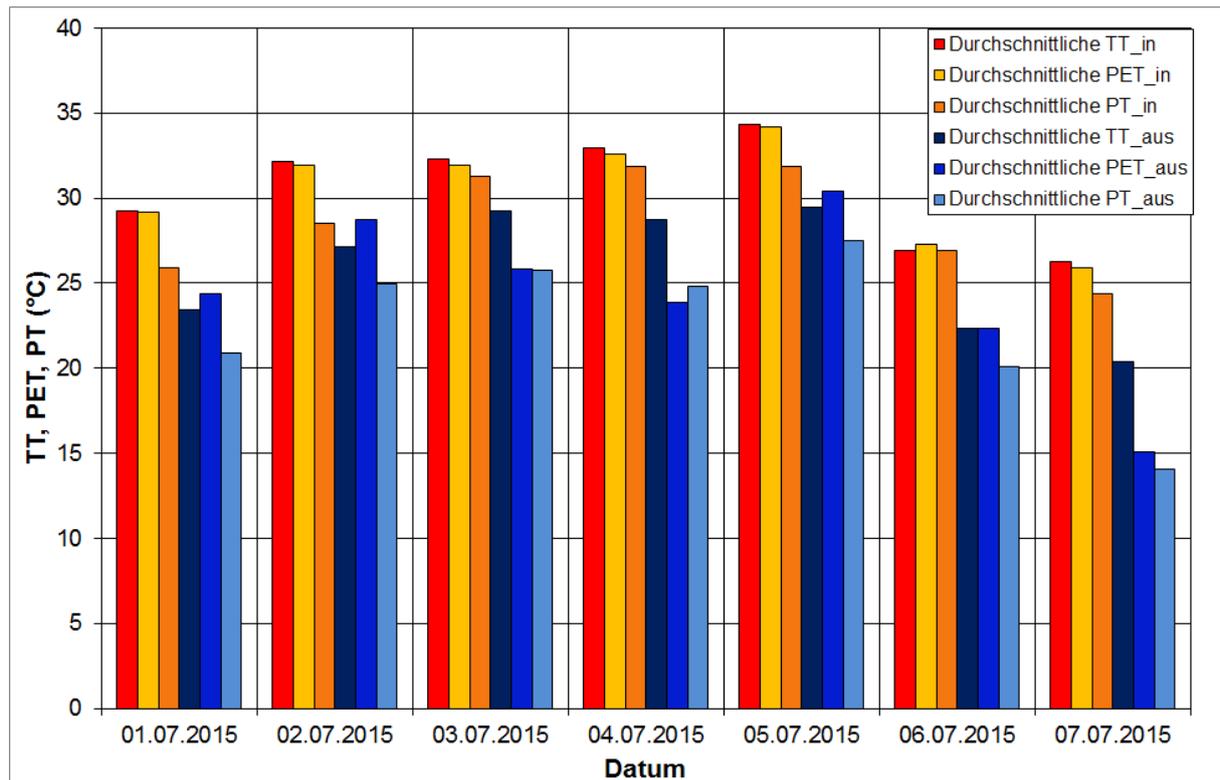


Abbildung 19: Durchschnittswerte der physiologisch äquivalenten Temperatur (°C) und der gefühlten Temperatur (°C) in der Zeitspanne vom 01.-07.07.2015 im Fahrgastinnenraum und außen an der Klimatram
Darstellung: FRANCESCHI, E., 2015

Insgesamt spiegeln die RayMan-Simulationen die mittels der Messungen und aus der Fahrgastbefragung gewonnen Erkenntnisse gut wieder.

5 MUKLIMO_3 – Simulationen

Eine Simulation wurde auf Basis der Beobachtungsdaten des 9. und 10. Juni 2014 gerechnet. In den Ergebnissen zeigen sich die erwarteten räumlichen Strukturen der städtischen Wärmeinsel (Abbildung 20).

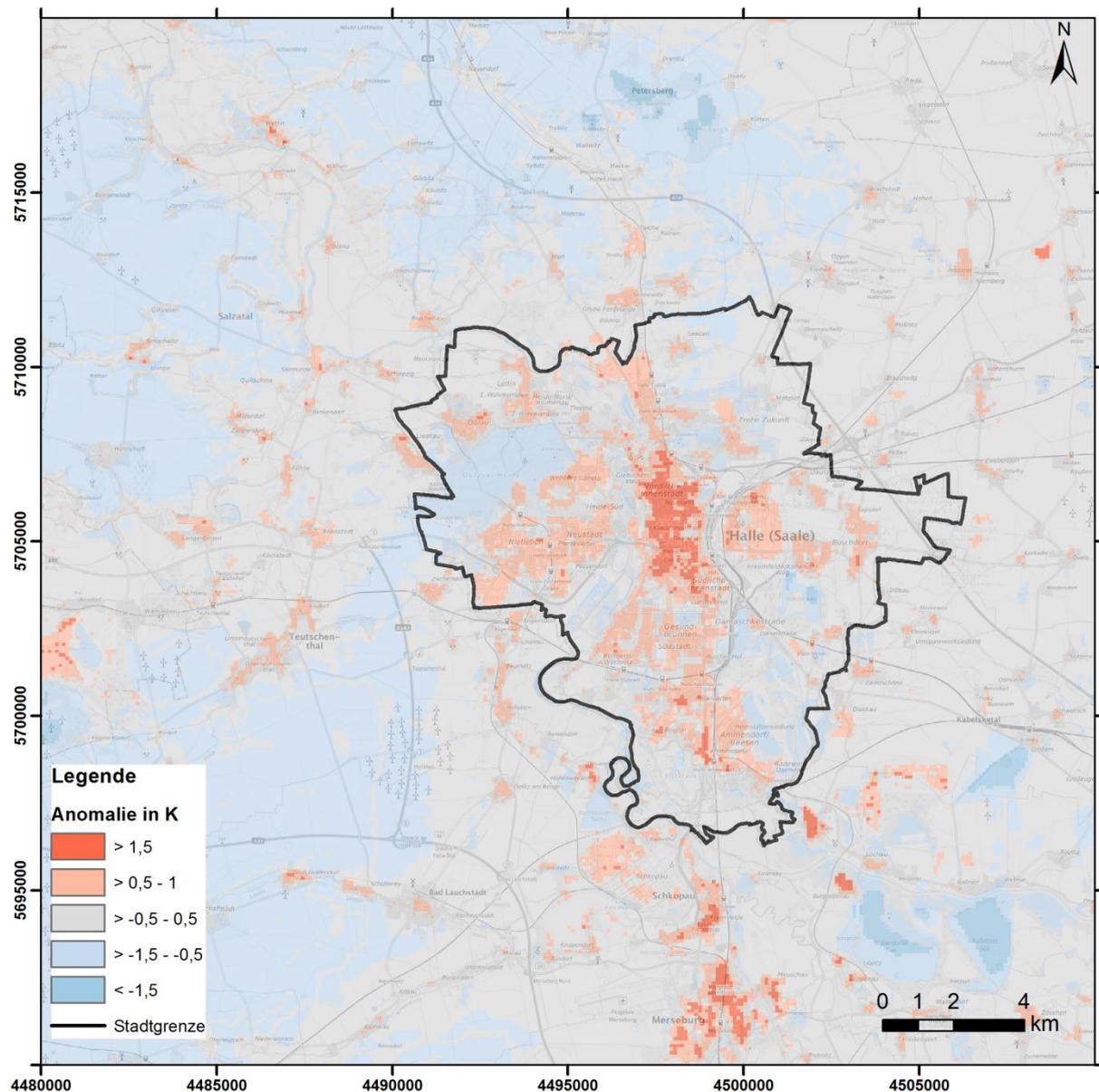


Abbildung 20: Anomalie der Lufttemperatur 2 m über Grund in Bezug zu Franzigmark um 15:00 Uhr MESZ für den 09. Juni 2014

Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

Die Auswertung der Simulationen für den Ist-Zustand (1971-2000) zeigt, dass die räumliche Variabilität der Klimaindizes im Stadtgebiet stark durch die Überlagerung der Auswirkungen der Bebauung (städtischer Wärmeinseleffekt) und der orographischen Einflüsse auf die Lufttemperatur geprägt ist.

Für diesen Zeitraum sowie auch für die Zukunft wurden außerdem Auswertungen für ausgewählte klimatologische Kenntage (*Sommertag* und *heißer Tag*) erstellt. Daraus ergab sich, dass die räumliche Variabilität der Klimaindizes im Stadtgebiet stark durch die Überlagerung der Auswirkungen der Bebauung (städtischer Wärminselekt) und der orographischen Einflüsse auf die Lufttemperatur geprägt ist (Abbildung 21).

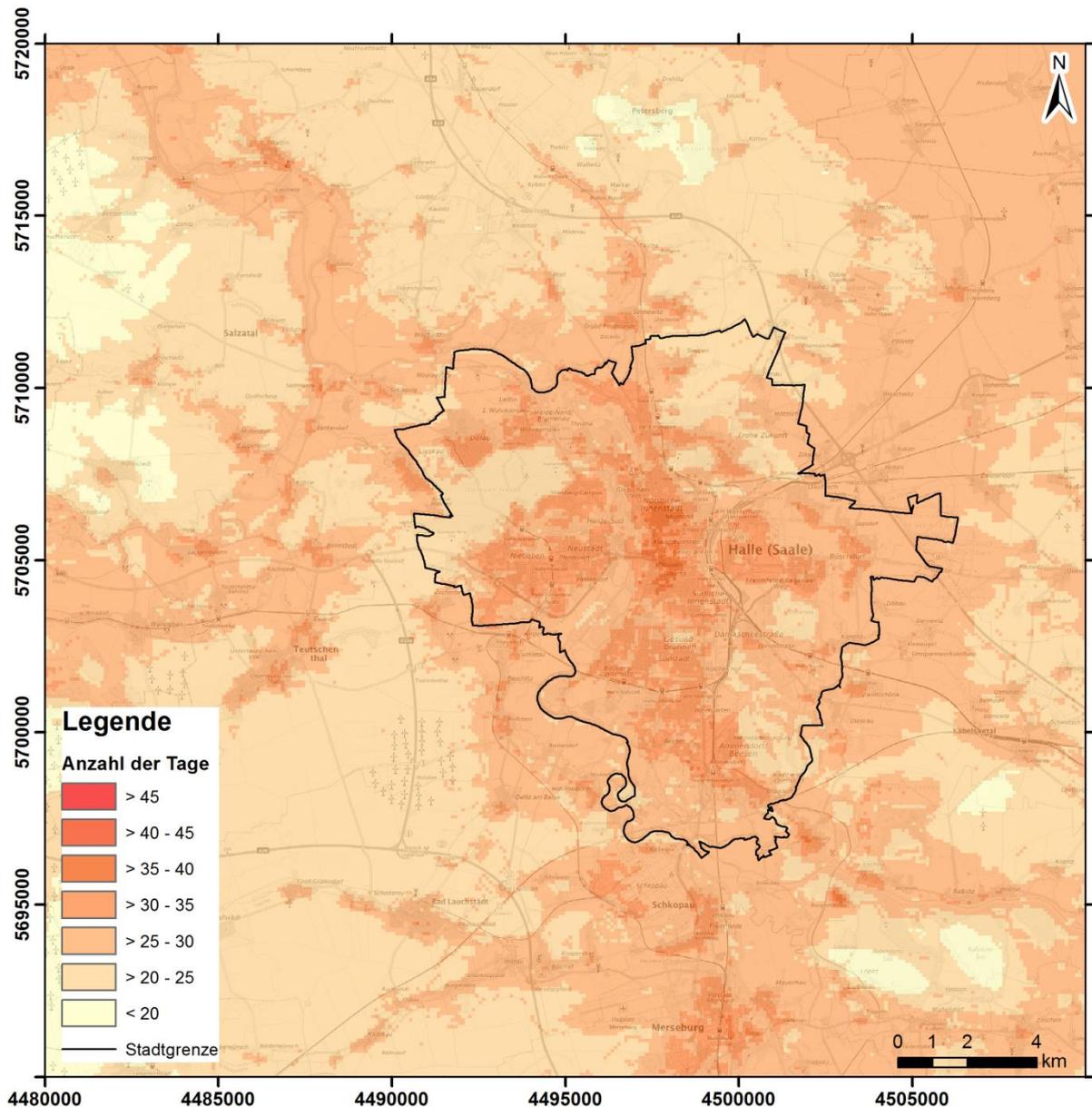


Abbildung 21: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage für den Evaluierungslauf 1971-2000
Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

Die Prüfung der Auswirkungen des Klimawandels auf die sommerlichen Temperaturverhältnisse von Halle (Saale) zeigte Folgendes:

In allen drei betrachteten Szenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) nimmt die Anzahl der Sommer- und heißen Tage über das gesamte Modellgebiet im nahen Zukunftszeitraum zu.

Die Betrachtung der Änderungen für die ferne Zukunft (2071-2100) zeigte eine deutlich stärker ausgeprägte Zunahme als im Vergleich zur nahen Zukunft (2031-2060). Das räumliche Muster zeigt jeweils eine höhere Zunahme im Innenstadtgebiet von Halle (Saale) als im Vergleich zum Umland.

Für die nahe Zukunft nimmt die Anzahl der Sommertage je Jahr gemittelt über das Stadtgebiet von RCP2.6 mit +5,3 Tagen über +8,2 Tage in RCP4.5 und von +13,3 Tagen in RCP8.5 zu (Median). Für die heißen Tage wird eine Zunahme von +0,52 Tagen/Jahr (RCP2.6), +1,12 Tagen/Jahr (RCP4.5) und +2,27 Tagen/Jahr (RCP8.5) berechnet.

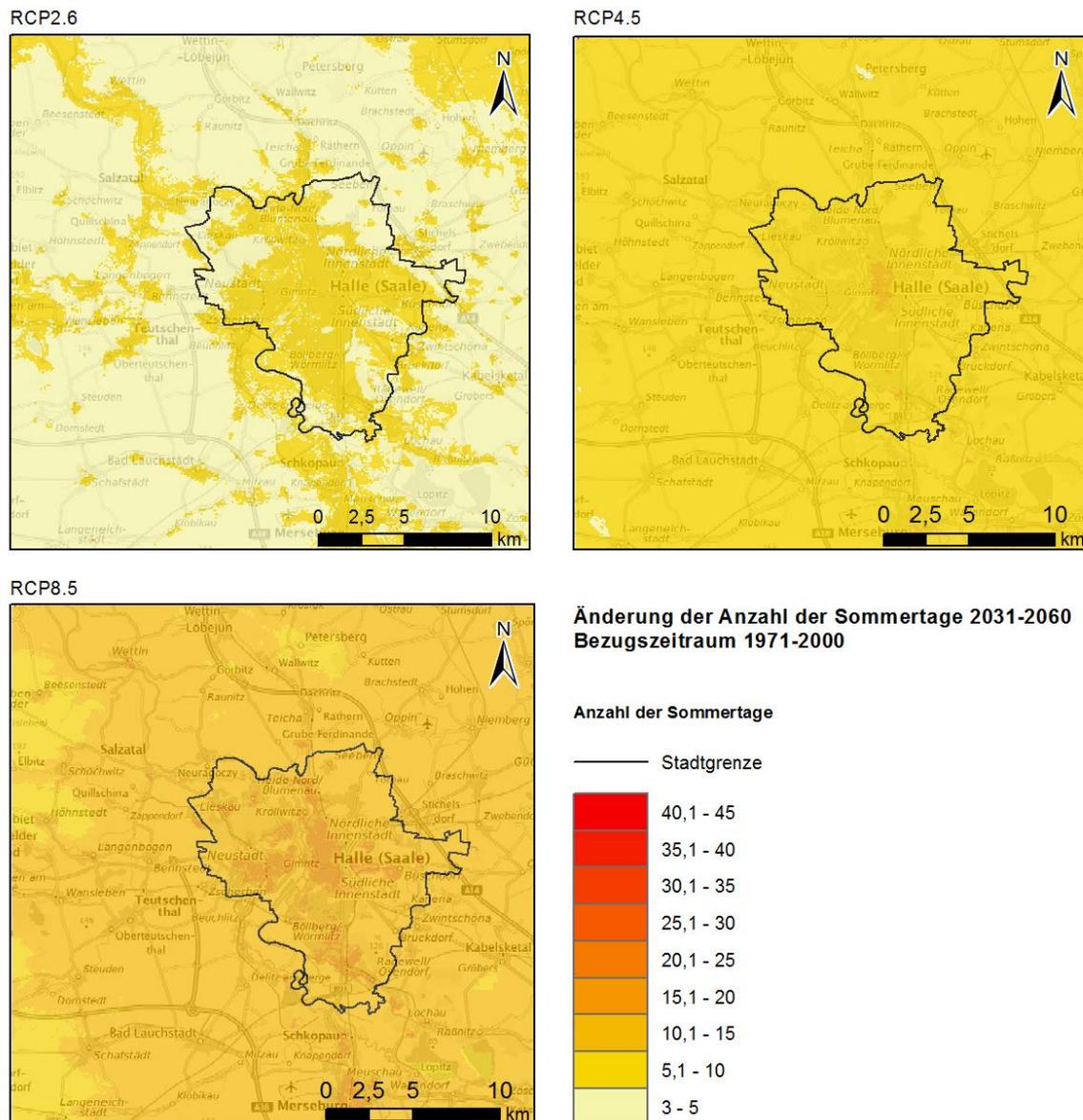


Abbildung 22: Median über das Modellensemble der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) als Differenz zwischen den Zeiträumen 2031-2060 und 1971-2000 für RCP2.6 (o. l.), RCP4.5 (o. r.), und RCP8.5 (u. l.).

Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

Die räumlichen Muster der Änderungen für die ferne Zukunft ähneln denen der Änderung in der nahen Zukunft, aber auf einem in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Emissionsszenarios mehr oder minder erhöhten Niveau. RCP2.6 und RCP4.5 zeigen mit einer über das Stadtgebiet gemittelten Änderung des Medianwertes des Modellensembles von +10,3 bzw. +13,1 Tage/Jahr eine recht ähnliche Zunahme der Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2071-2100, die dabei knapp unter dem Änderungswert für RCP8.5 in der nahen Zukunft (2031-2060) liegt. Dagegen zeigt RCP8.5 eine wesentlich deutlichere Zunahme der Anzahl der Sommertage zum Ende des Jahrhunderts – mit einer gemittelten Zunahme von +34,9 Tagen/Jahr (Abbildung 23). Über das Stadtgebiet gemittelt ergibt sich im Median über das verwendete Modellensemble eine Zunahme der Anzahl der heißen Tage von +2,1 Tagen/Jahr für RCP2.6, von +2,2 Tagen/Jahr für RCP4.5 und von +8,4 Tagen/Jahr für RCP8.5.

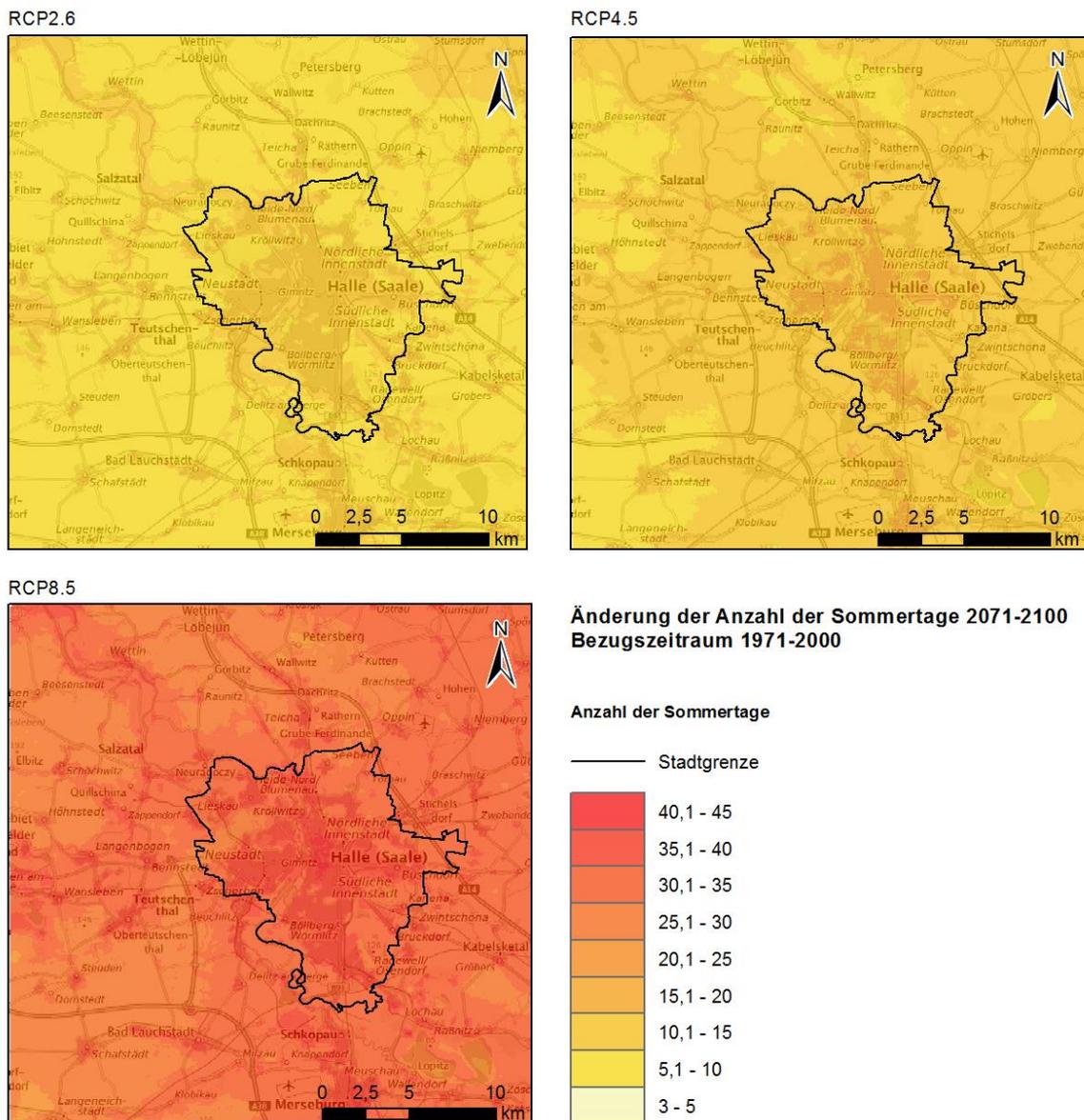


Abbildung 23: Median über das Modellensemble der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) als Differenz zwischen den Zeiträumen 2071-2100 und 1971-2000 für RCP2.6 (o. l.), RCP4.5 (o. r.), und RCP8.5 (u. l.).

Kartengrundlage: © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2019, Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_01.10.2017.pdf

Die Bandbreite zwischen den einzelnen Simulationen des Modellensembles ist sehr hoch (Abbildung 24).

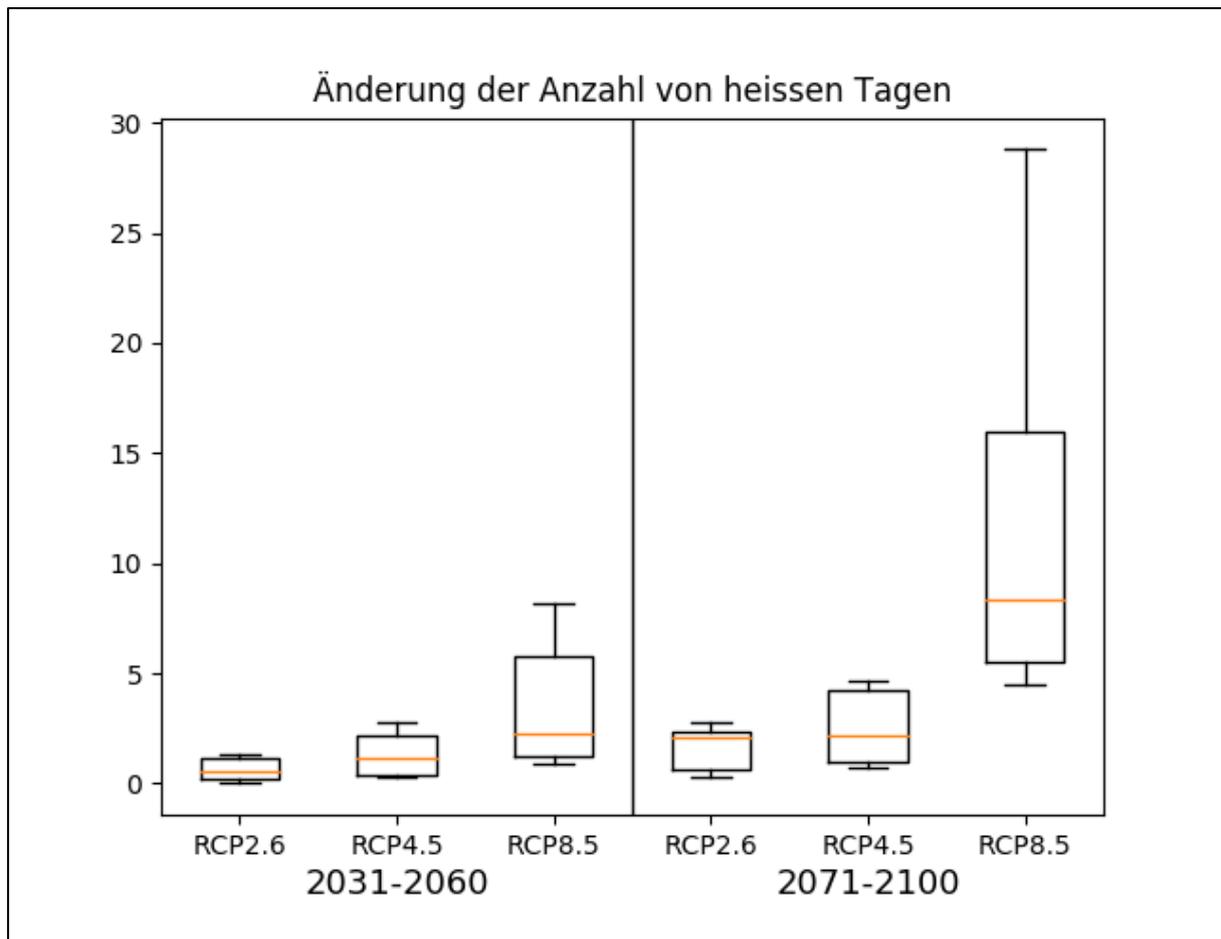


Abbildung 24: Box-Whisker-Plots der über das Stadtgebiet gemittelten Änderung der Anzahl von heißen Tagen $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ im Modellensemble für beide betrachtete Zukunftszeiträume für die drei betrachteten Emissionsszenarien

Abschließend zeigte sich, dass die Resultate der MUKLIMO_3-Simulationen für Halle (Saale) gut zu den Ergebnissen der temporären klimatologischen Messungen, die im Hallenser Stadtgebiet durchgeführt worden sind, passen. Die MUKLIMO_3-Simulationsergebnisse geben die mittels Messungen erfassten stadtstrukturbedingten Unterschiede bezüglich der Ausprägung der Lufttemperatur innerhalb der Saalestadt gut wieder.

Die Auswertung der Daten der Wetterstationen, Kfz- und straßenbahnbasierten Messungen ergab – wie auch die MUKLIMO_3-Simulationen, dass insbesondere die stark bebauten und versiegelten Innenstadtbereiche im Sommer thermisch belastet sind. Das Umland weist hingegen eine vergleichsweise gute abendliche Abkühlung auf.

Die Auswertung der langen Hallenser Klimadatenreihen zeigte eine Zunahme der Lufttemperatur seit Messbeginn. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich im Mittel die Klimaerwärmung in der Region Halle (Saale) manifestiert hat. Zukünftig wird aller Wahrscheinlichkeit nach mit einem weiteren Temperaturanstieg in der Region zu rechnen sein. Darauf deuten die Ergebnisse der MUKLIMO_3-Simulationen hin.

6 Schlussbemerkungen

Der vorliegende Synthesebericht reiht sich ein in die Riege älterer Veröffentlichungen zum Klima von Halle (Saale). Er stellt eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse aus fünf Teilberichten dar, in denen die einzelnen Untersuchungskomponenten des Stadtklimaprojektes inkl. Methodik, Vorgehen usw. ausführlich beschrieben sind.

Dieser Synthesebericht soll der Stadt Halle (Saale) eine aktuelle Grundlage für die Bearbeitung umweltrelevanter Fragestellungen hinsichtlich Energiewirtschaft, Heizungs- und Klimatechnik, Wasser-, Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Verkehrswesen, Stadt- und Regionalplanung (Überarbeitung des bestehenden Flächennutzungsplans) sowie zur Steuerung wetterabhängiger Abläufe bieten.

Stadtklimatische Belange unterschiedlichster Bereiche können auf Basis der im Rahmen des Stadtklimaprojektes erarbeiteten Erkenntnisse zur räumlichen Verteilung und zeitlichen Variation meteorologischer Einflussgrößen in Halle (Saale) besser bei neueren Planungsvorhaben berücksichtigt werden. Denn es wird nachfolgend nicht nur das vergangene und gegenwärtige Klima beschrieben und analysiert, sondern mit Blick auf den Klimawandel werden auch Aussagen zu den möglichen künftigen klimatischen Verhältnissen von Halle (Saale) getroffen. Somit lassen sich auch Katastrophenschutz und –vorsorge besser planen und adäquate Maßnahmen zum Schutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels ableiten.

Bei den ausgewerteten Ergebnissen der Modellsimulationen und temporären Messungen des vorliegenden Teilberichtes handelt es sich jeweils um eine Einzelfallstudie zu einer bestimmten Wetterlage. Es werden zeitliche, räumliche Ausschnitte der Realität betrachtet und in Kartendarstellungen wiedergegeben. Grenzen zwischen einzelnen Intensitätsangaben ausgewählter Ergebnisdarstellungen sollten nicht als starre Resultate interpretiert werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen können planerische Hinweise und Aussagen allgemeiner Art, die die Berücksichtigung des Hallenser Lokalklimas im Zuge übergeordneter Planungsverfahren betreffen, abgeleitet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Resultate dieses Berichtes ein standortbezogenes, mikroklimatisches Spezialgutachten nicht ersetzen können. Hierfür sind weiterführende, standortbezogene Untersuchungen erforderlich (Messungen und/oder hochaufgelöste Modellrechnungen).

Mit dem vorliegenden Synthesebericht sowie den zugehörigen fünf Teilberichten des Deutschen Wetterdienstes verfügt die Stadt Halle (Saale) über aktuelle Grundlagendaten. Die Berichtsergebnisse können genutzt werden, um eine unter der Fragestellung des vorbeugenden Katastrophenschutzes im Fall extremer Wetterereignisse und damit dem Klimawandel gerechte Planung zu forcieren. Die Daten stellen eine Basis für die Planung zur Entwicklung und Verwirklichung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und zum Schutz vor extremen Wetterereignissen dar, aber auch zur Abschätzung von sich künftig ergebenden Bedarfen und Herausforderungen mit Blick auf die Katastrophenvorsorge.

Die Berichtserstellung erfolgte gemäß dem derzeitigen Stand der Technik und des Wissens. Weiterführende Aussagen können dauerhafte, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messungen und/oder die Erstellung von Modellrechnungen (z. B. für bestimmte Wetterlagen) liefern.

Weiterführende Erkenntnisse können nur höher aufgelöste Modellrechnungen und / oder weitere Messungen (z. B. parallel an unterschiedlichen Punkten) und Befragungen liefern.

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Jahressummen der Niederschlagshöhe, Halle-Kröllwitz (1951-2014, ohne 1991, 2000)	13
Abbildung 2: Entwicklung der Jahressummen der Sonnenscheindauer, Bad Lauchstädt (1971-2000, ohne 1991)	13
Abbildung 3: Verlauf der mittleren monatlichen Tagesmittel, -maxima und -minima im Messzeitraum.....	15
Abbildung 4: Zeit-Höhen-Diagramm der Windrichtung (links) und Windgeschwindigkeit (rechts), Abwasserpumpwerk (Süd), 26.05.2014 (UTC)	16
Abbildung 5: Profilmessfahrt, 25.08.2016, früh Nord von 01:04 bis 02:10 Uhr UTC.....	17
Abbildung 6: Profilmessfahrt, 25.08.2016, früh Süd von 02:22 bis 03:09 Uhr UTC	18
Abbildung 7: Mittlere monatliche Temperaturanomalien (außen), 2015 – 2018, Halle (Saale)	19
Abbildung 8: Mittlere monatliche Temperaturanomalien (außen) ausgewählter Quadranten, 2015 – 2018, Halle (Saale).....	19
Abbildung 9: Vergleich der Überwärmung der Monate gemittelt über die 12 Quadranten ($\Delta T_{\text{Franziska}}$) nach Uhrzeiten für den Gesamtzeitraum 2015-2018	20
Abbildung 10: Vergleich der Überwärmung der 12 Quadranten ($\Delta T_{\text{Franziska}}$) während ausgewählter Uhrzeiten gemittelt über alle Monate im Gesamtzeitraum 2015-2018.....	20
Abbildung 11: Temperatur-Windrichtungsrosen 2015-2018 (links: Torstraße; rechts: Brandbergweg).....	21
Abbildung 12: Gegenüberstellung der im Fahrgastraum der Klimatram und außen an der Klimatram gemessenen Lufttemperatur.....	22
Abbildung 13: Lage der Stadt Halle (Saale) im KLAM_21-Modellgebiet und Geländehöhen in m über NN für den großen Gebietsausschnitt (75 km x 75 km) und den kleinen Gebietsausschnitt (30 km x 30 km).....	23
Abbildung 14: Kaltfluthöhe und Strömungsfeld (Höhenmittel) nach 1 Stunde Simulationszeit	24
Abbildung 15: Flächennutzung um Halle (Saale) für den Ist- und Plan-Zustand	26
Abbildung 16: Schätzwerte der Lufttemperatur (außen) in Abhängigkeit vom thermischen Empfinden in der Straßenbahn im gesamten Befragungszeitraum vom 20. - 22.06.2016, (n = 1.359).....	29

Abbildung 17: Thermische Belastungsstufen (Basis: berechnete gefühlte Temperatur (PT)) in der Klimatram (20.-22.06.2016).....	31
Abbildung 18: Durchschnittswerte der physiologisch äquivalenten Temperatur (°C) und der gefühlten Temperatur (°C) in der Zeitspanne vom 01.-07.07.2015 im Fahrgastinnenraum und außen an der Klimatram	32
Abbildung 19: Anomalie der Lufttemperatur 2 m über Grund in Bezug zu Franzigmark um 15:00 Uhr MESZ für den 09. Juni 2014	33
Abbildung 20: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage für den Evaluierungslauf 1971-2000	34
Abbildung 21: Median über das Modellensemble der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) als Differenz zwischen den Zeiträumen 2031-2060 und 1971-2000 für RCP2.6 (o. l.), RCP4.5 (o. r.), und RCP8.5 (u. l.).....	35
Abbildung 22: Median über das Modellensemble der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ($\Delta N_{T_{max} \geq 25}$) als Differenz zwischen den Zeiträumen 2071-2100 und 1971-2000 für RCP2.6 (o. l.), RCP4.5 (o. r.), und RCP8.5 (u. l.).....	36
Abbildung 23: Box-Whisker-Plots der über das Stadtgebiet gemittelten Änderung der Anzahl von heißen Tagen $\Delta N_{T_{max} \geq 30}$ im Modellensemble für beide betrachtete Zukunftszeiträume für die drei betrachteten Emissionsszenarien	37

V Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Thermisches Empfinden, Gefühlte Temperatur und entsprechende thermophysiologische Belastung sowie thermischer Komfort*	30
---	----

VI Ansprechpartner

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Anschrift: Deutscher Wetterdienst
Klima- und Umweltberatung
Güterfelder Damm 87-91
14532 Stahnsdorf

Projektleitung: Dr. Frank Kreienkamp
Tel. 069/8062-5416
E-Mail: klima.potsdam@dwd.de

Bearbeitung: Dipl.-Geogr. Kristin Hoffmann
Tel. 069/8062-5405
E-Mail: plga.potsdam@dwd.de

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU)

Anschrift: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
FG 33 Klima, Erneuerbare Energien, Nachhaltigkeit, Umweltallianz, Geschäftsstelle AG Klima
Reideburger Str. 47
06116 Halle (Saale)

Projektleitung: Dr. Christiane Röper
Tel. 0345/5704-500
Fax: 0351/2612-5099
E-Mail: Poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de

Stadt Halle (Saale)

Anschrift: Stadt Halle (Saale)
Geschäftsbereich Stadtentwicklung und Umwelt
Fachbereich Umwelt
Abteilung Umweltmanagement
Team Umweltvorsorge
Hansering 15
06108 Halle (Saale)

Projektleitung: Dr. Thomas Katterle
Tel. 0345/221-4672
E-Mail: umweltamt@halle.de

Hallesche Verkehrs-AG (HAVAG)

Anschrift: Freimfelder Straße 74
06112 Halle (Saale)

Projektleitung: Peter Kolbert
Projektmanager
Technik/Infrastruktur
Tel. 0345/581-5260
E-Mail: peter.kolbert@havaq.com