Stadt Leipzig

Leipzig Klimaanalyse – Phase II
Erweiterung der Planungshinweiskarte

Leipzig im Klimawandel

Detaillierte Kaltluftleitbahnanalyse

Klimatische Sanierungsbereiche

Besonders zu schützende Grünflächen

Konkrete Maßnahmenzuweisung für eine klimaangepasste Stadtentwicklung und -planung

Vorgelegt von:

Cornelia Burmeister

Peter Trute

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Stadt Leipzig

Amt für Umweltschutz, Stadtplanungsamt

Titelfoto: Herr Hannes Burkhardt AfU

Impressum

Herausgeber: Stadt Leipzig
Der Oberbürgermeister
Dezernat für Umwelt, Klima, Ordnung und Sport
Verantwortlich i.S.d.P.: Peter Wasem
Redaktion: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Cornelia Burmeister
Gestaltung: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Redaktionsschluss: 27.05.2021
Webseite zum Download: www.leipzig.de/stadtklima

Inhalt

Glossar	**VII**	
1	**Einleitung**	**10**
2	**Klima in Leipzig**	**12**
2.1	Ausgangssituation	14
2.1.1	Entwicklung der Mitteltemperaturen bis heute	14
2.1.2	Entwicklung der Maximumtemperaturen bis heute	16
2.1.3	Entwicklung der Minimumtemperatur	17
2.1.4	Entwicklung von Kenngrößen bis heute	18
2.2	Leipzig im Klimawandel	21
2.2.1	Methodik für die Ermittlung der zu erwartenden Klimawandelauswirkungen	21
2.2.2	Entwicklung von Kenngrößen unter Klimawandelbedingungen	24
2.2.3	Fazit und Klimazwilling für Leipzig in der Zukunft	28
2.2.4	Funktionale Auswirkungen des Klimawandels	29
3	**Prozessraumanalyse der Kaltluftleitbahnen**	**31**
3.1	Grundlagen für die detaillierte Kaltluftleitbahnanalyse	31
3.1.1	Methodik und Vorgehensweise der Kaltluftprozessraumanalyse	32
3.1.2	Erhalt und Vernetzung von für Kaltlufthaushalt relevante Flächen	34
3.2	Sekundäre Leitbahn I – Flächenhafter Kaltluftabfluss Lützschena, Lindenthal, Wahren	36
3.3	Kaltluftprozessraum II - Leitbahn Wiederitzsch, Eutritzsch	39
3.4	Kaltluftprozessraum III - Leitbahn Seehausen, Thekla, Mckau, Schönefeld	43
3.5	Kaltluftprozessraum IV - Leitbahn Heiterblick, Paunsdorf	47
3.6	Kaltluftprozessraum V - Leitbahn Zentrum Ost	50
3.7	Kaltluftprozessraum VI - Leitbahn Stötteritz, Volkmarsdorf	53
3.8	Kaltluftprozessraum VII - Leitbahn Prager Straße in Reudnitz	56
3.9	Kaltluftprozessraum VIII - Leitbahn Mölkau	59
3.10	Kaltluftprozessraum IX - Leitbahn Connewitz, Südvorstadt	62
3.11	Sekundäre Leitbahn X – Flächenhafter Kaltluftabfluss Lößnig	65
3.12	Sekundäre Leitbahn XI – Flächenhafter Kaltluftabfluss Schönau	68
4	**Klimatische Sanierungsbereiche**	**71**
4.1	Methodik der Ausweisung	71
4.1.1	Klimasanierungscluster	72
4.2	Vulnerable Bevölkerungsgruppen und Einrichtungen	73
4.3	Ergebnisse	75
5	**Besonders schützenswerte Grünflächen und ihre Aufwertung**	**78**
5.1	Methodik der Ausweisung	78
5.2	Ergebnisse	81
6	**Maßnahmen für eine klimaangepasste Stadtentwicklung und -planung**	**83**
6.1	M01 - Verschattung von Gebäuden	86

6.2	M02 - Dachbegrünung	93
6.3	M03 - Energetische Gebäudesanierung	97
6.4	M04 - Potenzialprüfung Entsiegelung	99
6.5	M05 - Durchgrünung	102
6.6	M06 - Erhöhung der Oberflächen-Albedo	105
6.7	M07 - Schaffung von frei zugänglichen Grünflächen	108
6.8	M08 - Förderung stadtgesellschaftlicher sozialer Netzwerke und Projekte	111
6.9	M09 - Vermeidung von Austauschbarrieren	114
6.10	M10 - Verschattung von Straßen, öffentlichen Plätzen, Gehwegen und Parkplätzen	118
6.11	M11 - Reduzierung der Mehrfachbelastung	123
6.12	M12 - Begrünung von Gleistrassen	126
6.13	M13 - Bewegte Wasserflächen im öffentlichen Raum schaffen	129
6.14	M14 - Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt in Grünflächen	132
6.15	M15 - Schutz bestehender großflächiger Parks	134
6.16	M16 - Schutz von Waldflächen	136
6.17	M17 - Schutz von offenen Wasserflächen	138
7	**Literaturverzeichnis**	**139**
8	**Anhang**	**143**
8.1	Leipzig im Klimawandel	143
8.1.1	Datengrundlage der Klimawandelergebnisse	143
8.1.2	Ergebnisse in Box-Whisker Plots	144
8.2	Karte: Prozessraumanalyse der Kaltluftleitbahnen	159
8.3	Karte: Besonders schützenswerte Grün- und Freiflächen und klimatischer Sanierungsbereich	161

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leipzigs Klimadiagramm für die Referenzperiode 1971 bis 2000. 13

Abbildung 2: Entwicklung der Mitteltemperaturen in Leipzig seit 1881. Quelle: Eigene Darstellung der DWD Grids 14

Abbildung 3: Räumliche Entwicklung der Mitteltemperatur innerhalb Leipzigs. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids. 15

Abbildung 4: Entwicklung der mittleren jährlichen Maximumtemperaturen in Leipzig seit 1900. Quelle: Eigene Darstellung der DWD Grids 16

Abbildung 5: Entwicklung der mittleren jährlichen Minimumtemperaturen in Leipzig seit 1900. Quelle: Eigene Darstellung der DWD Grids 17

Abbildung 6: Entwicklung der Anzahl an Sommertagen seit 1950 für Leipzig. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids. 18

Abbildung 7: Entwicklung der Anzahl der heißen Tage seit 1950 für Leipzig. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids 19

Abbildung 8: Entwicklung des jährlichen Niederschlages seit 1881 für Leipzig. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids. 20

Abbildung 9: Strahlungsantrieb der verschiedenen Representative Concentration Pathways (RCP) und ihre Entwicklung bis 2100. 22

Abbildung 10: Überblick über die Lage der 9 Gitterpunkte der verfügbaren EURO-CORDEX Ensembledaten. (Hintergrund: OSM) 23

Abbildung 11: Prinzip des Hangab- und Talwind in der Nacht. Quelle: Schönwiese 2013 31

Abbildung 12: Prinzipskizze Flurwind. Quelle: Eigene Darstellung 32

Abbildung 13: Vorgehen bei der Ausweisung der einzelnen Funktionsbereiche im Kaltluftprozessraum. 33

Abbildung 14: Nachttemperatur um 4 Uhr je Fitnah-Strukturtyp. Quelle: Eigene Darstellung 71

Abbildung 15: PET um 14 Uhr je Fitnah-Strukturtyp. Quelle: Eigene Darstellung 72

Abbildung 16: Statistische Auswertung des klimatischen Sanierungsbereiches nach Fläche [ha] (links) und nach Einwohnerdichte EW/ha (rechts). 75

Abbildung 17: Überblick über die räumliche Verteilung der Blöcke, die im klimatischen Sanierungsbereich liegen und eine Mehrfachbelastung durch vulnerable Gruppen und hoher Bevölkerungsdichte aufweisen. 77

Abbildung 18: Abfrageschema für den Tag 78

Abbildung 19: Abfrageschema für die Nacht 79

Abbildung 20: Überblick über die Aufwertung der besonders schützenswerten Grünflächen 80

Abbildung 21: Statistische Auswertung der besonders schützenswerten Grün- und Freiflächen nach Fläche. 81

Abbildung 22: Verdeutlichung und Möglichkeiten der Verschattung von Gebäuden. Quelle: (Rodríguez Castillejos et al. 2017, 50f) 87

Abbildung 23: Empfehlungen für Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier Fassadenbegrünung. Oberes Foto Kolonadenviertel in Leipzig, unten Erlangen, Untere Karlstraße 89

Abbildung 24: Gutes Beispiel für die Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier Sonnenschutzglas der Einkaufsgalerie „Höfe am Brühl“. 89

Abbildung 25: Empfehlungen für Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier Bäume. Tarostraße in Leipzig. (Foto: Hannes Burkhardt) 90

Abbildung 26: Empfehlungen für Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier bautechnische Gebäudeverschattung, Ostwald-Gymnasium in Leipzig. 90

Abbildung 27: Dachaufbau bei unterschiedlich ausgeführten Gründächern und ihre Kühlwirkung und Rückhaltung (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016, S. 27) 93

Abbildung 28: Gutes Beispiel einer Dachbegrünung mit Photovoltaikelementen in Dresden. (MVI 2012) 94

Abbildung 29: Gutes Beispiel für die Maßnahme 2 Dachbegrünung, hier die extensive Dachbegrünung auf der Gerda-Taro Schule in Leipzig. 95

Abbildung 30: Oberflächentemperaturen von Dachabdeckungen mit schwarzer Dachpappe, heller Kiesschüttung, hellem Anstrich und künstlich befeuchteten bzw. bepflanzten Substraten Quelle : Kuttler 2011, S. 5 95

Abbildung 31: Empfehlung für Maßnahme 3 „Energetische Gebäudesanierung“, links unsanierte Gebäude auf der Straße des 18. Oktober, rechts energetisch sanierte Gebäude auf der Ferdinand-Rohde-Straße in Leipzig. 97

Abbildung 32: Gutes Beispiel: Entsiegelte Fläche in Lüneburg. 99

Abbildung 33: Beispiel für eine Brachfläche in der Nähe des Bayrischen Bahnhofes in Leipzig, mit dem Potenzial des Rückbaus der Gebäude und Aufwertung zum Park. 100

Abbildung 34: Empfehlung für Maßnahme 5 „Durchgrünung“. Beispiel aus Hannover, Oststadt 102

Abbildung 35: Gutes Beispiel für die Maßnahme 5 Durchgrünung. Lageplan des St. Georg in Leipzig mit gut sichtbarem Parkareal und Baumstandorten. 103

Abbildung 36: Gutes Beispiel für die Maßnahme 6 „Erhöhung der Oberflächen-Albedo“, hier Tarostraße in Leipzig. 105

Abbildung 37: Brachfläche mit Mikroklimavielfalt am Bayerischen Platz. 108

Abbildung 38: Empfehlung für Maßnahme 7 “Schaffung von frei zugänglichen Grünflächen“, Berlin Rudolph-Wilde-Park. 109

Abbildung 39: Beispiele für Urban Gardening Projekte in Leipzig; hier: der Nachbarschaftsgarten in Leutzsch 111

Abbildung 40: Bebauungsvarianten am Hang, bei denen auch die Talströmung nicht behindert wird (links) und Barrieren-Bebauung am Hang (rechts) (Quelle: Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018, S. 35) 114

Abbildung 41: Kaltluftentstehungsgebiete im Leipziger Umland 115

Abbildung 42: Maßnahme 9 „Vermeidung von Austauschbarrieren“, hier der Friedenspark, der einen flächenhaften Kaltluftabfluss im Prozessraum Prager Straße in Reudnitz aufweist. 115

Abbildung 43: Gutes Beispiel: Begrünte Einkaufsstraße in Frankfurt Main 118

Abbildung 44: Gutes Beispiel für Maßnahme 10 „Verschattung von Straßen, öffentlichen Plätzen, Gehwegen und Parkplätzen“. Beispiel aus Leipzig Tarostraße/Straße des 18. Oktober, Parkplatz 119

Abbildung 45: Gutes Beispiel für eine Begrünung am Gehweg, Beispiel aus Kroatien 119

Abbildung 46: Gute Beispiele: Baumpflanzungen auf öffentlichem Platz links (ohne Ortsangabe) und im öffentlichen Raum entlang eines Gehweges rechts (Schillerstraße) 120

Abbildung 47: Gutes Beispiel für die Maßnahme M12 „Begrünung von Gleistrassen“, hier die Karl-Liebknecht Straße in Leipzig 126

Abbildung 48: Gutes Beispiel für Maßnahme 13 „Bewegte Wasserflächen im öffentlichen Raum schaffen“, links Springbrunnenanlage vor dem Ringcafé und rechts am Bundesverwaltungsgericht 129

Abbildung 49: Gute Beispiele für die Maßnahme 14 „Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt in Grünflächen“, links Friedenspark und rechts Grünfläche am Bundesverwaltungsgericht in Leipzig 132

Abbildung 50: Empfehlung für Maßnahme 15 „Schutz bestehender großflächiger Parks / Grünflächen“, hier Lenné-Anlage hinter der Moritzbastei. 134

Abbildung 51: Empfehlung für Maßnahme 16 „Schutz von Waldflächen“, ohne Ortsangabe. 136

Abbildung 52: Empfehlungen für Maßnahme 17 „Schutz von offenen Wasserflächen“. 138

Abbildung 53: Box-Whisker Plots und ihre Bedeutung. Quelle: Eigene Darstellung. 144

Abbildung 54: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für das RCP 2.6 145

Abbildung 55: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für das RCP 8.5 146

Abbildung 56: Langjährige Änderung der Maximum- und Minimumtemperatur für das RCP 8.5 147

Abbildung 57: Langjährige monatliche Änderung der Maximum- und Minimumtemperaturen im RCP 2.6 148

Abbildung 58: Anzahl an Tropennächten für die 30-jährigen Perioden für das RCP 2.6 und RCP 8.5. Hinweis: Hier ist die absolute Anzahl aller Tropennächte für 30 Jahre dargestellt. Im Fließtext unter Abschnitt 2.1.4 sind jährliche Werte genannt. 149

Abbildung 59: Langjährige Änderung der Anzahl der Sommertage für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5. Hinweis: Hier ist die absolute Anzahl aller Sommertage für 30 Jahre dargestellt. Im Fließtext unter Abschnitt 2.1.4 sind jährliche Werte genannt. 150

Abbildung 60: Langjährige Änderung der Anzahl heißer Tage für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5. 151

Abbildung 61: Langjährige Änderung der Länge von Hitzeperioden pro Jahr für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 152

Abbildung 62: Änderung der langjährigen mittleren monatliche Niederschlagssummen für Leipzig für das RCP 2.6 und 8.5. 153

Abbildung 63: Langjährige Änderung der klimatischen Wasserbilanz für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5 154

Abbildung 64: Langjährige Änderung der Länge der Vegetationsperiode für Leipzig für die 30-jährige Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5 155

Abbildung 65: Auftretenshäufigkeit von Hitzewellen im RCP 2.6 und 8.5 157

Abbildung 66: Monatliche Auftretenshäufigkeit von Hitzewellen in Leipzig für 30-jährige Zukunftsperioden für RCP 2.6 und 8.5. 158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammengefasste Ergebnisse für langjährige jährliche Klimaänderungen für ausgewählte Kenngrößen in Leipzig mit Gegenüberstellung zu Messergebnissen aus der Referenzperiode. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert der 30-jährigen Periode. 24

Tabelle 2: Indikator vulnerable Bevölkerungsgruppen im klimatischen Sanierungsbereich. Die Darstellung wird für den gesamten klimatischen Sanierungsbereich dargestellt und die Spalten mit einer hohen Anzahl an vulnerablen Gruppen verdeutlichen den besonderen Handlungsbedarf und sind in der Karte im Anhang 8.3 mit Schraffur dargestellt. 76

Tabelle 3: Statistik zu den besonders schützenswerten Grünflächen 81

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Aufwertung der Grün- und Freiflächen in Leipzig. 82

Tabelle 5: Empfehlungen zu raumeinheitenspezifischen Maßnahmen 83

Tabelle 6: Wirkung und Reichweiten von Verschattungselementen. Quelle: (Stadt Zürich) 91

Tabelle 7: Wirkung und Reichweiten bei dem Wechsel der Versiegelungsmaterialien. Quelle: (Stadt Zürich) 100

Tabelle 8: Wirkung und Reichweite der Maßnahme Erhöhung der Oberflächen-Albedo. Quelle: (Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018) 106

Tabelle 9: Auswirkungen von verschattenden Maßnahmen für die Tag- und Nachtsituation. Quelle: (Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018; Stadt Zürich) 120

Tabelle 10: Wirkung und Reichweite der Maßnahme Anlage von bewegten Wasserflächen schaffen. Quelle: (Stadt Zürich)(Stadt Zürich) 129

Tabelle 11: Momentan verfügbare Modellläufe der EURO-CORDEX Initiative. 19 Modellkombinationen, 58 Modellläufe, davon 39 Zukunftsläufe, Stand 03/2019. Quelle: Eigene Darstellung. 143

Tabelle 12: Ergebnisse für langjährige Klimaänderungen für Hitzewellen in Leipzig mit Gegenüberstellung zu Messergebnissen aus der Referenzperiode. Dargestellt ist der Mittelwert der 30-jährigen Periode. 156

Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

Ausgleichsraum: Grüngeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z. B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.

Autochthones Windfeld: Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch großräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z. B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland (kühler) und (dicht) bebauten Gebieten (→ *städtische Wärmeinsel)* entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Geostrophischer Wind: Der geostrophische Wind ist eine Einteilung des Windes nach den antreibenden Kräfteverhältnissen. Der geostrophische Wind tritt oberhalb der Bodenreibungsschicht auf, z. B. besonders stark ausgeprägt als Jetstream. Er wird angetrieben von der Druckgradientkraft (Luftbewegung vom Hoch- zum Tiefdruckgebiet) und abgelenkt durch die Corioliskraft.

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Unter-

grundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht.

Kaltluftabfluss: Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen und Straßen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden; Bezug ist der Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

Kaltluftentstehungsgebiete: Grün- und Freiflächen mit einer hohen Kaltluftproduktionsrate, die → *Kaltluftleitbahnen* speisen (→ *Flurwinde* zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden → *Kaltluftentstehungsgebiete* (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichströmungen (→ *Flurwinde*) sowie reliefbedingte → *Kaltluftabflüsse*.

Kaltluftvolumenstrom (KVS): Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht. In dieser Arbeit ist der betrachtete Querschnitt die Breite der Gitterzellen des Modellrasters (10 m).

Kelvin (K): Basiseinheit des internationalen Einheitssystems (SI) der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius (°C) interpretiert werden.

Kenntage: Darunter wird ein Tag verstanden, an dem ein festgelegter Grenzwert eines klimatischen Parameters (bspw. Temperatur) erreicht bzw. über- oder unterschritten wird. Zu den Kenntagen zählen z. B. ein Sommertag (Temperaturmaximum ≥ 25 °C) oder Heißer Tag (Temperaturmaximum ≥ 30 °C).

Klima: Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, der im Allgemeinen 30 Jahre beträgt, was als Nomalperiode bezeichnet wird. Das Klima gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder Gebiet wieder. Das Klima an einem Ort wird beschrieben über Mittelwerte, Extremereignisse und Häufigkeiten, etc. pp. (DWD).

Klimaanalysekarte (KAK): Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tage im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

Orographisch: beschreibt das Gelände morphologisch hinsichtlich seiner Hangrichtung und Hangneigung.

PET (Physiologisch äquivalente Temperatur)**:** Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte (PHK): Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als

→ *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

Rauigkeitslänge: Ein Maß für die Rauigkeit der Landoberfläche hinsichtlich der Strömung. Die Rauigkeitslänge ist die Höhe vom Boden, bei der die Windgeschwindigkeit null ist. Je größer die Rauigkeitslänge ist, desto höher ist der Körper (bspw. Baum, Haus), der die Windgeschwindigkeit auf null reduziert.

Rechengitter: gibt die Auflösung der Modellrechnung wieder. In diesem Fall ist das Rechengitter in 10 x 10 m Zellen aufgespannt. Das Rechengitter ist größer als die Stadt Leipzig und stellt ein Rechteck dar.

Referenzperiode: Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in welchem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind (WMO (World Meteorological Organisation)). Diese Referenzperiode wird in Beziehung Klimawandel gesetzt um die Veränderungen zu bestimmen.

Reliefenergie: Als Reliefenergie wird der Höhenunterschied zwischen höchstem und niedrigstem Punkt eines Gebietes, hier das Untersuchungsgebiet verstanden (Kuttler 2009). Je größer dieser Unterschied, desto höher ist die Reliefenergie.

Städtische Wärmeinsel (*Urban Heat Island*)**:** Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u. a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer → *autochthonen* W*etterlage*.

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Straße) aufgrund des Druckgradienten.

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

1 Einleitung

Die Klimakrise wirkt sich insbesondere in Städten auf das lokale Stadtklima aus, weshalb die Betrachtung der vor Ort vorherrschenden Situation von großer Bedeutung ist. Die Stadt Leipzig führt seit 1997 in regelmäßigen Abständen Stadtklimaanalysen durch. Um die von Hitze betroffenen Quartiere und die im funktionalen Zusammenhang stehenden ausgleichenden Grünflächen identifizieren und beide Aspekte einer Stadtentwicklung gleichermaßen zu berücksichtigen, hat sich die Stadt Leipzig dann mit dem Beschluss des Integrierten Stadtentwicklungskonzeptes (INSEK) dem Leitbild der Doppelten Innenentwicklung verschrieben, was neben der baulichen Entwicklung des Siedlungsbereichs auch die gleichzeitige Grünentwicklung im Fokus hat. Vor dem Hintergrund zunehmend intensiver und häufiger werdender Hitzeperioden und weiteren Wachstums unserer Stadt, ist das wesentliche Voraussetzung zum Erhalt der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse und damit aktiver Gesundheitsschutz. Die Stadtklimaanalyse liefert hierfür die Raumkulisse für eine zielgerichtete Maßnahmenumsetzung.

Die Klimaanalyse für die Stadt Leipzig wurde im Jahr 2017 bis 2019 erarbeitet und liefert die Grundlagen für die Einschätzung und Bewertung der Tag- und Nachtsituation für den Wirkbereich (Siedlungsflächen) und die Bedeutung des Ausgleichsraumes (Grünflächen). Neben zahlreichen Klimaparametern wie der Lufttemperatur um 4 Uhr oder 14 Uhr, der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET), dem Kaltluftvolumenstrom oder der Kaltluftproduktionsrate die durch eine Modellrechnung erzeugt wurden, entstanden Kartenprodukte wie die Klimaanalysekarten für den Tag und die Nacht und die Planungshinweiskarte. Diese erlauben es der Stadt Leipzig, Aussagen und Bewertungen zu stadtklimatischen Auswirkungen von Flächenentwicklungen und Verbesserungen für die Aufenthaltsqualität und Belüftung vor zu nehmen. Die methodischen Grundlagen, die verwendeten Eingangsdaten sowie die Ergebnisse der Analyse sind im Abschlussbericht der Phase 1 - Stadtklimaanalyse Leipzig 2019 enthalten (GEO-NET 2019). Der hohe Detaillierungsgrad der Klimaanalyse mit einer Auflösung von 10 m mal 10 m erlaubt es, Aussagen für die Flächennutzungs- und Bauleitplanung abzuleiten.

Der hier vorliegende Bericht, geht nun noch einen Schritt weiter. Zum einen wird ein Blick auf die klimatische Entwicklung in Leipzig, auch unter Einbezug des Klimawandels geworfen. Dazu gehört die Betrachtung der zurückliegenden Entwicklung (Vergangenheit bis heute) und eines Bündels aus Modellrechnungen, aus denen die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels für einzelne Kenngrößen wie Tropennächte, Heiße Tage oder Sommertage etc. abgeleitet werden (Zukunft, s. Kapitel 2). Aber auch die genauere Ausdifferenzierung der Kaltluftprozessräume (Einzugsgebiete der Kaltluftleitbahnen) wird vollzogen. Eine genauere Analyse erfolgt weiterhin zu aus Sicht des Stadtklimas problematischen, d.h. thermisch stark belasteten Siedlungsgebieten, dem klimatischen Sanierungsbereich. Als Gegengewicht werden die besonders schützenswerten Grünflächen herausgearbeitet. Alle erarbeiteten Schritte dienen dann der block- und grünflächenscharfen Zuweisung von Maßnahmen.

Die 11 identifizierten Prozessräume der Kaltluftleitbahnen in Leipzig werden in einer detaillierten Analyse in einzelne Funktionsbereiche wie Kaltluftentstehungsgebiet, primäre Leitbahn, Hindernisstrukturen oder Einwirkbereich untergliedert (siehe Kapitel 3). Das dient dazu, die Grünflächen besser zu schützen und evtl. Hindernisse abzubauen, so dass mehr Siedlungsbereiche von der Kaltluft profitieren indem sie durchströmt werden.

Das Kapitel 4 beschäftigt sich mit den klimatischen Sanierungsbereichen, also den Siedlungsflächen, die bereits jetzt eine hohe thermische Belastung aufweisen. Außerdem werden jene Siedlungsflächen markiert, die aktuell eine mittlere Wärmebelastung zeigen, von denen jedoch in der nahen Zukunft zu erwarten ist, dass sie unter Klimawandelbedingungen ebenfalls eine hohe thermische Belastung aufweisen.

Im Kapitel 5 werden die Grün- und Freiflächen herausgearbeitet, die besonders schützenswert sind. Zu diesen besonders schützenswerten Grünflächen zählen die Grün- und Freiflächen in den Kaltluftprozessräumen aber auch Grünflächen, die im fußläufigen Abstand zu thermisch belasteten Siedlungsräumen oder vulnerablen Bevölkerungsgruppen liegen und neben der Kaltluftlieferung in der Nacht am Tag der Erholung dienen.

Das letzte Kapitel 6 fasst dann die erarbeiteten Bausteine aus den vorhergehenden Kapiteln in Maßnahmenempfehlungen zusammen, die sowohl bei Neubebauungen als auch im Bestand zur Anpassung der Stadtentwicklung an den Klimawandel umgesetzt werden sollten. Diese Maßnahmen können

zu einer Verbesserung des thermischen Belastungsniveaus führen. Dabei handelt es sich um 17 Maßnahmen, die die Ebene der Gebäude, des Siedlungsraumes (Blöcke), sowie Grün- und Wasserflächen betreffen. Diese Maßnahmen reichen von der Empfehlung von Entsiegelungen hin zu Begrünungen wie Fassaden- oder Dachbegrünungen oder die generelle Durchgrünung von Blöcken, um die thermische Belastung in der Stadt zu reduzieren oder klimaökologisch bedeutsame Grünflächen zu schützen und aufzuwerten.

2 Klima in Leipzig

Klima ist definiert als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, der im Allgemeinen 30 Jahre beträgt. Das Klima gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder Gebiet im Jahresverlauf wieder und lässt langfristige Veränderungen erkennbar werden.

In diesem Kapitel wird als erstes die zurückliegende Entwicklung einzelner Klimakenngrößen in Leipzig bis in die Gegenwart dargestellt (Kapitel 2.1). Dies wird mithilfe von Stationsdaten des DWD Climate Data Centers, welche auf ein regelmäßiges 1 x 1km Gitter interpoliert werden, dargestellt (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst; Kaspar et al. 2017). Die räumliche Auflösung dieser Daten beträgt 1 x 1km und die zeitliche Auflösung umfasst jährliche Mittelwerte. Die ältesten Beobachtungsdaten reichen z. T. bis in das Jahr 1881 zurück. Dies trifft für die meteorologischen Variablen der jährlichen Mitteltemperatur und Niederschlagssumme zu. Minimum- und Maximumtemperaturen sind ab 1901 verfügbar und Daten der thermischen Kennwerte ab 1951. Die aus Stationsdaten erzeugten Gitterdaten weisen gewisse Unsicherheiten auf, welche aus einer über die Zeit veränderten Stationsdichte sowie der Lage der zur Interpolation der Daten verwendeten Stationen resultieren können. Weiterhin hat sich die Messtechnik im betrachteten Zeithorizont weiterentwickelt, sodass bei den älteren Zeitreihen höhere Messungenauigkeiten zu erwarten sind als bei den Zeitreihen jüngeren Datums. Für die hier durchgeführten Auswertungen und Betrachtungen ist die Genauigkeit der Daten jedoch vollkommen ausreichend und stellt eine solide Datenbasis dar.

Die durchgeführte Klimaanalyse für die Stadt Leipzig, anhand derer die Klimaanalysekarten und Planungshinweiskarte abgeleitet wurden, legt einen Sommertag als Bewertungsgrundlage zugrunde. Die Häufigkeit des Auftretens solcher Sommertage ist in der Abbildung 6 dargestellt, in der die vergangene Entwicklung bis heute (rezente Klimaentwicklung) dargestellt wird. Die Anzahl der Sommertage hat auch im Verlauf der Vergangenheit bis heute deutlich zugenommen. Das Jahr 2018 ist das Jahr mit der höchsten Anzahl an Sommertagen seit Messbeginn in Leipzig-Holzhausen. An der Station wurden im Jahr 2018 über 90 Sommertage in Leipzig gemessen. Im Mittel waren es 45 Sommertage in der Referenzperiode 1971 bis 2000.

Die Abbildung 1 zeigt das Klimadiagramm für die Referenzperiode 1971 bis 2000[1] in Leipzig, beruhend auf der DWD Station Leipzig-Holzhausen. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 9,8 °C und 604 mm Jahresniederschlag. Der höchste mittlere Wert der Maximumtemperatur liegt bei 24,1 °C und die geringste mittlere Minimumtemperatur ist mit -1,6°C für die Referenzperiode angegeben. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird auf die einzelnen Kenngrößen detaillierter eingegangen.

Nach der Analyse der zurückliegenden Klimaentwicklungen wird ein Blick in die *Zukunft* geworfen, indem Auswertungen der projektierten zukünftigen Entwicklungen unter den zu erwartenden Klimawandelbedingungen vorgenommen werden (Kapitel 2.2). Diese Darstellungen beruhen auf vielfältigen Klimamodellrechnungen für Europa und werden für den Raum Leipzig ausgewertet. Durch die Gegenüberstellung eines schwachen (RCP 2.6) und starken (RCP 8.5) Klimawandelszenarios, sollen die Möglichkeiten der zukünftigen Klimaentwicklung in Leipzig dargestellt werden.

Dabei geht das schwache Szenario RCP 2.6, was bekannt ist als das Pariser Klimaschutzabkommen aus 2015, von einem Anstieg der *globalen Mitteltemperatur* von maximal 2 °C bis 2100 aus. Dafür ist eine sofortige und massive Reduktion der von Menschen ausgestoßenen Treibhausgase erforderlich. Wahrscheinlicher ist nach der derzeitigen Entwicklung das starke Klimawandelszenario RCP 8.5, welches von gleichbleibenden bzw. steigenden Treibhausgasemissionen und einem Bevölkerungswachstum ausgeht und daher zu einer Erhöhung der *mittleren globalen Temperatur* von ca. 4,8 °C bis 2100 führen würde (DKRZ 2016). Die genannte mittlere globale Erwärmung ist die Temperaturdifferenz der Zukunftstemperaturen zum vorindustriellen Zeitraum (1850 bis 1900, (IPCC)).

---

[1] Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten 30-jährigen Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in welchem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die WMO (World Meteorological Organisation) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 bis 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten Regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt (siehe Kapitel 8.1.1), wurde der Zeitraum von 1971 bis 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt. Die aktuelle Periode 1981 bis 2010 ist wie die nachfolgenden Grafiken zeigen, bereits deutlich vom Klimawandel beeinflusst.

Die Tabelle 1 im Kapitel 2.2.2 verdeutlicht die *zukünftige zu erwartende Entwicklung* und fasst alle Werte für die Referenzperiode und die zwei Zukunftsszenarien zusammen. So ist bspw. abzulesen, dass die Anzahl der Sommertage zukünftig weiter zunehmen werden, bspw. um bis zu 44 Sommertage im „Weiter wie bisher"-Szenario 8.5 bis 2100. Der Sommer 2018 wäre dann mit der hohen Anzahl an Sommertagen ein üblicher Sommer der Zukunft im Jahr 2100 in Leipzig.

Um diesen bevorstehenden Veränderungen entgegenzutreten und sich anzupassen, können die erarbeiteten klimaökologischen Grundlagen für die Stadt Leipzig die derzeitige und auch zukünftige Hitzebelastung in der Stadt sehr gut beschreiben und verorten und zeigen damit die Handlungsschwerpunkte auf.

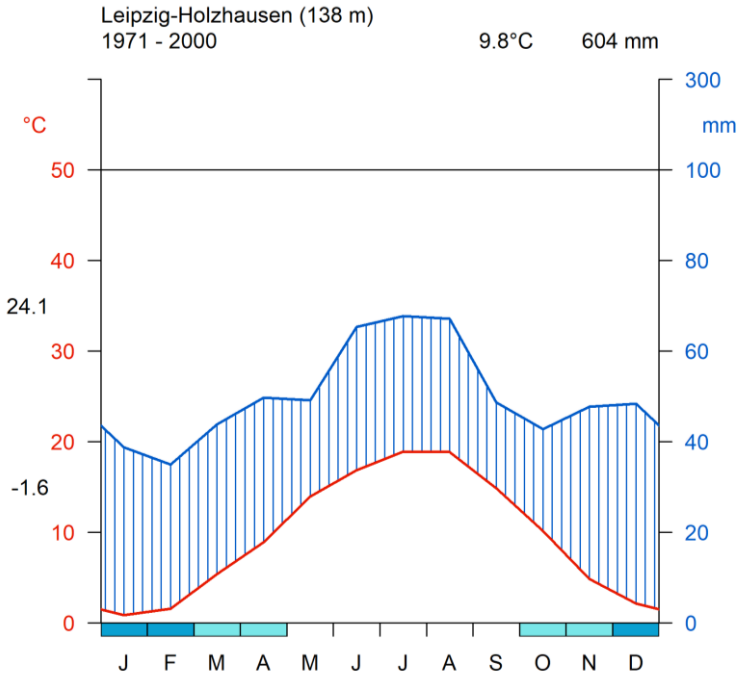


Abbildung 1: Leipzigs Klimadiagramm für die Referenzperiode 1971 bis 2000. Dargestellt ist auf der linken Achse mit der roten Kurve die mittlere Monatstemperatur in Leipzig. Auf der rechten Achse lässt sich die durchschnittliche Niederschlagshöhe (blau) ablesen. Die 24,1°C an der linken Achsenseite ist der höchste Wert der mittleren Maximumtemperatur, die -1,6 stellt den geringsten Wert der mittleren Minimumtemperatur dar. Die blauen und türkis-farbenen Balken an der x-Achse sind die humiden Monate (Niederschlag liegt über der Verdunstung).

Quelle: Eigene Auswertung der DWD Station Leipzig-Holzhausen 2928.

2.1 Ausgangssituation

2.1.1 Entwicklung der Mitteltemperaturen bis heute

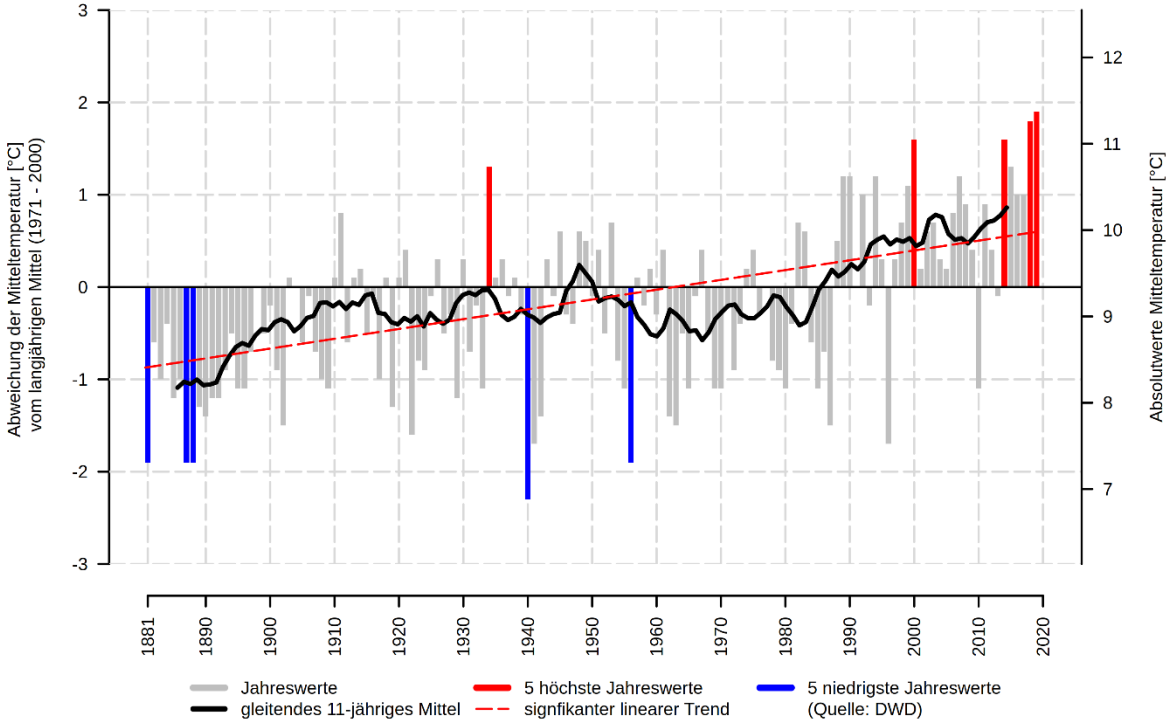


Abbildung 2: Entwicklung der Mitteltemperaturen in Leipzig seit 1881. Quelle: Eigene Darstellung der DWD Grids

In der Abbildung 2 ist die Entwicklung der Mitteltemperatur seit 1881 zu sehen. Dies entspricht der mittleren Jahrestemperatur. Auf der linken Achse ist die Abweichung der Jahresmitteltemperaturen zur Referenzperiode 1971 bis 2000 aufgetragen. Die rechte Achse stellt die Absolutwerte der Jahresmitteltemperatur dar. In der Grafik ist ein signifikanter linearer Trend zu verzeichnen (gestrichelte rote Linie). Das gleitende 11-jährige Mittel zeigt neben einem anfänglichen Anstieg ab Mitte der 1880er Jahre bis 1915, dann eher einen verharrenden Trend auf, um ab Mitte der 1980er Jahre bis jetzt wieder deutlich anzusteigen. Insgesamt ergibt sich ein deutlich zunehmender Trend der Leipziger Jahresmitteltemperaturen. Die 4 höchsten Jahreswerte sind im Jahr 2000, 2014, 2018 und 2019 zu finden. Im Jahr 2019 lag die Jahresmitteltemperatur bei ca. 11,3°C, was 1,8 °C Abweichung zur Referenzperiode bedeutet. Drei niedrige Jahresmittelwerte sind zu Beginn der Messungen vor 1890 zu finden. Im Jahr 1940 betrug die niedrigste gemessene Jahresmitteltemperatur in Leipzig unter 7°C. Entsprechend der Klimaprojektionen ist mit einem weiteren sehr deutlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 3,9 °C gegenüber der Referenzperiode bis zum Jahrhundertende in Leipzig für das Szenario RCP 8.5 auszugehen (siehe Kapitel 2.2.2, Tabelle 1).

In der Abbildung 3 ist die *räumliche* Verteilung der mittleren Jahrestemperatur für die Stadt Leipzig dargestellt und die Zunahme der Mitteltemperatur in der gesamten Fläche ersichtlich. Die Zunahme der Jahresmitteltemperatur ist im Raum flächiger, größer und homogener bis zur aktuellen Klimaperiode 1989 bis 2019 und nicht so ausdifferenziert. Teile des Innenstadtbereiches sind ab der Periode 1961 bis 1990 mit der höchsten Jahresmitteltemperatur deutlich zu identifizieren.

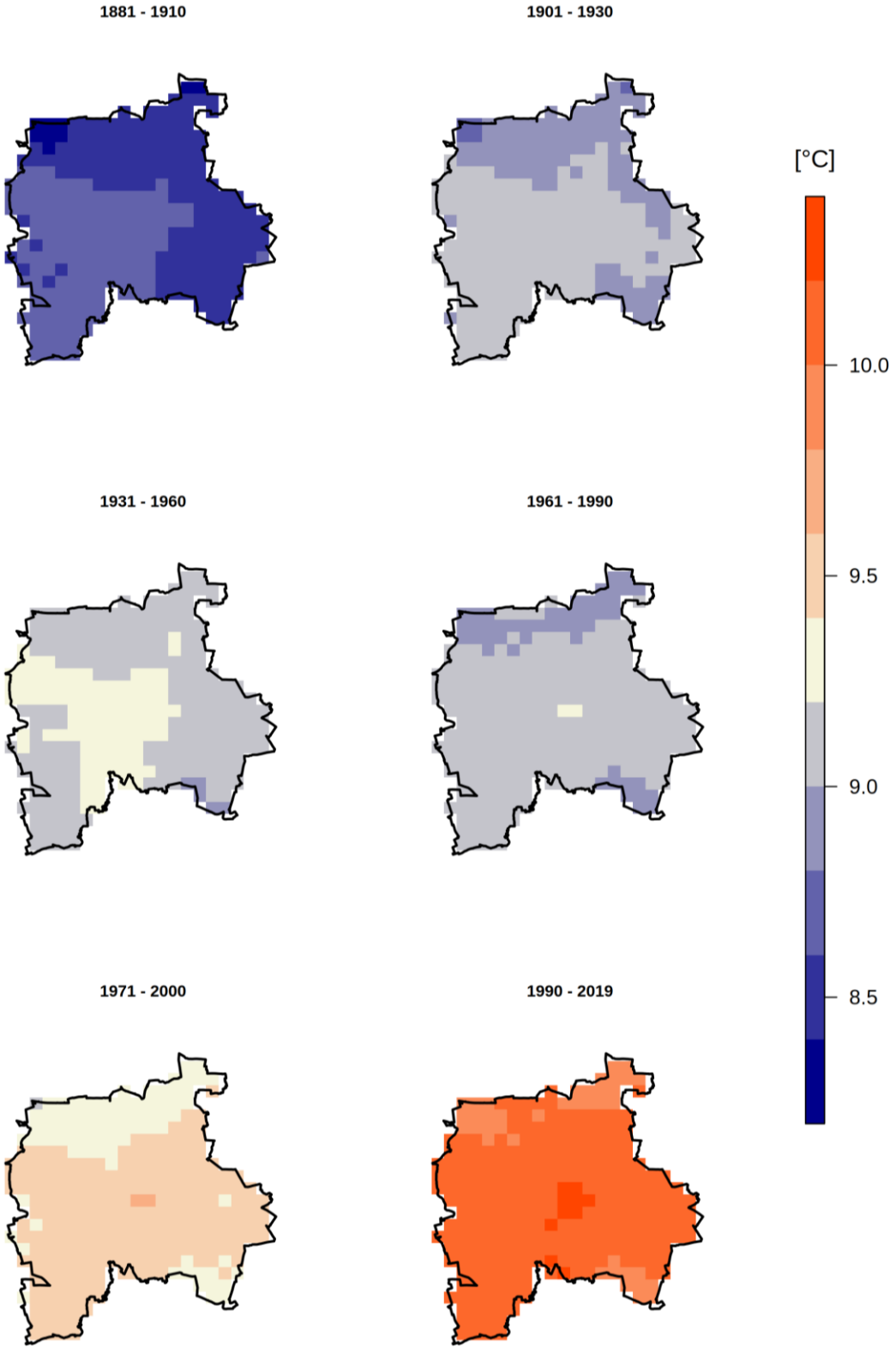


Abbildung 3: Räumliche Entwicklung der Mitteltemperatur innerhalb Leipzigs. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids[2].

[2] Die Klimaperioden variieren und überlappen sich in der Darstellung teilweise, da die Daten von 1891 bis 2018 verfügbar sind und jeweils als 30-Jahresmittelwerte eingruppiert und dargestellt werden. Die Periode 1881 bis 1910 stellt die Daten seit Beginn der Messungen vor. Die Klimanormalperiode ist diejenige von 1961 bis 1990. Die Periode 1971 bis 2000 ist die Referenzperiode, die für die Beschreibung des zu erwartenden Klimawandels zugrunde liegt. Die aktuelle Klimaperiode ist 1989 bis 2018.

2.1.2 Entwicklung der Maximumtemperaturen bis heute

In der Abbildung 4 ist die mittlere jährliche Maximumtemperaturentwicklung seit 1900 zu sehen. Diese Größe beinhaltet die übers Jahr gemittelten maximalen Temperaturen je Tag. Dabei spiegelt die linke Achse die Abweichung zur Referenzperiode 1971 – 2000 wider. Auf der rechten Achse kann der absolute Wert der jährlichen mittleren Maximumtemperatur der einzelnen Jahre abgelesen werden. Die Grafik zeigt, dass die mittlere Maximumtemperatur der Referenzperiode bei 13,7 °C liegt. Vier der fünf niedrigsten Jahreswerte liegen vor 1960, wohingegen die vier der fünf höchsten Jahreswerte der mittleren Maximumtemperatur nach 2013 liegen. Es ist ein zunehmender signifikanter Trend ersichtlich. Die Jahre 2018 und 2019 verzeichnen dabei mit einer mittleren Maximumtemperatur von 16,4 °C den höchsten Wert im gesamten Zeitraum. Das gleitende 11-jährige Mittel veranschaulicht eine positive Zunahme im Vergleich zur Referenzperiode ab Mitte der 1980er Jahre. Davor gab es einen Zeitraum von Mitte der 1950er Jahre bis zur Mitte der 1980er Jahre, bei dem der gleitende Mittelwert keinen langfristigen Aufwärts- oder Abwärtstrend aufzeigt.

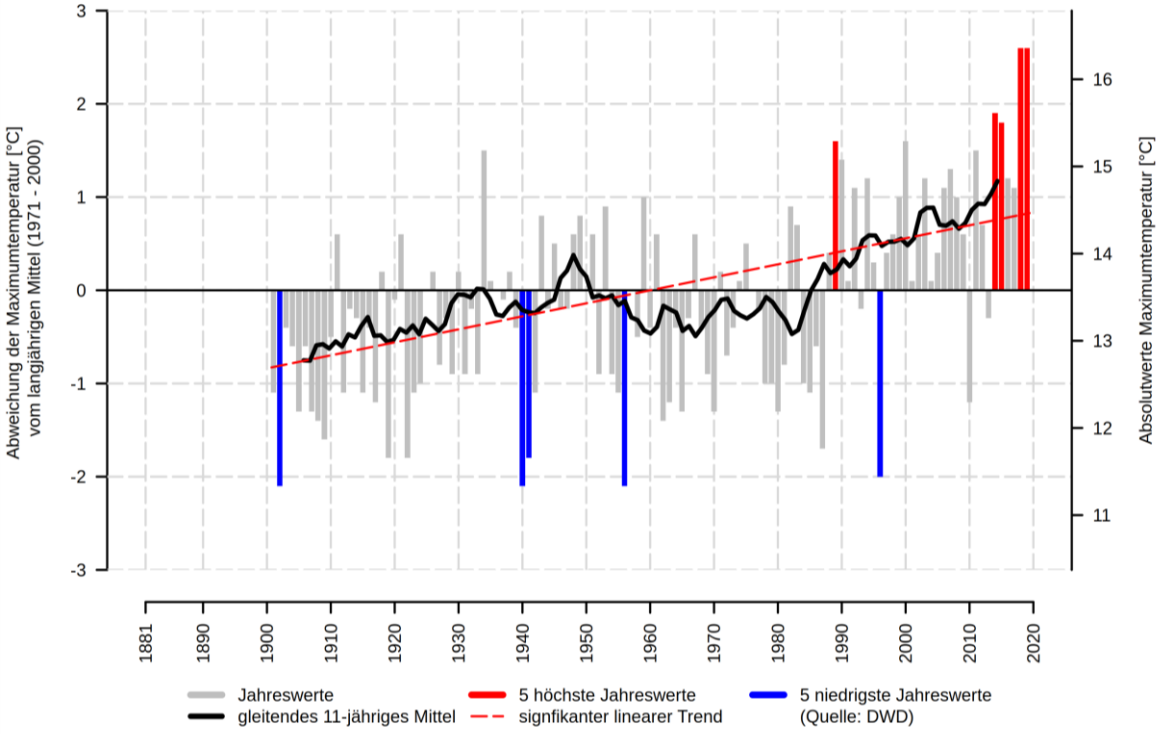


Abbildung 4: Entwicklung der mittleren jährlichen Maximumtemperaturen in Leipzig seit 1900. Quelle: Eigene Darstellung der DWD Grids

2.1.3 Entwicklung der Minimumtemperatur

In der Abbildung 5 ist die mittlere jährliche Minimumtemperaturentwicklung seit 1900 zu sehen. Diese Größe beinhaltet die über das Jahr gemittelten minimalen Temperaturen je Tag. Die linke Achse spiegelt die Abweichung zur Referenzperiode 1971 – 2000 wider. Auf der rechten Achse kann der absolute Wert der jährlichen mittleren Minimumtemperatur der einzelnen Jahre abgelesen werden.

IN der Grafik ist wiederum der signifikante positive Anstieg der Minimumtemperatur zu sehen (rot gestrichelte Linie). Das gleitende 11-jährige Mittel steigt seit Mitte der 1960er Jahre an. Vorher war kein Trend abzulesen. Die fünf Jahre mit der niedrigsten Minimumtemperatur sind vor 1960 zu finden, die niedrigste Minimumtemperatur lässt sich dabei im Jahr 1940 mit 2,6 °C finden. Die fünf Jahre mit der höchsten Jahresminimumtemperatur sind alle nach 1989 gemessen worden. Dabei kam es zu Abweichungen von der Referenzperiode von maximal +1,5 °C im Jahr 2001 mit 7,2°C. Die letzten Jahre lagen alle über dem mittleren Wert der Referenzperiode (5,6 °C).

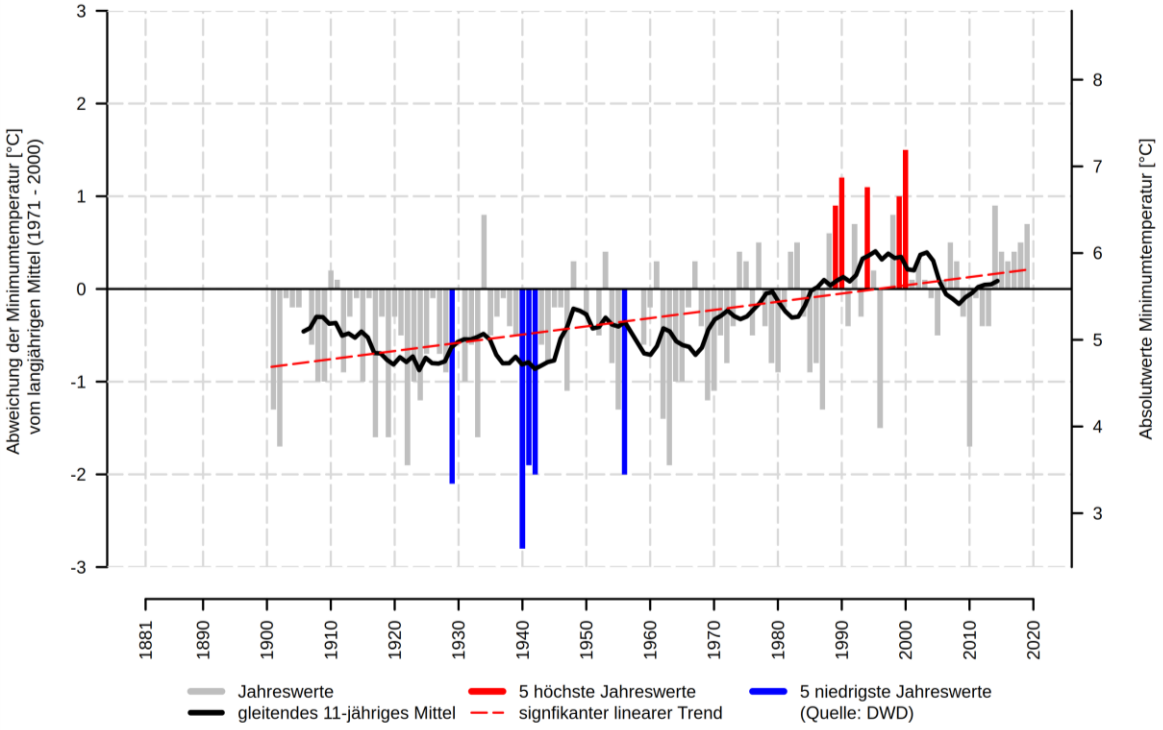


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren jährlichen Minimumtemperaturen in Leipzig seit 1900. Quelle: Eigene Darstellung der DWD Grids

2.1.3.1 Fazit

Die Minimum-, Mittel- und Maximumtemperatur geben Auskunft über die Temperaturentwicklung in Leipzig für das gegenwärtige Klima anhand von interpolierten Messstationsdaten des DWD. Alle drei Temperaturgrößen weisen einen positiven signifikanten Trend seit Beginn der Messungen auf. Die Minimumtemperatur gibt dabei Auskunft über die Entwicklung der Frosttage, die seit Beginn der Messungen zurückgegangen sind. Im Zusammenspiel der Maximum- und Minimumtemperatur ist die Spannbreite der Entwicklung für Leipzig ersichtlich. Die Maximumtemperatur ist diejeinige die am stärksten seit Beginn der Messungen gestiegen ist: Lag sie im Mittel im Jahr 1902 noch bei 11,4 °C, so zeigt sie im Jahr 2018 und 2019 bereits 16,4 °C im Mittel auf, was einem Anstieg um über 2 °C zur Referenzperiode entspricht (siehe Abbildung 4, Vergleich der Jahre 1902 und 2018). Sie steigt also schneller als die Minimumtemperatur. Somit sind höhere Maximumtemperaturwerte im Sommer zu erwarten. Eine ausschließliche Betrachtung der Mitteltemperatur bringt diese Erkenntnisse nicht zum Vorschein.

2.1.4 Entwicklung von Kenngrößen bis heute

2.1.4.1 Sommertage

Ein Sommertag ist definiert durch eine Maximumtemperatur von > 25°C am Tag.

Die Abbildung 6 zeigt die Anzahl an heißen Tagen seit 1950. Die Achse an der linken Seite stellt die Abweichung der Anzahl der Sommertage zur Referenzperiode 1971 bis 2000 dar. Auf der rechten Seite sind die Absolutwerte dargestellt.

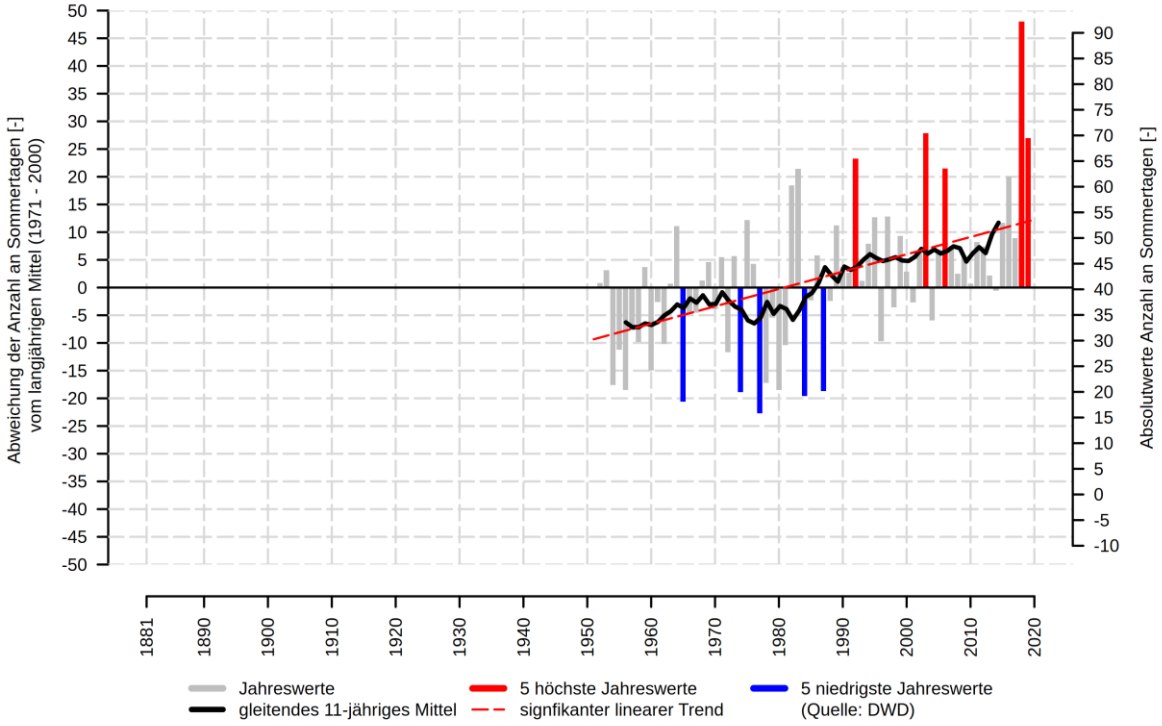


Abbildung 6: Entwicklung der Anzahl an Sommertagen seit 1950 für Leipzig. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids.

Auch hier ist zu sehen, dass es einen signifikanten Trend (rot gestrichelte Linie) nach oben gibt (positiv), wobei das Jahr 2018 sehr deutlich die meisten Sommertage mit mehr als 90 Tagen verzeichnet.

In anderen Jahren nach dem Jahr 2000 schwanken diese Werte zwischen 34 (Jahr 2004) über 50 (die anfänglichen 2010er Jahre) bis zu 60 (Jahr 2016) Sommertagen im Jahr. Die geringste Anzahl an Sommertagen weisen die Jahre vor 1990 auf.

2.1.4.2 Heiße Tage

In der Abbildung 7 ist die Anzahl der heißen Tage je Jahr seit 1950 dargestellt. Ein heißer Tag wird definiert durch eine Maximumtemperatur von > 30°C am Tag.

Die Abbildung 7 zeigt wieder auf der linken Achse die Abweichung der Anzahl der heißen Tage zur Referenzperiode 1971 bis 2000 und die Absolutwerte auf der rechten Achse. Auch hier ist ein signifikanter Trend nach oben (rot gestrichelte Linie) zu sehen. So gab es im Jahr 2018 33 heiße Tage, was im Vergleich zur Referenzperiode eine Zunahme von ca. 24 Tagen bedeutet, was enorm ist. Das entspricht mehr als einen Monat mehr mit Tagen über 30 °C als es im Mittel erwartbar wäre. Ab dem Jahr 2000 sind die 4 Jahre mit der höchsten Anzahl an heißen Tagen zu finden.

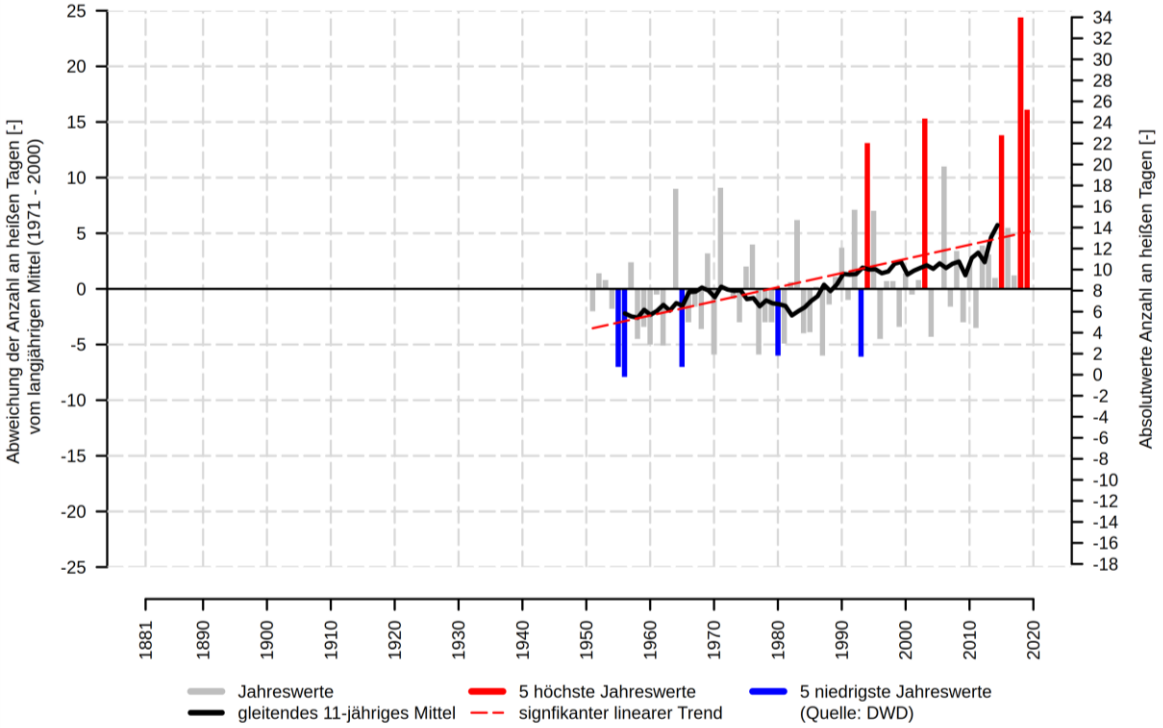


Abbildung 7: Entwicklung der Anzahl der heißen Tage seit 1950 für Leipzig. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids

2.1.4.3 Niederschlag

In der Abbildung 8 ist die jährliche Entwicklung des Niederschlages seit 1881 dargestellt. Auf der linken Achse der Grafik befindet sich wieder die Abweichung zur Referenzperiode 1971 bis 2000 und auf der rechten Seite der Grafik sind die Absolutwerte dargestellt.

Im Gegensatz zu der Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen (Abbildung 6 und Abbildung 7) ist hier kein signifikanter Trend in der Niederschlagsentwicklung zu sehen. Die Niederschlagssumme schwankt um den Mittelwert der Referenzperiode (1971 bis 2000), wobei das 11-jährige gleitende Mittel ab den 1980er Jahren deutlich über dem Mittelwert der Referenzperiode liegt. Vier der fünf Jahre mit den meisten Niederschlagssummen befinden sich vor 1940 und nur ein Jahr danach: das Jahr 2010 mit 810 mm Jahresniederschlag. Die fünf Jahre mit dem niedrigsten Jahresniederschlag sind über die gesamte Messperiode verteilt. Dabei ist der niedrigste Wert im Jahr 1983 mit 330 mm Jahresniederschlag gemessen worden. Aber auch 2018 gehört zu einem der fünf Jahre mit sehr niedrigem Jahresniederschlag in Höhe von 340 mm. Im Durchschnitt waren es in der Klimaperiode 1971 bis 2000 ca. 555 mm Jahresniederschlag. Das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie hat im Statuskolloquium Klima (2019) darauf hingewiesen, dass der Niederschlag bei gleichzeitiger Erwärmung und damit Erhöhung der Verdunstung nicht ausreicht, das natürliche Wasserdargebot zu decken und auch den Grundwasserkörper aufzufüllen. Des Weiteren kommen Starkregenereignisse hinzu, die aufgrund ihrer Intensität nicht im Boden versickern sondern zum großen Teil oberflächlich ablaufen und dabei den Boden erodieren können. Das andauernde Niederschlagsdefizit in Sachsen führt damit immer mehr zur Trockenheit, was nicht nur im Oberboden sondern im gesamten Bodenkörper und letztendlich auch Grundwasserkörper sichtbar wird (Franke 2019).

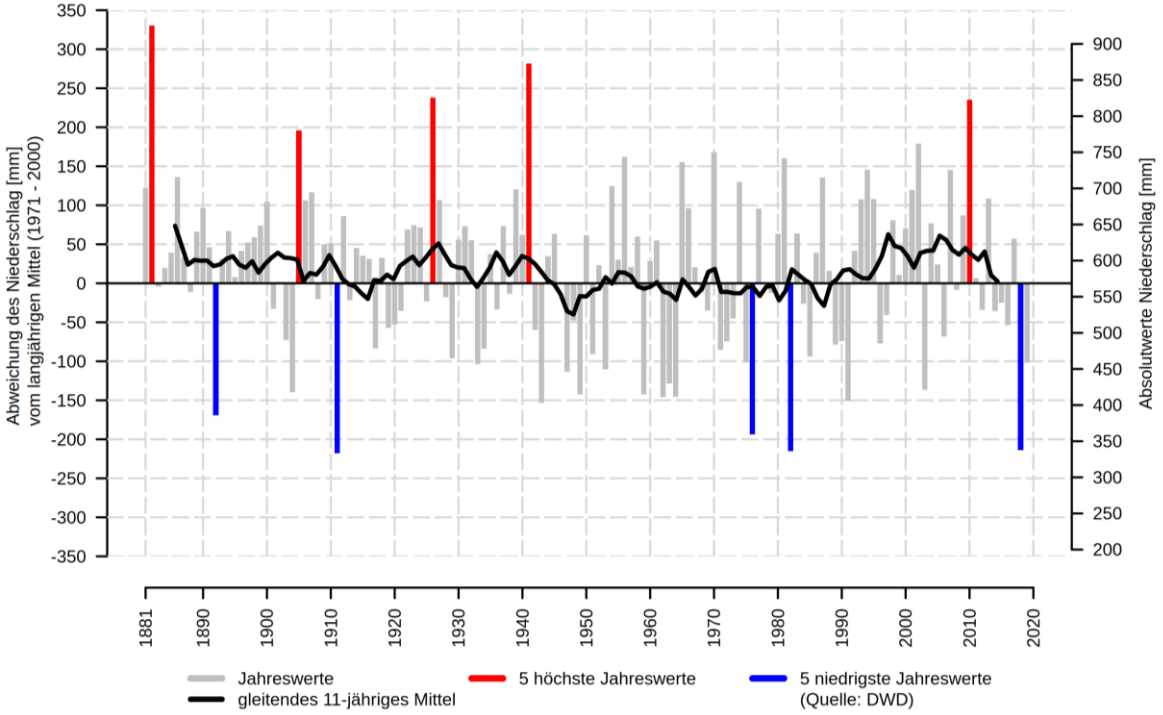


Abbildung 8: Entwicklung des jährlichen Niederschlages seit 1881 für Leipzig. Quelle: Eigene Darstellung nach DWD Grids.

2.2 Leipzig im Klimawandel

Die Veränderung des globalen Klimas und die weltweiten Auswirkungen des Klimawandels werden durch den „Weltklimarat“ IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change, „Weltklimarat“ der Vereinten Nationen) regelmäßig in Sachstandsberichten dokumentiert und öffentlichkeitswirksam diskutiert. Angesichts der Aussagen des 5. Sachstandsberichts (IPCC 2014) und global ansteigender CO_2-Emissionen, ist davon auszugehen, dass die Klimafolgenanpassung im Laufe der kommenden Jahrzehnte noch weiter an Bedeutung gewinnen wird. In der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) heißt es: *“Da Anpassung in den meisten Fällen auf regionaler oder lokaler Ebene erfolgen muss, sind viele Entscheidungen auf kommunaler oder Kreisebene zu treffen“ (Bundesregierung 2008)*. Doch dafür braucht es eine gute Datengrundlage und Analyse, um die kommenden Veränderungen abzuschätzen. Daher werden im folgenden Kapitel die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Klimagrößen und Kenntage dar- und vorgestellt. Die Auswertungen beruhen auf Regionalmodelldaten der Zukunft für Leipzig. Die Analysen stellen einmal die Entwicklungen für ein schwaches Klimawandelszenario RCP 2.6 vor. Dieses Szenario geht von der effektiven Umsetzung von Treibhausgas einsparenden Maßnahmen ab dem Jahr 2020 aus (entsprechend dem Pariser Klimaschutzabkommen 2015). Des Weiteren wird ein starkes Klimawandelszenario RCP 8.5 ausgewertet, bei dem ein "Weiter so wie bisher" für die globale und gesellschaftliche Entwicklung bis zum Jahr 2100 zugrunde gelegt ist.

2.2.1 Methodik für die Ermittlung der zu erwartenden Klimawandelauswirkungen

Die Daten, die den Auswertungen der zukünftigen Klimaänderungen zugrunde liegen, stammen aus der europäischen CORDEX Initiative (Coordinated Downscaling Experiment), die ein Downscaling[3] der globalen Klimawandelsimulationen für Europa für den 5. Sachstandsbericht des IPCC und darüber hinaus durchführen (Jacob et al. 2014; IPCC 2014). Die zukünftigen Entwicklungspfade beruhen dabei auf den Representative Concentration Pathways (RCP), die für ein Set aus bestehenden Szenarien repräsentative Konzentrationsentwicklungen für Treibhausgase beinhalten, die den Strahlungsantrieb unterschiedlich stark beeinflussen. Diese wurden im aktuellen fünften Sachstandsbericht des IPCC veröffentlicht und lösen die bis dahin genutzten auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios) ab. Abbildung 9 veranschaulicht diese Entwicklungspfade und den dazugehörigen Strahlungsinput einmal grafisch und fasst kurz die Bedeutung zusammen.

Für Europa stehen in den EURO-CORDEX-Daten aktuell die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und RCP 8.5 (Representative Concentration Pathways) zur Verfügung, deren Bezeichnung den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts benennt.

In den EURO-CORDEX-Daten standen jeweils 15 Modellsimulationen für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 sowie 9 Modellsimulationen für das Klimaszenario RCP 2.6 zur Verfügung (insgesamt 39 Modellläufe), siehe Tabelle 11. Die Zusammenstellung der Modellsimulationen wird Ensemble genannt. Eine Modellsimulation besteht einerseits aus der Kombination eines Globalen Klimamodells (GCM) und eines Regionalen Klimamodells (RCM). Andererseits beinhaltet jede Modellsimulation eine Klimaprojektion eines der aufgeführten RCP-Szenarien. Somit setzt sich eine Modellsimulation aus der Kombination von GCM, RCM sowie einem entsprechenden Klimaszenario zusammen (siehe Tabelle 11).

EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt (www.euro-cordex.net). Für die Auswertung wurden tägliche Daten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11 °) verwendet. Tabelle 11 listet die zum Zeitpunkt der Durchführung der Auswertungen verfügbaren Modellrechnungen von EURO-CORDEX auf, welche die Grundlage für das zusammengestellte Ensemble bilden. EURO-CORDEX ist ein fortlaufendes Projekt, d.h. die Datenbanken mit den Modellergebnissen werden permanent aktualisiert. Somit sind eventuell in der Zeit bis zur Erstellung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen, die hier jedoch nicht berücksichtigt werden konnten.

[3] Downscaling bedeutet das Herunterrechnen der globalen Ergebnisse in Abhängigkeit der regionalen Gegebenheiten, damit eine höhere Auflösung der Klimamodellergebnisse erreicht wird.

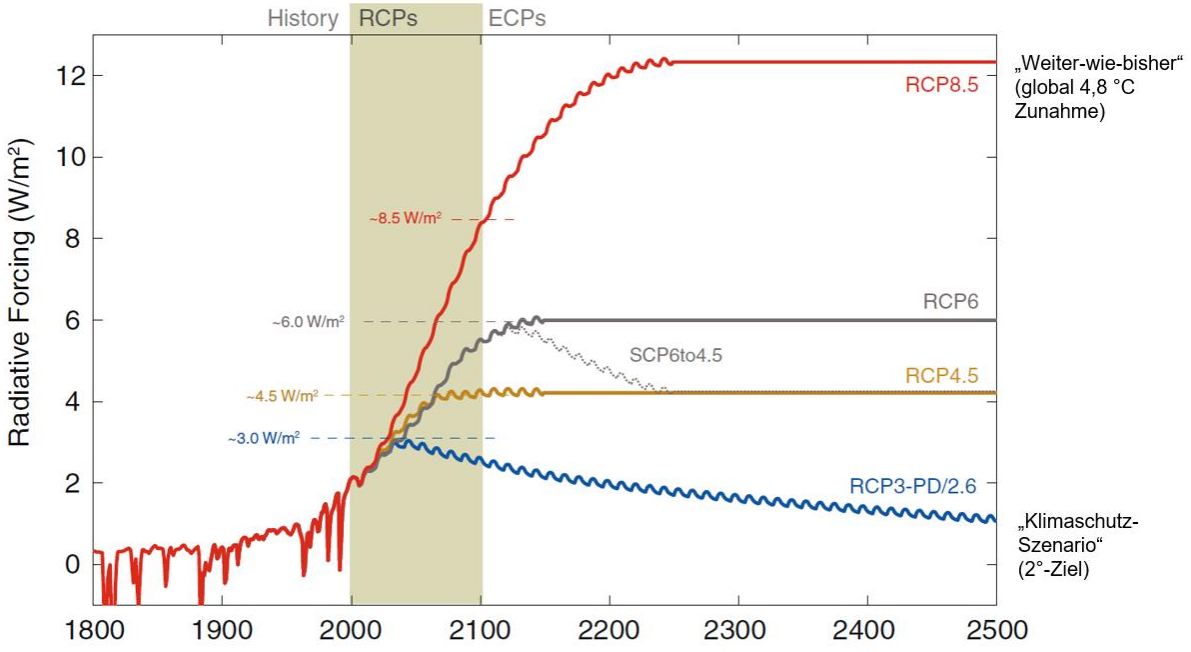


Abbildung 9: Strahlungsantrieb der verschiedenen Representative Concentration Pathways (RCP) und ihre Entwicklung bis 2100. Quelle: IPCC 2014
RCPs = Representatice Concentration Pathways (repräsentativer Konzentrationspfad); ECP = Extended Concentration Pathways, sind ergänzende Szenarien bis 2300.

Wie alle Modelle sind Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht „perfekt“. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik sowie der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble. Diesem Ansatz folgend wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Leipzig ein Ensemble bestehend aus 19 Regionalen Klimamodellen verwendet (siehe im Anhang, Tabelle 11). Die Mitglieder des Regionalmodell-Ensembles werden gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke 2016).

Einige Modellläufe der Regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen (Bias) von den realen Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Abweichungen für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben die Abweichungen, also deren Differenz, keinen Einfluss auf die Aussage.

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von Kenntagen. Dies sind z. B. die Anzahl von Hitzetagen, Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (oftmals jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten (schwellenwertbasiert), wie bspw. $T_{max} \geq 25$ °C für Sommertage, oder anhand von statistischen Maßen, wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert) (siehe Hübener et al. 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in Leipzig wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet. Dabei wurden aus den Beobachtungsdaten für die Kenntage die Perzentile berechnet, die auf den Referenzlauf jeder Modellsimulation übertragen wurden und der Schwellwert bestimmt (Quantile-Mappings (Jakob Themeßl et al. 2011; Piani et al. 2010)).

Für die Stadt Leipzig wurden aus dem EURO-CORDEX-Modellgitter der nächstgelegene sowie seine acht umliegenden Gitterpunkte ausgewählt (räumliche Auflösung ≈ 12,5 km). Die Daten dieser Gitterpunkte wurden für jede Modellsimulation zu einheitlichen Zeitreihen räumlich aggregiert und ausge-

wertet – die Datensätze umfassen jeweils Werte in einer zeitlichen Auflösung von einem Tag bis zum Jahr 2100.

Für den Blick in die Zukunft von Leipzig werden zwei Klimaszenarien ausgewertet:

- das RCP 2.6 und
- das RCP 8.5.

Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf knapp 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab, sofern die Klimaschutz- und -anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden (siehe Abbildung 9). Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario die 2 °C-Grenze voraussichtlich nicht überschreiten (IPCC 2014).

Das Szenario RCP 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, auf der Grundlage, dass 50% der Energie weiterhin aus Kohle stammt und dementsprechend das Treibhausgas CO_2 emittiert wird. Dieser Strahlungsantrieb schwächt sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht ab (siehe Abbildung 9) und würde eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zustand bewirken (IPCC 2014). Diese globale Mitteltemperaturerhöhung prägt sich unterschiedlich auf Regionen und Städte aus. *Dieses Szenario entspricht am ehesten dem „Weiter wie bisher"-Trend und würde sich vermutlich ohne zusätzliche Bemühungen zur CO_2-Reduzierung einstellen (Abbildung 9)*.

Mit der Auswahl dieser beiden Klimaszenarien wird eine große Spannbreite der zukünftigen Entwicklung in Leipzig aufgezeigt. Auf der einen Seite die Entwicklung die sich in etwa einstellen würde, würden die nach Pariser Klimaschutzabkommen (2015) vereinbarte Grenze von "deutlich unter 2 °C" nicht überschritten, auf der anderen Seite eine Entwicklung, die sich einstellen würde, wenn weiterhin keine effektiven Maßnahmen zur Reduzierung des Treibhausgasausstoßes unternommen werden.

Für die Auswertung der Daten zur Bestimmung der Klimaänderungen und -entwicklungen ist die Referenzperiode auf den Zeitraum 1971 bis 2000 festgelegt und die Änderungen werden für folgende 30-jährige Zeiträume (Perioden) ermittelt und ausgewertet:

- 2016 bis 2045 zentriert auf das Jahr 2030 (eine nahe Zukunft)
- 2041 bis 2070, zentriert auf das Jahr 2055 (eine mittelfristige Zukunft)
- 2071 bis 2100, zentriert auf das Jahr 2085 (eine langfristige Zukunft).

Anhand dieser zukünftigen Entwicklungspfade wird für Leipzig die Zukunft anhand von Diagrammen beschrieben.

Abbildung 10: Überblick über die Lage der 9 Gitterpunkte der verfügbaren EURO-CORDEX Ensembledaten. (Hintergrund: OSM)

2.2.2 Entwicklung von Kenngrößen unter Klimawandelbedingungen

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Kenngrößen für das RCP 2.6 und RCP 8.5 in Gegenüberstellung zu den gemessenen Daten in der Referenzperiode 1971 bis 2000 an den Stationen Leipzig-Holzhausen und Leipzig-Halle.

Tabelle 1: Zusammengefasste Ergebnisse für langjährige jährliche Klimaänderungen für ausgewählte Kenngrößen in Leipzig mit Gegenüberstellung zu Messergebnissen aus der Referenzperiode. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert der 30-jährigen Periode.

Ohne Zeichen: Station 2928 Leipzig-Holzhausen, mit * = 2932 Leipzig-Halle

Parameter	**Referenz-periode 1971 - 2000**	**RCP Szenario**	**Änderungen gegenüber Referenzperiode**		
			2021 - 2050	**2041 – 2070**	**2071 - 2100**
Jahresmitteltemperatur [°C]	9,6	2.6	1	1,2	1,1
		8.5	1,4	2,5	3,9
Minimumtemperatur [°C]	-14,2	2.6	2,5	2,2	3,1
		8.5	3,4	5,2	8,6
Maximumtemperatur [°C]	33,5	2.6	1,6	1,4	1,6
		8.5	1,5	3	4,6
Tropennächte [n/Jahr] (Tmin ≥ 20°C)	0	2.6	2	1	2
		8.5	2	6	15
Heiße Tage [n/Jahr] (Tmax ≥ 30°C)	7	2.6	4	4	5
		8.5	5	11	23
Sommertage [n/Jahr] (Tmax ≥ 25°C)	45	2.6	12	12	13
		8.5	11	25	44
Hitzeperiode [Länge/Jahr] (aufeinanderfolgende Tage mit Tmax ≥ 30°C)	3	2.6	1	1	1
		8.5	1	3	6
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	604	2.6	27	-12	8
		8.5	42	50	62
klimatische Wasserbilanz [mm/Jahr]* (Niederschlag – potenzielle Verdunstung)	-139	2.6	-6	-41	-20
		8.5	26	23	9
Vegetationsperiode [Länge/Jahr] (Beginn: erste 7 aufeinanderfolgende Tage > 5°C nach dem 15.02.; Ende erster Frosttag nach 01.07.)	261	2.6	12	14	10
		8.5	19	29	45

Für die Auswertungen in diesem Kapitel wird hauptsächlich auf die Tabelle 1 Bezug genommen. Die graphische Darstellung in Form von Box-Whisker-Plots wird im Anhang im Abschnitt 8.1.2 erläutert und ist mit Ergebnissen ergänzt.

Die *mittlere Temperaturentwicklung* zeigt einen deutlichen Anstieg bis zur Jahrtausendwende. Für das Szenario RCP 8.5 werden im Mittel 3,9 °C Zunahme bis 2100 durch die Ensembles bestimmt (Tabelle 1 und Abbildung 55). Die Jahresmitteltemperatur wird sich auf ca. 13,5 °C für Leipzig im Jahr 2100 erhöhen.

Das „Klimaschutzszenario" RCP 2.6 beinhaltet die Annahme, dass Klimaschutzmaßnahmen am Anfang des 20. Jahrhunderts umgesetzt werden (also jetzt) indem Treibhausgase reduziert werden. Dies resultiert im Absinken des anthropogenen Strahlungsantriebes, allerdings ist das erst ab 2040 bemerkbar, da insbesondere das CO_2 eine hohe Verweildauer in der Atmosphäre hat. Daher nimmt die Jahresmitteltemperatur auch leicht bis zur Periode 2041 bis 2070 um 1,2 °C zu und danach schwächt sich die Zunahme in der fernen Zukunft bis zum Jahr 2100 auf 1,1 °C ab (Abbildung 54). Die Jahresmitteltemperatur würde also lediglich 10,7 °C zur Jahrtausendwende betragen. Diese Spanne verdeutlicht die unterschiedlichen zukünftigen *Möglichkeiten* der Entwicklung. Wird der RCP 8.5 Medianwert mit dem Mittelwert aus 2018 von 11,8 °C verglichen (siehe Abschnitt 2.1), wird ersichtlich, dass um das Jahr 2100 solche Jahre die Normalität darstellen werden.

Werden die monatlichen mittleren Tagestemperaturwerte des RCP 2.6 betrachtet (Abbildung 54 unten), wird eine größere Variabilität sichtbar. Dabei gibt es über alle Monate hinweg in allen Zukunftsperioden eine Temperaturzunahme. Die größten vorausgesagten Zunahmen (bei Medianbetrachtung) werden von den Modellen für die Monate März und die Herbstmonate ab September vorausgesagt, wobei in der Zukunftsperiode 2071 bis 2100 die Medianwerte teilweise wieder das Niveau von der ersten Zukunftsperiode (2016 bis 2045) erreichen. Ein durchgängiges gleichmäßiges Muster prägt sich nicht in den einzelnen Zukunftsperioden aus. Für das RCP 8.5 ist eine deutliche Zunahme für die Sommer- und Herbstmonate (Juni, Juli, August, September, Oktober) zu erwarten (Abbildung 55 unten).

Die *Maximum- und Minimumtemperaturen* (Tabelle 1) **werden sich deutlicher als die Jahresmitteltemperaturen verändern.**

Die Maximumtemperaturen im RCP 2.6 steigen in der nahen Zukunftsperiode um 1,6 °C, in der mittleren Zukunftsperiode reduziert sich die Abweichung zur Referenzperiode auf + 1,4 °C, in der fernen Zukunftsperiode steigt sie wieder auf 1,6 °C. Der Anstieg der *Maximumtemperaturen* in den drei Zukunftsperioden fällt größer aus als die der Mitteltemperaturen (vgl. Abschnitt 2.1 und Tabelle 1), aber geringer als die Zunahme der Minimumtemperatur im RCP 2.6 und RCP 8.5. Die jährlichen Schwankungen sind sowohl für das Klimaschutzszenario RCP 2.6 (Einhaltung des 2° Ziel) als auch für das RCP 8.5 in Bezug auf die Maximum- und Minimumtemperatur zu sehen (Abbildung 56 und Abbildung 57 im Anhang).

Die *größte Zunahme* ist bei den Minimumtemperaturen zu verzeichnen. Sie werden stärker zunehmen als die Maximumtemperaturen.

Im RCP 8.5 ist für die ferne Zukunft sogar ein mittlerer Anstieg um 8,6 °C zu erwarten, für die Maximumtemperatur jedoch nur um 4,6 °C (vgl. Tabelle 1). Das Wertespektrum der Temperatur verschiebt sich also deutlich nach oben, v.a. für die Minimumtemperaturen, was zur Folge hat, dass es weniger Frostperioden im Winter geben wird. Dies ist in den Winter- und Frühjahrsmonaten (Dezember, Januar, Februar, März) sichtbar, wobei der Dezember die höchsten Zunahmen über alle drei Zukunftsperioden für das RCP 8.5 verzeichnet. Die Winter unter Annahme des RCP 8.5 werden also noch wärmer, milder und frostfreier als im RCP 2.6.

Der *stärkste Anstieg* der Maximumtemperaturen wird für die Sommermonate (RCP 8.5) bzw. für den Monat Juli (RCP 2.6) erwartet. Die Thermische Belastung innerhalb der Sommermonate wird damit sowohl am Tag als auch in der Nacht weiter zunehmen. Dicht bebaute bzw. hoch versiegelte Gebiete weisen bereits jetzt die stärkste Hitzebelastung und insbesondere Überwärmung in der Nacht auf („Stadtklimaeffekt" z.B. in der Innenstadt oder Gewerbeflächen). Durch den Anstieg der Maximumtemperaturen wird erwartet, dass sich der Stadtklimaeffekt intensiviert – d.h. zusätzlich zum ohnehin steigenden Temperaturniveau wird die Belastung in den heute bereits betroffenen Stadtgebieten am stärksten zunehmen.

Im RCP 8.5 wird für die Sommermonate Juni, Juli und August eine mittlere Maximumtemperaturzunahme von 3,5 °C (Juni) bis zu 5 °C (Juli) für die ferne Zukunft prognostiziert. Auch die Minimumtemperaturen steigen für diese Periode um 4 °C. Das bedeutet, dass in den Sommermonaten deutlich höhere Temperaturen auftreten werden und damit die thermische Belastung der Menschen in der Nacht und am Tage weiter zunehmen wird, kommt es nicht zu einer Reduktion der Treibhausgase in der Atmosphäre durch Klimaschutzmaßnahmen und Anpassung der Gebäude und versiegelten Bereiche.

Die Anzahl an *Tropennächten* wird in der Zukunft zunehmen und auch eher und später im Jahresverlauf auftreten. Die Monate Juli und August werden am häufigsten Tropennächte verzeichnen.

Tropennächte pro Jahr sind eine Kenngröße, die die Anzahl von Tagen im Jahr wiedergibt, an denen die minimale Tagestemperatur, also die nächtlichen Temperaturen nicht unter 20 °C fallen. Da eine optimale Schlaftemperatur von 16 - 18 °C in der Nacht empfohlen wird (Umweltbundesamt 2016), ist der erholsame Schlaf der Einwohnenden in Leipzig bei einer Tropennacht nicht mehr gegeben. Da Tropennächte gepaart sind mit einer bereits hohen Wärmebelastung am Tag, ist davon auszugehen, dass die steigende Hitzebelastung zusammen mit dem demografischen Wandel zu einer Zunahme von hitzebedingter Todesfälle und Erkrankungen führt.

Für die Referenzperiode 1971 bis 2000 wurden 0 Tropennächte gemessen (Tabelle 1), im Jahr 2019 wurden sowohl an der DWD Station Leipzig-Holzhausen und Leipzig-Mockau 2 Tropennächte verzeichnet (DWD). In der Tabelle 1 sind die Änderungen zur Referenzperiode (1971 bis 2100) für die Anzahl an Tropennächten dargestellt. Für das RCP 2.6 schwanken sie um eine Zunahme von 1 Tag pro Jahr (2041 bis 2070) bis zu 2 Tagen pro Jahr (2071 bis 2100). Wird der Vergleich zum RCP 8.5 gezogen, so ist ersichtlich, dass es 2 Tropennächte pro Jahr mehr in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) und bis zu 15 Tropennächte mehr in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) geben wird. Wird das in den Vergleich zu den nicht vorhandenen Tropennächten in der Referenzperiode gesetzt, ist das ein enormer Anstieg. Dabei ist u. a. noch zu berücksichtigen, dass die regionalen Klimamodelle den Stadtklimaeffekt aufgrund der geringen räumlichen Auflösung (11 x 11 km) nicht erfassen, d.h. im innerstädtischen Bereich ist mit einer höheren Anzahl von Tropennächten zu rechnen. Dennoch können Tropennächte als Anhaltspunkte für die Tendenz einer zunehmenden Erwärmung dienen, da ihre Anzahl ab Mitte des Jahrhunderts zunimmt.

Die Anzahl an Tropennächten verteilt sich unterschiedlich auf die einzelnen Monate, was die Abbildung 58 im Anhang verdeutlicht. Eine Zunahme der Tropennächte ist logischerweise ausschließlich ab Mai bis September für die beiden Szenarien RCP 2.6 und 8.5 zu verzeichnen, wobei Juli und August die stärksten Zunahmen verzeichnen. Im RCP 8.5 kommt es auch zu einer höheren Zunahme im Monat September als im Klimaschutzszenario RCP 2.6.

Die Anzahl an *Sommertagen* in Leipzig wird sich deutlich erhöhen und bereits ab April bis Oktober zu erleben sein.

Als Sommertage werden die Tage im Jahr gezählt, deren maximale Temperatur 25 °C überschreitet. In der Referenzperiode 1970 bis 2000 waren es 45 Sommertage je Jahr (Tabelle 1). In der Auswertung im Abschnitt 2.1.4.1, Abbildung 6 wurden für das Jahr 2018 sogar über 90 Sommertage gezählt.

Das Klimaschutzszenario RCP 2.6 weist bis zur Jahrhundertwende eine mittlere Zunahme von 13 Sommertagen auf. Das RCP 8.5 mit dem starken Klimawandeländerungssignal prognostiziert eine Zunahme von 11 Sommertagen in der ersten Zukunftsperiode und bis zu 44 Sommertage in der letzten Zukunftsperiode (siehe Tabelle 1). Die Abbildung 59 im Anhang zeigt jedoch, dass die Zunahme der Sommertage im RCP 2.6 von April bis Oktober reichen wird und im RCP 8.5, letzte Zukunftsperiode beginnt die Zunahme der Sommertage bereits im März, jedoch ist die Anzahl noch so gering, dass aller 10 Jahre mit einem Sommertag im März zu rechnen sein wird. Die Auftretenswahrscheinlichkeit wird sich also auf mehr Monate im Jahr verteilen und nicht nur auf die drei Sommermonate.

Die *heißen Tage* werden v.a. im RCP 8.5 sehr stark zunehmen und auch deutlich eher und länger im Jahresverlauf auftreten.

Die Kenngröße heiße Tage gibt die Anzahl der Tage im Jahr an, an dem die maximale Tagestemperatur über 30°C liegt. Im Jahr 2019 waren es an der DWD Station Leipzig – Holzhausen 18 Tage, die

Temperaturen über 30°C erreichten. In der Abbildung 7 wurden für das Jahr 2018 sogar 33 heiße Tage gezählt.

In der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die heißen Tage im Klimaschutzszenario RCP 2.6 in den ersten beiden Zukunftsperioden moderat um 4 Tage und in der fernen Zukunft dann um 5 Tage zunehmen werden. Im „Weiter-wie-bisher“ Szenario RCP 8.5 sind es in der ersten Zukunftsperiode 5 Tage, in der zweiten Zukunftsperiode 11 Tage und in der letzten Zukunftsperiode im Mittel 23 Tage. Gerade die letzte genannte Zahl gibt einen sehr deutlichen Anstieg der heißen Tage wieder. Wird dann noch bedacht, dass die Modellensemblerechnungen nicht den wirklichen Stadtklimaeffekt abbilden können, da sie u.a. zu grob aufgelöst sind (11 mal 11 km), dann ist jeweils mit einer höheren Anzahl an heißen Tagen in den bereits jetzt mittel bis sehr stark belasteten Quartieren zu rechnen. Abbildung 60 im Anhang zeigt, dass sich das Auftreten der heißen Tage verschieben wird. Es wird prognostiziert, dass bereits im April erste heiße Tage auftreten können und diese dann bis in den Oktober auftreten werden.

Hitzeperioden **werden hauptsächlich im Juli und August zunehmen und länger andauern.**

Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Für diese Analyse wird der Schwellenwert der maximalen Tagestemperatur in Höhe von 30 °C benutzt, so dass alle aufeinanderfolgenden Tage gezählt werden, deren Maximumtemperatur über 30 °C liegen. Es wird nach der maximalen Länge der Hitzeperioden und der Anzahl der Hitzeperioden im Jahr unterschieden.

Für die DWD Station Leipzig-Holzhausen wurden im Jahr 2019 zwei Hitzeperioden aufgezeichnet, die mehr als zwei aufeinanderfolgende Tage von maximal 30 °C aufgewiesen haben. Die längsten Perioden mit Temperaturen über 30 °C dauerten vier Tage an und sind im Juli und im August aufgetreten.

Wird der Schwellenwert einer Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Wert erreichen oder überschritten haben, zeigt sich für Leipzig beim Szenario RCP 2.6, dass für alle drei Zukunftsperioden eine Zunahme der Länge um einen Tag für die Hitzewelle vorausgesagt wird. Im RCP 8.5, wird die mittlere Zunahme der Länge von Hitzeperioden in der fernen Zukunft um 6 Tage vorausgesagt (Tabelle 1). Hitzeperioden und letztendlich - wellen tragen zu einer erhöhten Sterblichkeit von vulnerablen Gruppen wie älteren Menschen oder durch Krankheit geschwächte Menschen bei (Jendritzky 2007). Daher wird es in Zukunft hauptsächlich darum gehen, dass ältere und kranke Menschen bestmöglich geschützt werden.

In Abbildung 61 im Anhang ist zu sehen, dass hauptsächlich in den Monaten Juli und August mit einer Zunahme an Hitzeperioden zu rechnen ist. Im RCP 8.5 ist zu sehen, dass diese Hitzeperioden auch in weiteren Monaten auftreten werden, wie bspw. Juni und September. Da die Klimawandelensemblerechnungen den Stadtklimaeffekt eher unterschätzen, ist mit einer längeren Dauer der Hitzeperioden in Leipzig in Zukunft zu rechnen, v.a. in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) wird es zu einer deutlichen Verlängerung kommen.

Die Veränderung des *Jahresniederschlags* ist nicht so eindeutig vorherzusagen. Es wird eine Verschiebung der Niederschlagsverteilung geben, so dass es ein Defizit in den Sommermonaten geben wird. Der Niederschlag reicht im Winterhalbjahr nicht aus, um das Sommerdefizit auszugleichen.

Der Jahresniederschlag wird im RCP 2.6 mit einer leichten Zunahme prognostiziert, in der nahen Zukunft dann mit einer Abnahme um 12 mm und letztendlich in der fernen Zukunft mit einer leichten Zunahme von 8 mm angegeben. Im Gegensatz dazu ist im RCP 8.5 eine deutliche Zunahme um bis zu 62 mm in der fernen Zukunft angegeben. Das beruht auf der durch die Temperaturzunahme erhöhten Verdunstung. Damit ist auch die Atmosphäre feuchter. Dabei kommt es jedoch zu einer Verschiebung der Niederschlagsverteilung über das Jahr (siehe Abbildung 62 im Anhang). Im Klimaschutzszenario RCP 2.6 ist ein Defizit im Juli sichtbar, im RCP 8.5 wird ein Defizit für die vier Monate Juni bis September prognostiziert. In den Wintermonaten November bis Januar werden leichte Zunahmen für die Niederschlagssummen vorhergesagt. Die Winterniederschlagszunahmen reichen jedoch nicht aus, um das Defizit im Sommer auszugleichen, zumal in den Sommermonaten bei erhöhter Temperatur auch ein höherer Bedarf an Wasser für die Landwirtschaft entstehen sollte. Es ist auch davon auszugehen, dass in den Sommermonaten eine Zunahme an Starkregenereignissen zu erwarten ist. Als Starkregenniederschlag wird Regen verstanden, der eine hohe Intensität, d.h. eine im Verhältnis zu

seiner Dauer große Niederschlagshöhe aufweist. Oftmals kann dieser Niederschlag nicht so schnell versickern, gerade in den Sommermonaten, wenn der Boden ausgetrocknet ist, und fließt damit größtenteils oberflächlich ab und überfordert die Kanalisation. Starkregenniederschläge sind schwer vorherzusagen, da sie eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität aufweisen. Es wird erwartet, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die von Tagen mit intensivem Niederschlag jedoch zunehmen wird.

Die Entwicklung der *klimatischen Wasserbilanz* ist mit Unsicherheiten behaftet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in den Sommermonaten ein Defizit auftritt, welches in den Herbst- und Wintermonaten nicht ausgeglichen werden kann.

Die Klimatische Wasserbilanz ist ein Indikator für Trockenheit und wird in [mm/Jahr] angegeben. Sie wird aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung gebildet und erlaubt damit eine Gegenüberstellung des potenziellen (natürlichen) Wasserdargebots durch Niederschlag zu Wasserverlust aufgrund der potenziellen Verdunstung.

Auch wenn die Änderungen in den Sommermonaten teilweise recht gering sind, v.a. für das RCP 2.6, deutet dies zumindest auf die Tendenz zu einer Verminderung des natürlichen Wasserdargebots hin. Dies kann in heißen Sommern die Situation in bereits heute schon von Wasserknappheit oder Trockenheit betroffenen Bereichen noch verschärfen. Ähnlich wie beim Niederschlag sind auch die Änderungen der klimatischen Wasserbilanz mit Unsicherheiten behaftet, da diese zu einem nicht unwesentlichen Teil durch die Variabilität des Niederschlags beeinflusst sind.

In der Abbildung 63 im Anhang ist die prognostizierte Veränderung der klimatischen Wasserbilanz für das RCP 2.6 und 8.5 ersichtlich. Die vorausgesagten monatlichen Entwicklungen schwanken im RCP 2.6 fast alle mit unterschiedlicher Variabilität um die Nulllinie, nur der Juli und September weisen in allen Zukunftsperioden negative Werte, also ein Defizit auf. In den Sommermonaten, das heißt in der Vegetationsperiode, ist ein Defizit an natürlichem Wasserdargebot gegeben, v.a. im Juli. Im RCP 8.5 zeigen sich andere Muster als im RCP 2.6. Hier ist zu sehen, dass v.a. zwischen Juni und Oktober ein Defizit (alle Mediane unter der Nulllinie) auftreten wird. Das natürliche Wasserangebot reicht also nicht aus, und Wasserknappheit bis hin zur Trockenheit wird sich verschärfen, v. a. in der fernen Zukunft. Der November, Februar und März liegen im Mittel nur knapp über der Nulllinie im RCP 2.6. Es ist davon auszugehen, dass die Monate mit einer positiven klimatischen Wasserbilanz nicht ausreichen werden, um das Defizit der anderen Monate auszugleichen.

Die *Vegetationsperiode* wird sich in der Zukunft verlängern.

Die Vegetationsperiode wird in Tagen je Jahr angegeben. Der Beginn der Vegetationsperiode ist so definiert, dass die ersten 7 aufeinanderfolgenden Tage mit einer Temperatur über 5°C nach dem 15.02. zählen. Das Ende der Vegetationsperiode ist der erste Frosttag nach dem 01.07.

In Leipzig betrug die Länge der Vegetationsperiode in der Referenzperiode 1971 bis 2000 261 Tage (Tabelle 1), und 310 Tage im Jahr 2019 (Auswertung der DWD Station Holzhausen).

In der Abbildung 64 im Anhang ist die langjährige Veränderung der Länge der Vegetationsperiode im Klimaschutzszenario RCP 2.6 ersichtlich. Es ist auch hier wieder ersichtlich, dass es in der mittleren Zukunft (2041 bis 2070) zu einem Anstieg in der Länge der Vegetationsperiode um 14 Tage kommen wird, die dann in der fernen Zukunft wieder auf eine Zunahme von 10 Tagen abnehmen wird, da Klimaschutzmaßnahmen greifen. Im RCP 8.5 kommt es in allen Zukunftsperioden zu einer deutlichen Verlängerung der Vegetationsperiode für Leipzig. In der fernen Zukunft prognostizieren die Regionalmodelle eine Verlängerung im Mittel von 45 Tagen, was pro Jahr die Zunahme von anderthalb Monaten bedeutet.

2.2.3 Fazit und Klimazwilling für Leipzig in der Zukunft

Der Stadtklimaeffekt ist in den Modellensemblerechnungen nicht so hoch aufgelöst enthalten, da die hier zugrunde liegenden Regionalmodellprojektionen für die Zukunft eine räumliche Auflösung von ca. 12 km horizontal haben. Für die Analysen für die Stadt werden immer der naheliegende Punkt und seine acht umgebenden Rasterzellen ausgewertet (siehe auch Erläuterungen im Abschnitt 2.2.1). Damit ist auch hier eine Mittelung über 36 x 36 km gegeben. Es ist davon auszugehen, dass die ther-

mischen Zunahmen für die Stadt Leipzig für die Mittel-, Maximum-, und Minimumtemperaturen und dementsprechend auch für die Kenngrößen noch höher ausfallen werden als es hier in den einzelnen Abschnitten dargestellt ist. Jedoch liefert die Analyse der 30-jährigen Zukunftsperioden in den zwei verschiedenen Klimawandelszenarien erste Anhaltspunkte, wie eine Entwicklung in Leipzig aussehen kann. Das RCP 2.6 verdeutlicht die doch eher moderate Entwicklung der Kenngrößen, wenn die Klimaschutzmaßnahmen zu einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgase beitragen, was jedoch bis jetzt noch nicht erkennbar ist. Werden die Klimaschutzmaßnahmen erst sehr spät umgesetzt, so ist davon auszugehen, dass der Temperaturanstieg erst einmal länger über mehrere Jahrzehnte andauert und im besten Fall erst spät Treibhausgasreduzierungen greifen werden, da das Treibhausgas CO_2 bis zu 100 Jahren in der Atmosphäre verweilt. Allerdings ist sich die Wissenschaft einig, dass ab einer gewissen Temperaturzunahme mit dem Überschreiten so genannter "Umkehrpunkte (tipping points) des Klimasystems" zu rechnen ist, durch das unumkehrbare Prozesse in Gang kommen, die durch die (zu späte) Reduktion der emittierten Treibhausgase nicht mehr aufgehalten werden können. Das RCP 8.5 zeigt die Entwicklung bei steigenden Emissionen an Treibhausgasen und dementsprechend auch eine deutliche Zunahme der Hitzebelastung, was vor allem an den Sommer- und Heißen Tagen ersichtlich wird und an der Zunahme der Tropennächte. Die Weltgemeinschaft hat sich im Jahr 2015 auf den Pfad entlang RCP 2.6 geeinigt, da nur mit diesem Pfad die Lebensbedingungen, die wir derzeit auf unserem Planeten vorfinden, weitestgehend erhalten werden können. Bis heute, knapp 5 Jahre nach Vereinbarung des Pariser Klimaschutzabkommens, ist jedoch noch keine globale Kehrtwende sichtbar. Wissenschaftler des IPCC haben im Dezember 2018 erstmals das Treibhausgasbudget berechnet und im "Sonderbericht über 1,5°C Erwärmung" veröffentlicht (IPCC 2018), welches der Welt zum Erreichen des Ziels noch zur Verfügung steht. Bei einem „Weiter wie bisher“ ist das Budget für Leipzig bereits im Jahr 2026 aufgebraucht (Berechnung nach der Methodik des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) 2020, für die in der kommunalen Treibhausgas-Bilanz erfassbaren Emissionen). Die Entwicklung der Kenngrößen in Leipzig wird wohl zwischen beiden Szenarien liegen, wobei momentan alles darauf hindeutet, dass das Eintreten von RCP 8.5 wahrscheinlicher ist, als das von RCP 2.6.

Städte, die bereits heute eine mittlere Temperatur und ähnliche jährliche Niederschlagssummen aufweisen wie Leipzig in der Zukunft 2100, wenn die Annahme vom „Weiter wie bisher“ Szenario 8.5 zugrunde liegen, sind Städte, die zwischen dem 43. und 46. Breitengrad zu finden sind (Leipzig liegt auf dem 52. Breitengrad). Beispiele hierfür sind Krasnodar im südlichen Russland oder Novi Sad in Serbien.

2.2.4 Funktionale Auswirkungen des Klimawandels

Die Analyse der vom EURO-CORDEX-Modellensemble projizierten klimatischen Änderungen für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 in Leipzig zeigen für die Jahresmitteltemperaturen einen signifikanten Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts. Dieser Anstieg tritt in allen Monaten des Jahres auf, wobei die Jahresmitteltemperaturen in den Wintermonaten stärker zunehmen als in den Sommermonaten. Zudem kommt es zu einer stärkeren Zunahme der Minimumtemperaturen im Vergleich zu den Maximumtemperaturen. Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Erwärmung wirkt sich dementsprechend auf die Veränderung der thermischen Kenntage in Leipzig aus. So wird die Anzahl an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten deutlich zunehmen. Weiterhin gibt es Hinweise darauf, dass die Länge von Hitzeperioden zunimmt.

Gesundheitlichen Risiken ist daher vorsorgend mit geeigneten Maßnahmen zu begegnen (siehe Kapitel 6). Besonders betroffen sind *sensible Bevölkerungsgruppen* wie ältere Menschen und Kinder unter 6 Jahren. Da sich mit fortschreitendem Alter der Prozess zur Regulierung der Köpertemperatur verlangsamt und die Fähigkeit zur körperlichen Wärmeabgabe abnimmt, leiden sie häufig stärker unter Hitzestress als andere Bevölkerungsgruppen. Die Folgen sind Kreislaufprobleme, Unwohlsein und allgemeine Schwäche. Kinder haben noch nicht die Thermoregulationsfähigkeit vollständig ausgebildet. Sie schwitzen weniger und das Verhältnis der Körpermasse zur –oberfläche ist größer als bei Erwachsenen, so dass der Körper stärker arbeiten muss.

Doch auch für die *bebaute Umwelt* entstehen Konsequenzen, neue Anforderungen an Gebäudegestaltung und -technik kommen auf. Um ein angenehmes Innenraumklima zu schaffen, entsteht eine erhöhte Notwendigkeit zum Kühlen. Während der Heizwärmebedarf im Winter zukünftig zwar tendenziell leicht abnimmt, steigt der Stromverbrauch durch zusätzliche Klimaregelungssysteme vermutlich

noch weiter an. Ziel muss es daher sein, eher über alternative und passive Kühlung (z.B. Verschattung, Gebäudebegrünung, Sonnenschutz, Dämmung, Nachtlüftung) eine Verbesserung des Innenraumklimas zu erzielen. Dies gilt für den Wohnungsneubau, aber in noch viel größerem Maße für den Wohnungsbestand und für die Büro- und Gewerbenutzungen. *Infrastruktur*schäden nehmen aufgrund der Temperaturzunahme zu. Durch häufigere und extremere Temperaturschwankungen sowie den Wechsel von Frost- und Tauwettertagen lässt sich bereits heute eine Zunahme von Material- und Strukturschäden sowie von Verformungen an Straßenbelägen (Spurrillen, „Blow-Ups“) und Schienen beobachten. Insbesondere bei Hitze werden diese Schäden z.B. durch den Schwerverkehr/Busverkehr noch weiter verstärkt.

Die *städtischen Grün- und Freiflächen* entwickeln aufgrund der Zunahme der Wärmebelastung einen erhöhten Bewässerungsbedarf. Es kommt zur Verschiebung der Lebensräume über den Rückgang standorteinheimischer Bestände bis hin zum Aussterben heimischer Arten. Von den geänderten Bedingungen profitieren konkurrenzstärkere Arten. Mit der Temperaturerhöhung wird ebenfalls die Zuwanderung nichtheimischer Arten begünstigt. Die steigende Anfälligkeit gegenüber Schädlingsbefall nimmt zu. Hinzu kommen Schäden an Grünflächen und Bäumen durch Hitze- und Trockenstress sowie Windwurf. Demzufolge ergeben sich für Stadtbäume veränderte Anforderungen an die Artenzusammensetzung, um die Widerstandsfähigkeit vor dem Hintergrund des Klimawandels zu erhöhen.

Die *Landwirtschaft* ist in hohem Maße von den klimatischen Gegebenheiten abhängig So ist die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen heute schon ein Diskussionspunkt, angesichts vermehrter Trockenheit wird der Bewässerungsbedarf künftig zunehmen (und steht damit ggf. in Nutzungskonkurrenz zur gesetzlich vorrangig gestellten Trinkwasserversorgung). Um Trocken- oder Hitzestress zu begegnen, ist der Anbau robusterer Sorten gefragt. Dank einer verlängerten Vegetationsperiode und höheren Temperaturen bestehen auch Chancen für den Anbau neuer Sorten, wobei gleichzeitig die Gefährdung durch invasive Arten zunimmt.

Steigende Jahresmitteltemperaturen und veränderte Niederschlagsmengen mit abnehmenden Werten in den Sommer- und zunehmenden Werten in den Wintermonaten wirken auf alle Größen des *Wasserkreislaufs*. Infolge der zunehmenden sommerlichen Trockenheit ergibt sich ein veränderter Durchfluss von Oberflächengewässern, der zu mehr Niedrigwasserständen führt. Die Gefahr einer eingeschränkten Trinkwasserverfügbarkeit kann nicht ausgeschlossen werden, da die Grundwasserneubildung verringert ist. Im städtischen Bereich ergeben sich daraus Auswirkungen für die Abwasserbewirtschaftung und Entwässerung, die sich auch gegenwärtig schon mit Ablagerungs-, Korrosions- und Geruchsproblemen im Kanalsystem in Trockenperioden auseinandersetzen muss. Hinzu kommt das andere Extrem einer Überlastung des Kanalnetzes bei Starkregenereignissen, die zu Schäden führen und zukünftig tendenziell häufiger auftreten werden.

3 Prozessraumanalyse der Kaltluftleitbahnen

3.1 Grundlagen für die detaillierte Kaltluftleitbahnanalyse

Die weiterführende Ausarbeitung der klimatisch wichtigen Stadtstrukturen stützt sich auf die Ergebnisse der Klimasimulation für eine windschwache wolkenlose Sommernacht (autochthone Wetterlage), in der sich die Kaltluftströmungssysteme in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickeln.

Kaltluft entsteht durch die langwellige Wärmeabstrahlung der Grün- und Freiflächen in die Atmosphäre. Die wichtigsten Kaltluftentstehungsgebiete sind hier v.a. Wiesen, Ackerflächen, Wälder und Parks. Dabei spielt zum einen die tagsüber gespeicherte Wärme eine Rolle als auch die ungehinderte Ausstrahlungsmöglichkeit in die Atmosphäre ohne Wolken und Hindernisse (Bäume). Nach Sonnenuntergang erreichen die Abkühlungsraten ihre Maximalwerte und schwächen sich im Laufe der Nacht ab, da turbulenter vertikaler Wärmeaustausch stattfindet (VDI 3787, Blatt 5). Durch die beständige Abkühlung kann sich eine mehrere Dekameter mächtige *Kaltluftschicht* ausbilden, die aufgrund ihrer höheren Dichte gegenüber wärmerer Luft zu einer *Bodeninversion* führt und Luftaustauschprozesse unterbindet.

Im Folgenden sollen die Prozesse des Fließen der Kaltluft kurz idealtypisch erläutert werden; die Abbildung 17 im Bericht der Klimaanalyse (Phase I) verdeutlicht die Prozesse einmal exemplarisch für Leipzig. Zu unterscheiden sind als Prozesse bei einem vorhandenen Kaltluftabfluss *Hangabwinde*, welche durch die Orographie entstehen und deutlich stärker ausgeprägt sind durch bspw. höhere Fließgeschwindigkeiten als die thermisch geprägten Flur- und Strukturwinde.

Abbildung 11 zeigt den Zustand des *Hangab- und Talwindes* in der Nacht um 6 Uhr schematisch. Ab ca. 1° Geländeneigung beginnt die Kaltluft aufgrund der Schwerkraft hangabwärts zu fließen. Da das Relief in Leipzig nicht so stark ausgeprägt ist und sich die Höhenunterschiede lediglich auf mehrere Dekameter belaufen, sind die Hangabwindsysteme schwächer ausgebildet als in stark reliefierten Gebieten, sie sind aber dennoch auch für Leipzig sichtbar. Als *flächenhafter Kaltluftabfluss* wurde er in Lößnig, Lindenthal und Schönau identifiziert. Die Kaltluft fließt in diesem Fall entlang des Gefälles und ihrer Dichte zur Talsohle. In der Talsohle können bei konkaver oder flacher Geländeneigung *Kaltluftsammelgebiete*, auch *Kaltluftseen* genannt, entstehen. Ist die Talsohle wie in der Prinzipskizze dargestellt, ebenfalls geneigt, fließt die Kaltluft dann entlang zum Talausgang und bildet eine *linienhafte Kaltluftleitbahn* aus. Meistens sind solche Täler an Bach- und Flussläufe gebunden.

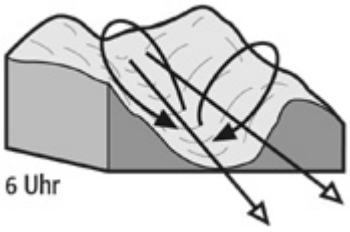


Abbildung 11: Prinzip des Hangab- und Talwind in der Nacht. Quelle: Schönwiese 2013

Die Abbildung 12 verdeutlicht das Prinzip der *Flurwinde*. Die Stadt bzw. der Siedlungskörper, der tagsüber viel Wärme speichern kann, ist auch in der Nacht noch deutlich wärmer aufgrund geringerer Abkühlung als das Umland und stellt eine städtische Wärmeinsel dar. Durch diesen vorhandenen *Temperaturgradienten* zwischen kühleren Grünflächen/Umland und stärker erwärmten Siedlungskörpern kann ein Kaltluftstrom ebenfalls initiiert werden - ein *Flurwindsystem* entsteht. Dieser Prozess kann auch sehr lokal und kleinräumig zwischen einem Park und umgebender Bebauung auftreten, dann wird es *Strukturwindsystem* genannt. Geprägt ist dieser Prozess hauptsächlich von dem Aufstieg von warmen Luftpaketen, die ein thermisches Tief bilden und aufgrund des Druckgradienten zu einem Nachströmen von kühlerer Luft aus dem Umland führen. Diese Strömungen laufen meist radial auf einen überwärmten Raum zu.

Die unterschiedliche Abkühlung wird durch unterschiedliche Erdoberflächeneigenschaften ausgeprägt. Oftmals überlagern sich die unterschiedlichen Prozesse in einer *Kaltluftleitbahn* bzw. im *Kaltluftabfluss* in einer Stadt.

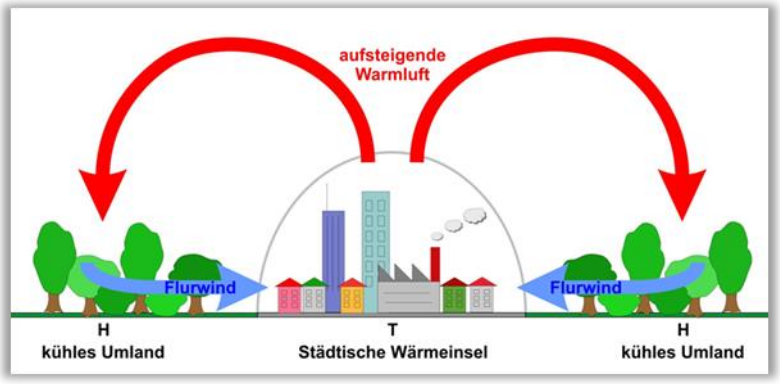


Abbildung 12: Prinzipskizze Flurwind. Quelle: Eigene Darstellung

In der Stadt Leipzig sind die verschiedenen Kaltluftsysteme zu finden, die sich gegenseitig überlagern. Genauere Details sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

3.1.1 Methodik und Vorgehensweise der Kaltluftprozessraumanalyse

Für die detaillierte Analyse der 11 Kaltluftleitbahnen (linienhafte Kaltluftleitbahnen und flächenhafter Kaltluftabfluss), die für das Stadtgebiet Leipzigs identifiziert wurden, werden das bodennahe **Kaltluftströmungsfeld** (Windfeld mit Windgeschwindigkeiten), der **Kaltluftvolumenstrom** und die **Kaltluftproduktionsrate** um 4 Uhr morgens als Grundlage herangezogen. Diese Daten stammen aus der numerischen Modellierung des Stadtklimas im 10 m x 10 m Raster. Das digitale Geländemodell dient zusätzlich zur Konkretisierung des Prozessgeschehens in einer Kaltluftleitbahn als auch die Hindernisse wie Dämme und Gebäude.

Über die Analyse des Digitalen Geländemodells (DGM) nach King (1973) erfolgt zuerst die Ausweisung der **Einzugsgebiete der Kaltluftabflüsse**, diese werden als **Kaltluftprozessräume** bezeichnet. Für jede Kaltluftleitbahn wird ein Einzugsgebiet ausgewiesen, so dass alle Leitbahnen untereinander abgegrenzt sind. Da die Fließrichtung bodennaher Kaltluft ähnlich wie Wasser durch das Gelände bestimmt wird, ist es vergleichbar mit dem Vorgehen zum Wasserscheidenprinzip. Im Stadtgebiet von Leipzig sind die einzelnen Leitbahnen nicht immer eindeutig in **Hang- oder Flurwindabflüsse** unterscheidbar, oftmals überlagern sich diese Prozesse. Zum Kaltluftprozessraum gehören sowohl die Leitbahnen als auch die darin liegenden (belüfteten) Siedlungsgebiete (Wirkraum). Der **Hangabwind** ist ein **flächenhafter Kaltluftabfluss.** Beim **Talabwind** erfolgt der Kaltluftabfluss in **linienhaften Kaltluftleitbahnen** wie Tal- und Niederungsbereiche (siehe Abbildung 11).

Die detailliertere Untergliederung der **Kaltluftprozessräume** *untergliedert d*ie Prozessräume in folgende Funktionsbereiche:

- Kaltluftentstehungsgebiet
- Primäre Leitbahn
- Flächenhafter Kaltluftabfluss
- Kaltlufteinwirkbereich (mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom)
- Kaltluftsammelgebiet
- Entwicklungsbereich.

In Abbildung 1 ist die Vorgehensweise für die Ableitung der Funktionsbereiche der Kaltluftprozessräume schematisch dargestellt. Dabei wurden die im Schema benannten Grenzwerte zur Vorauswahl genutzt und im Anschluss eine gutachterliche Interpretation lagebezogen durchgeführt. Die flächenhaften Ausweisungen orientieren sich nicht an Flurstücks- und administrativen Grenzen. Das Ergebnis ist als Karte der Kaltluftprozessräume im Anhang 8.2 zu finden. In den Steckbriefen zu jedem Kaltluft-

prozessraum findet sich ein Kartenausschnitt. Die Grünflächen außerhalb der Prozessräume besitzen ebenfalls eine lokale Bedeutung, wenn sie zur Kühlung des unmittelbar umgebenden Siedlungsbereiches beitragen. Diese Grünflächen sind jedoch in der hier beschriebenen Prozessraumanalyse der Kaltluftleitbahnen nicht berücksichtigt.

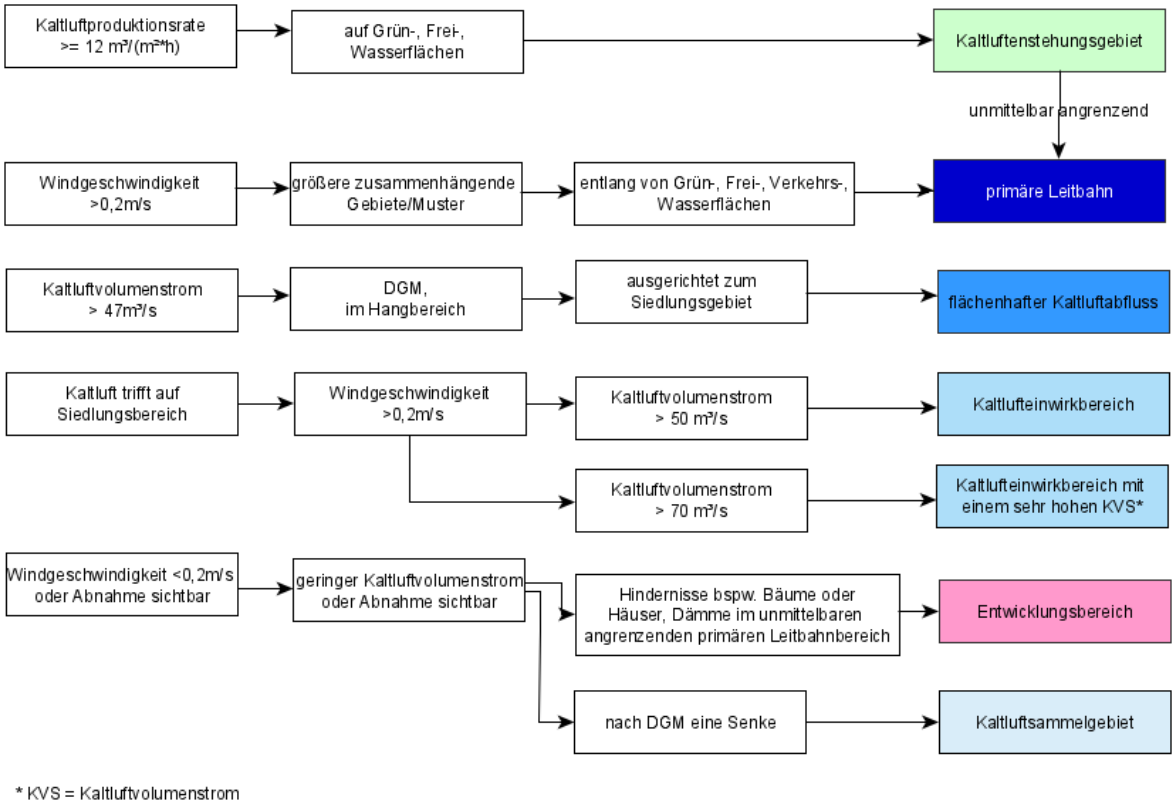


Abbildung 13: Vorgehen bei der Ausweisung der einzelnen Funktionsbereiche im Kaltluftprozessraum.

Die ***Kaltluftentstehungsgebiete*** sind oftmals Grün-, Frei- und Wasserflächen, die laut DGM in den höher gelegenen Bereichen liegen und überdurchschnittlich viel Kaltluft produzieren. Im Wald ist die Kaltluftproduktionsrate unterhalb des Kronendaches sehr gering, da diese für das 2 m Niveau dargestellt ist und der Wald vor allem über dem Kronendach viel Kaltluft produziert. In Hangbereichen kann der Wald auch überdurchschnittlich viel Kaltluft produzieren, die dann unmittelbar abfließt. Der Übergang zwischen dem Kaltluftentstehungsgebiet und der primären Leitbahn ist fließend.

Die ***primäre Leitbahn*** ist ein linienhafter Kaltluftabfluss (Leitbahn erster Ordnung). Sie ist charakterisiert durch eine klimatisch wirksame bodennahe Strömung mit einer erhöhten Windgeschwindigkeit und überdurchschnittlichem Kaltluftvolumen über Grün- und Freiflächen, Straßenzügen oder sehr locker bebauten Siedlungsbereichen wie Schrebergärten. Sie werden als zentraler „Kernbereich“ abgegrenzt.

Der ***flächenhafte Kaltluftabfluss*** wird für die Kaltluftleitbahnen 2. Ordnung ausgewiesen und verläuft ebenfalls entlang von Grün- und Frei-, Verkehrsflächen und ebenfalls locker bebauten Bereichen wie Schrebergärten. Diese Prozessräume besitzen keine linienhaften zentralen Kaltluftleitbahnen sondern sind flächig durch Hangabfluss mit hohen Windgeschwindigkeiten und Kaltluftvolumenstrom aufgrund des Reliefs gekennzeichnet.

Während die Strömung im bodennahen Bereich allmählich durch die Bebauung abgebremst wird, können im Überdachniveau aber weiterhin hohe Kaltluftvolumina vorhanden sein und in den Siedlungsraum einwirken. Daher werden in einem zweiten Schritt die Bereiche mit sehr hohem Volumenstrom innerhalb der Bebauung analysiert und resultieren in einem ***Kaltlufteinwirkbereich*** und ***Kaltlufteinwirkbereich mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom***. Stark durchgrünte Bebauung kann sogar rudimentär zur Entstehung von neuer Kaltluft beitragen.

Als ***Kaltluftsammelgebiet*** sind flache oder konkave Flächen ausgewiesen, über die die Kaltluft nicht weitertransportiert wird, sondern „gefangen“ gehalten und gesammelt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit und der Kaltluftvolumenstrom sind sehr gering und das DGM verzeichnet an der Stelle eine Senke.

Als ***Entwicklungsschwerpunkt*** werden Areale abgegrenzt, in denen der primäre Teil der Leitbahn sich nicht voll entfalten kann, hauptsächlich aufgrund von Hindernissen. Hier besteht das Potenzial, im weiteren städtebaulichen Entwicklungsprozess durch eine optimierte Baukörperstellung, Rückbau oder Schaffung von Durchlässen das verbesserte Fließen von Kaltluft zu ermöglichen und somit den primären Leitbahnbereich zu erweitern oder Anschluss an bestehende Strukturen zu schaffen.

Nicht jeder Prozessraum weist alle genannten Funktionsbereiche auf. Jedoch sind immer Kaltluftentstehungsgebiete, primäre Leitbahn oder flächenhafter Kaltluftabfluss und Kaltlufteinwirkbereich vorhanden.

Des Weiteren sind in der Karte im Anhang 9.2 nachrichtlich die Informationen zu den ***Ventilationsbahnen*** enthalten. Ventilationsbahnen sind Achsen, die Frischluft zur Durchlüftung befördern. Die Ventilationsbahnen funktionieren bei anderen Wetterlagen als die der Klimaanalyse (autochthone Wetterlage) zugrunde gelegten. Weiterhin lassen sich in der Karte auch die ***Lufthygieneindexberechnungen*** wiederfinden, die einen mindestens erhöhten Handlungsbedarf für Straßenabschnitte vorweisen und die im Zusammenhang mit den Kaltluftprozessräumen auf lufthygienisch belastete Kaltluft hinweisen können. Es erfolgt keine Verdriftungsberechnung der Schadstoffe PM_{10} und NO_2. Hierbei ist anzumerken, dass die lufthygienische Belastung ihr Minimum in der Nacht zwischen 2 Uhr bis 4 Uhr erreicht, so dass generell davon ausgegangen werden kann, dass es kaum eine Belastung der schlafenden Bevölkerung aufgrund der Luftschadstoffe PM_{10} und NO_2 gibt.

Die detaillierten Informationen liefern nun Arbeitsgrundlagen, um Planungen und Entwicklungen wie Neubebauungen, Umbau des Bestandes oder Grün- und Freiflächenplanungen noch gezielter auf den Erhalt oder wenn möglich auf die Verbesserung des Stadtklimas auszurichten.

So können anhand der Steckbriefinformationen primäre Leitbahnen geschützt werden und von Bebauung freigehalten oder erweitert werden. Die Überwärmung der Siedlungsbereiche kann mit den hier zur Verfügung gestellten Informationen reduziert werden, indem die Durchlüftung mit Kaltluft erhalten oder gefördert wird. Gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels ist es essentiell wichtig, die Kaltluftleitbahnen in ihrer Funktion zu erhalten und nach Möglichkeit zu entwickeln.

Bei der Aufstellung eines Bebauungsplanes sollten die Ergebnisse der betroffenen Prozessräume Berücksichtigung finden. Auch in den integrierten Stadtteilentwicklungskonzepten sollten die Ergebnisse Eingang finden.

3.1.2 Erhalt und Vernetzung von für Kaltlufthaushalt relevante Flächen

Die Grün- und Freiflächen im Kaltluftentstehungsgebiet, in der primären Leitbahn, im flächenhaften Kaltluftabfluss und wo relevante Mengen an Kaltluft produziert und weitertransportiert werden, sollten erhalten und geschützt werden sowie eine Überbauung oder Versiegelung vermieden werden. Ein besonderer Bereich ist bspw. der Hauptbahnhof mit seinem rauhigkeitsarmen Gleisvorfeld, der am Ende des Kaltluftprozessraumes Seehausen, Thekla, Mockau liegt (siehe Abschnitt 3.4). Auf den Freiflächen um den Bahnhof, sowie im Kaltluftprozessraum Stötteritz (siehe Abschnitt 3.7) und Prager Straße in Reudnitz (siehe Abschnitt 3.8) könnten weitere Grünflächen und/oder breitere Achsen die Kaltluft weiter in die Siedlungsbereiche befördern. Falls Bebauungen geplant sind, sollten die Gebäude in Strömungsrichtung ausgerichtet werden und Strömungsdurchlässe wie Abstandsflächen und Hausgärten eingeplant werden.

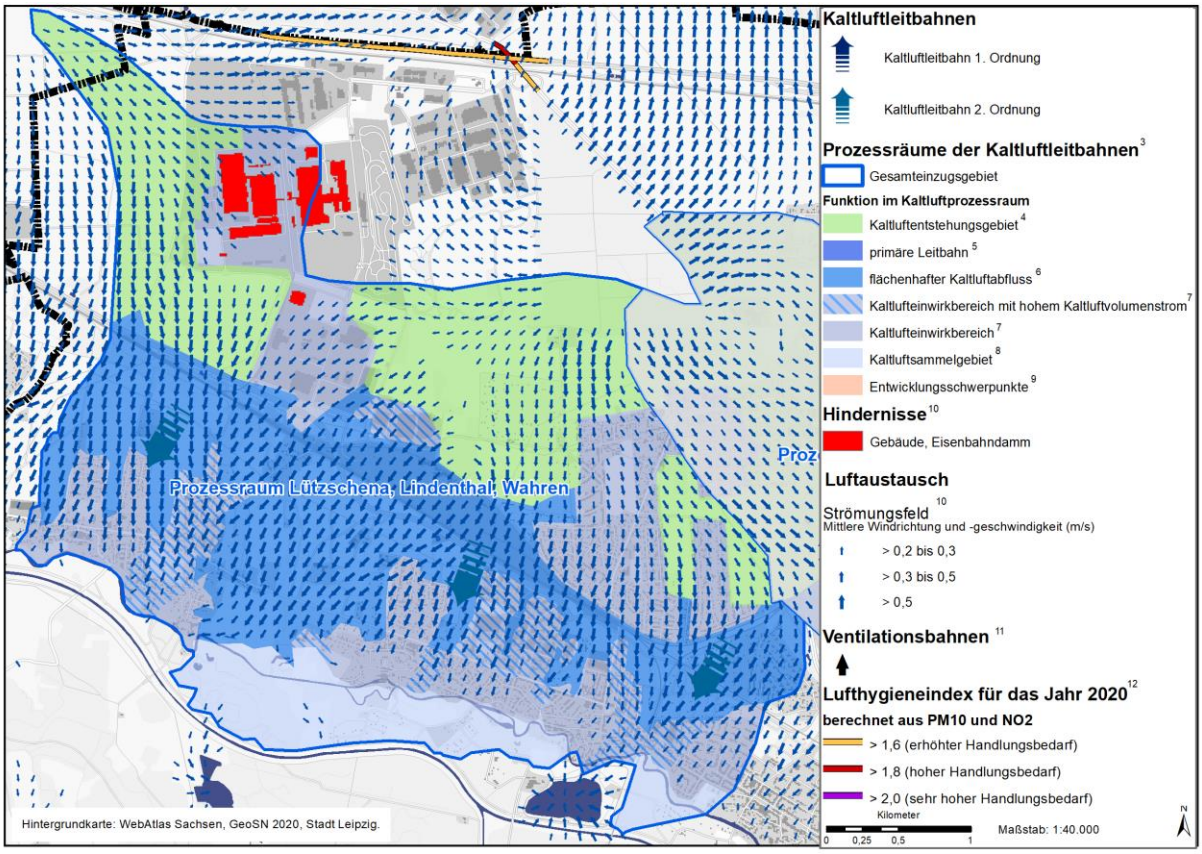
Grün- und Freiflächen im Kaltlufteinwirkbereich sollten ebenfalls erhalten bleiben und über die Anlage von neuen Grünflächen erweitert und vernetzt werden. Die Vernetzung von (urbanen) Frei- und Grünflächen ist neben dem Arten- und Biotopschutz auch für das Stadtklima eine wichtige Option, indem eine proaktive Vernetzung von zuvor unzusammenhängenden Grünflächen verfolgt werden sollte.

Auf diese Weise können die vorhandenen Leitbahnen weitergeführt werden und das kleinräumige Luftaustauschsystem ausgebaut werden. Neben der Wohlfahrtswirkung für den nächtlichen Kaltlufthaushalt kommt es zusätzlich zur Erhöhung des Erholungsangebotes für vom Hitzestress am Tage Betroffene.

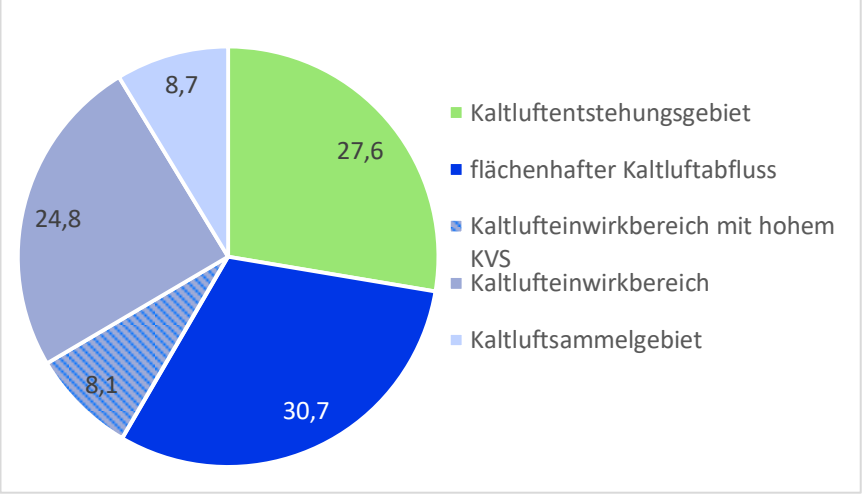
Die Vernetzung muss allerdings nicht zwangsläufig durch die Schaffung neuer Parks und Grünanlagen erfolgen, auch begrünte Radwege und Gleisflächen können eine entsprechende Funktion erfüllen. Aufgrund des Ausströmens der Kaltluft aus den Grünflächen ist auch eine unmittelbare räumliche Verknüpfung nicht unbedingt erforderlich, wenn die trennende Bebauung locker, nicht zu hoch und im Idealfall durch Vorgärten oder grüne Wege geprägt ist. Im Rahmen von Rückbau und Umbau sollte jeweils der verbesserte Weiterfluss der Kaltluft analysiert und bewertet werden. Dazu können zum einen die erarbeiteten Kaltluftprozessräume (siehe Kapitel 3), die Klimaanalysekarte Nacht als Grundlage als auch das Katluftströmungsfeld genutzt werden.

3.2 Sekundäre Leitbahn I – Flächenhafter Kaltluftabfluss Lützschena, Lindenthal, Wahren [4]

Gesamtfläche:	1.604,4 ha
Lage:	Im Nordwesten von Leipzig



Flächenanteile im Kaltluftprozessraum:



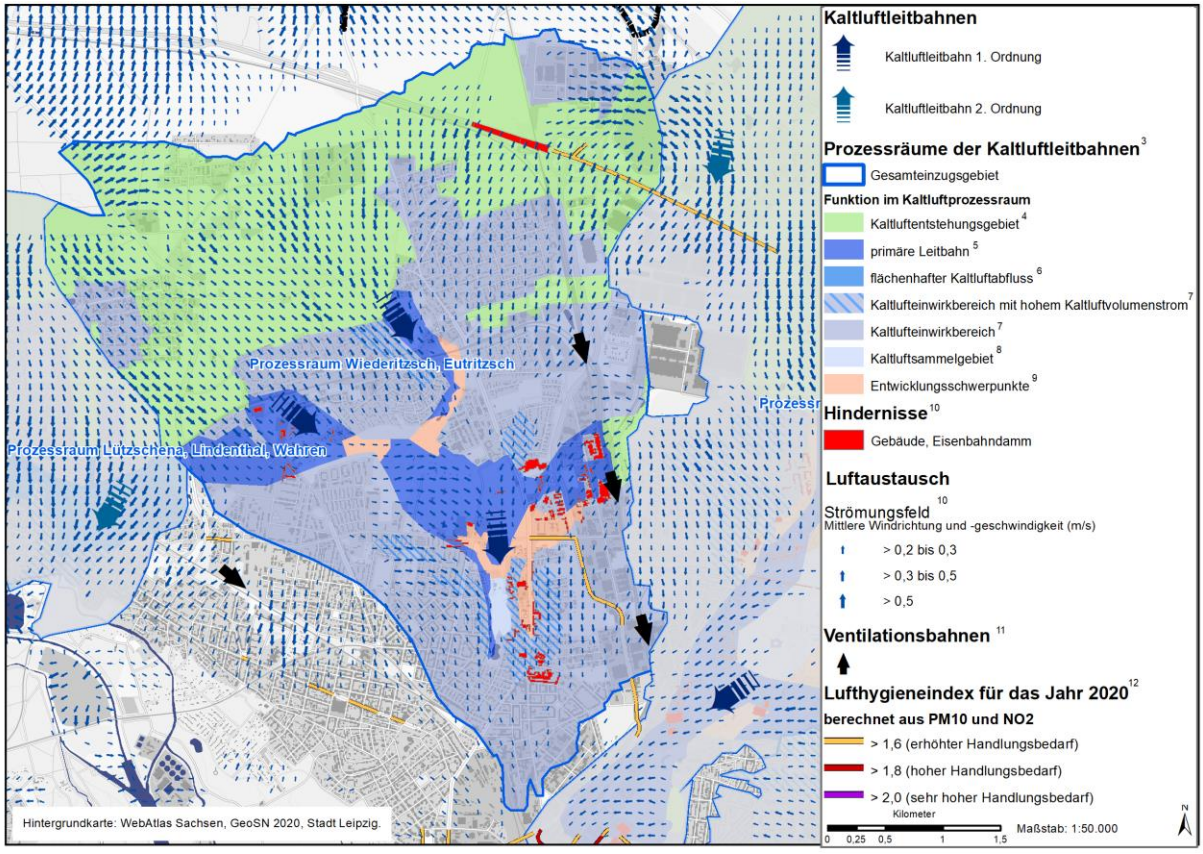
[4] Die Fußnoten der Kartenlegende finden Sie in der Hauptkarte Kaltluftprozessräume im Anhang 8.2. Die hier dargestellten Kartenausschnitte sind aus dieser Karte entnommen.

Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	178,5	58,0
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	103,5	45,1
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	15,9	159,5	71,9
	Kaltlufteinwirkbereich	0	98,7	47,6
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	21,8	178,5	80,6
	Kaltluftsammelgebiet	2,8	83,5	45,0
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,8	21,5	8,4
	Kaltluftentstehungsgebiet	2,4	18,4	12,1
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	2,2	17,4	9,1
	Kaltlufteinwirkbereich	1,8	15,6	5,1
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	1,9	15,5	5,1
	Kaltluftsammelgebiet	1,9	21,5	10,6
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	1,3	0,4
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	1,0	0,4
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	0	1,3	0,6
	Kaltlufteinwirkbereich	0	1,0	0,3
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	1,3	0,4
	Kaltluftsammelgebiet	0	0,4	0,1
Beschreibungen zum Prozessbereich				
Kaltluftentstehungsgebiet	Im Prozessraum im Nordwesten der Stadt Leipzig sind über 27% der Flächen dem Kaltluftentstehungsgebiet zuzuordnen. Dabei erstreckt sich auch eine Fläche über die Stadtgrenze von Leipzig nach Schkeuditz hinaus. Zu den Kaltluftentstehungsgebieten gehören Ackerflächen, die Erweiterungsfläche für das Porschewerk, Beweidungsflächen am Porschewerk, Teile des Tannenwaldes, Kleingartenanlagen wie Lindenthal West, Wahrener Wasserturm und Grün- und Freiflächen (Ackerflächen) an der Langen Trift.			

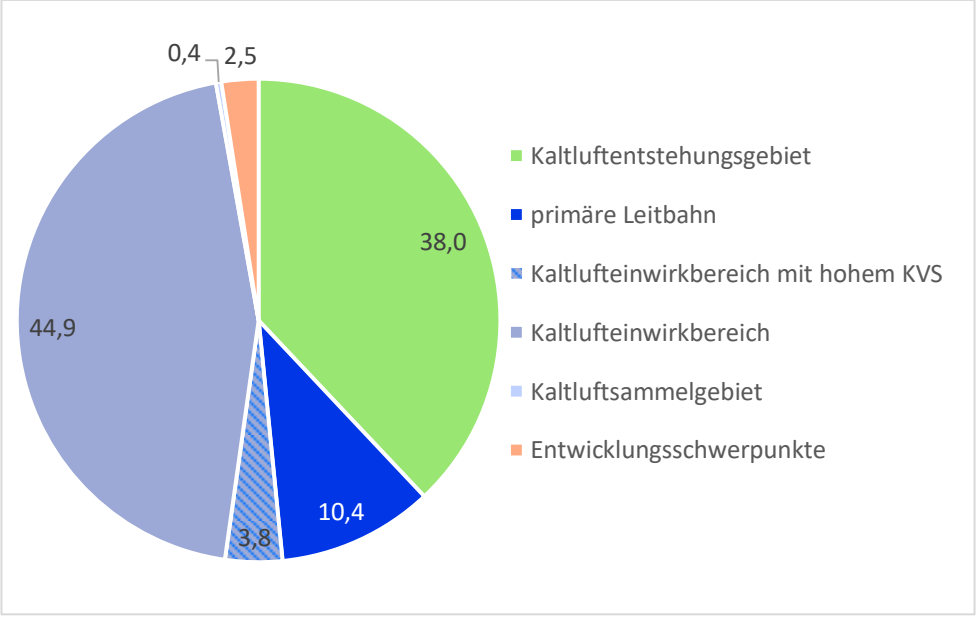
Flächenhafter Kaltluftabfluss	Der flächenhafte Kaltluftabfluss schließt sich dann unmittelbar an und zieht sich über den gesamten Hangabschnitt über die dort vorhandenen Grün- und Freiflächen. Über 30 % der Flächen im Prozessraum sind als flächenhafter Kaltluftabfluss deklariert.
Kaltlufteinwirkbereich	An den flächenhaften Kaltluftabfluss und Teile der Kaltluftentstehungsgebiete schließt sich der Kaltlufteinwirkbereich an, teilweise mit einem sehr hohen KVS. Fast 33 % der Flächen werden von Kaltluft durchströmt.
Kaltluftsammelgebiet	Als Kaltluftsammelgebiet ist die Flussaue der Weißen Elster und Hundewasser bis zur Neuen Luppe identifiziert worden. Dort liegt u.a. der Schlosspark Lützschena und weitere Wald-, Grün- und Freiflächen. Das Gelände ist dort sehr flach, so dass die Kaltluft den Hang heruntergeflossen kommt und dort dann ausläuft bzw. stehen bleibt, was sich an den Windgeschwindigkeiten von 0,4 m/s im Maximum bzw. dem niedrigen Mittelwert von 0,1 m/s niederschlägt.
Hindernis	Als Strömungshindernis sind die Gebäude des Porschewerkes im Gewerbegebiet anzusehen.
Ventilationsbahnen	Es gibt keine Ventilationsbahn im Prozessraum.

3.3 Kaltluftprozessraum II - Leitbahn Wiederitzsch, Eutritzsch [4]

Gesamtfläche:	2.123 ha
Lage:	Im Norden von Leipzig



Flächenanteile im Kaltluftprozessraum:



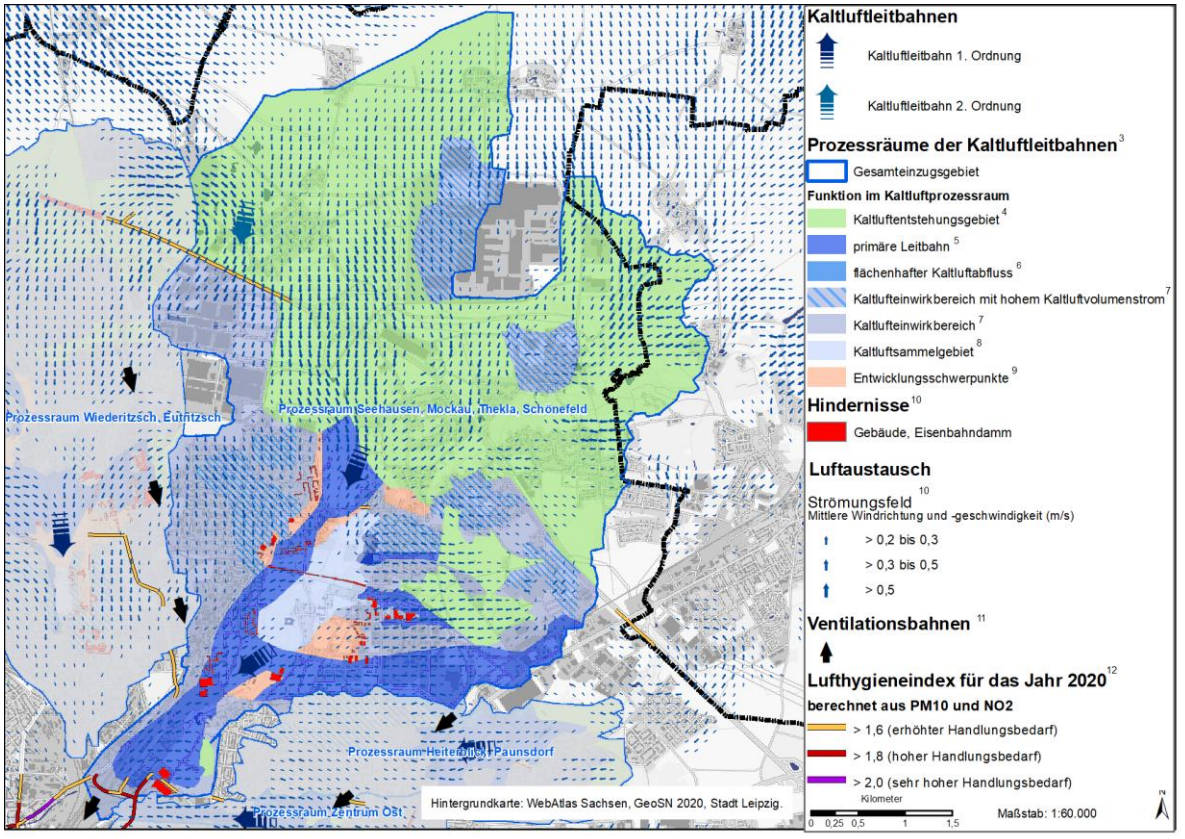
Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	219,6	53,6
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	219,6	50,8
	Primäre Leitbahn	20,1	93,3	62,4
	Kaltlufteinwirkbereich	4,6	152,4	49,0
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	22,8	89,7	61,0
	Kaltluftsammelgebiet	28,3	70,4	46,9
	Entwicklungsbereich	20,5	76,6	51,9
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	4,8	20,3	7,6
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,9	17,6	10,9
	Primäre Leitbahn	1,8	20,3	8,4
	Kaltlufteinwirkbereich	1,8	20,1	5,0
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	2,6	14,1	4,8
	Kaltluftsammelgebiet	3,1	10,3	9,6
	Entwicklungsbereich	1,9	14,9	7,1
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	1,5	0,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	1,5	0,4
	Primäre Leitbahn	0	0,6	0,3
	Kaltlufteinwirkbereich	0	1,1	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	0,6	0,3
	Kaltluftsammelgebiet	0	0,3	0,1
	Entwicklungsbereich	0	0,4	0,1

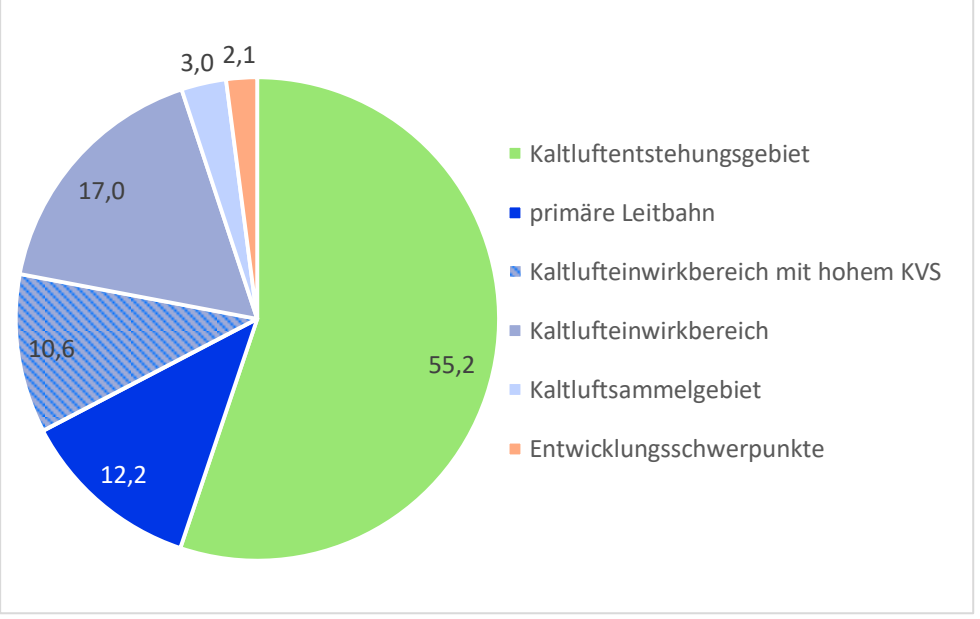
Beschreibungen zum Prozessbereich	
Kaltluftentstehungsgebiet	Das Kaltluftentstehungsgebiet besitzt mit 38 % den zweitgrößten Flächenanteil am Gesamtprozessraum der Leitbahn. Die Entstehungsgebiete befinden sich hauptsächlich im Norden der Leitbahn. Zu diesen Flächen zählen v.a. Ackerflächen und teilweise Siedlungsbereiche, die jedoch stark durchgrünt sind. Auch die Grün- und Brachflächen westlich des Park & Ride-Platzes an der Messe-Allee zählen dazu. Im Osten, am Rand des Prozessraumes, liefern die Grünflächen zwischen und entlang der Gypsberg Straße und des Mockauer Rings ausreichend Kaltluft, um zu einem Entstehungsgebiet zu zählen. Das Kaltluftentstehungsgebiet hat eine hohe mittlere KPR mit knapp 11 m^3/m^2h und einem sehr hohen KVS von knapp 220 m^3/s.
Primäre Leitbahn	Die primäre Leitbahn erstreckt sich von den Kaltluftentstehungsgebieten im Norden nach Süden und besitzt einen Flächenanteil von 10,4 %. Am Ende der Landsberger Straße bildet sich der erste primäre Leitbahnbereich aus, aber auch entlang des Lindenthaler Wassers bzw. der Nördlichen Rietzschke - WG "Martinshöhe“. Normalerweise würden sich die beiden primären Leitbahnbereiche südlich des Mistelbogens und Holunderbogens vereinen, allerdings ist aufgrund der hohen Baumanzahl der Weiterfluss der Kaltluft verhindert (daher als Entwicklungsbereich gekennzeichnet), die Bäume stellen also ein Strömungshindernis dar, so dass die primäre Leitbahn unterbrochen wird. Entlang des weiteren Verlaufes der nördlichen Rietzschke über das Stadion des Friedens hinweg ist die primäre Leitbahn wieder ausgebildet. Ein östlicher Zufluss kommt über die Dübener Landstraße/Nathusiusstraße und die dort vorhandenen wenig versiegelten Brachflächen hinzu. Über die primäre Leitbahn fließt die Kaltluft dann, nach kurzer Unterbrechung durch eine Baumgruppe südlich der Hundewiese im Arthur-Bretschneider-Park weiter bis zum südlichen Teil des Arthur-Bretschneider-Parkes mit See.
Kaltlufteinwirkbereich	Insgesamt 48,7 % des Prozessraumes Wiederitzsch umfasst Siedlungsflächen, die von der Kaltluft profitieren. Zum einen basiert das auf dem direkten Anschluss an das Kaltluftentstehungsgebiet im Norden. Zum anderen befinden sich gut mit Kaltluft versorgte Bereiche, westlich, südlich und östlich an die primäre Leitbahn angrenzend. Da der Kaltluftprozessraum mit sehr lockerer, stark durchgrünter Wohnbebauung charakterisiert ist, kann die Kaltluft gut in die Wohnbereiche eindringen.
Entwicklungsbereich	Die Entwicklungsbereiche sind in diesem Prozessraum vor allem Flächen in der primären Leitbahn, oftmals mit Bäumen bestanden, die als Strömungshindernis wirken. Auch Teile der Siedlungsbereiche zählen hierzu. Jedoch ist es fraglich, ob hier Handhabe besteht, Verbesserungen herbeizuführen. Insgesamt machen diese Flächen ca. 2,5 % am gesamten Prozessraum aus.
Hindernisse	Vielfältige Hindernisse sind in dem Prozessraum zu finden. Das sind sowohl die bereits genannten Baumgruppen als

	auch Gebäude, wie bspw. der Hornbach-Markt an der Nathusiusstraße oder das Gewerbegebiet östlich der Zschortauer Straße, oder Häuser im Stadtteil Eutritzsch zwischen Gräfestraße und Delitzscher Straße im unmittelbaren östlichen Anschluss an den Arthur-Bretschneider-Park. Aber auch der Autobahndamm der A14 westlich der Auffahrt Leipzig Mitte wirkt stauend auf die Kaltluft.
Ventilationsbahnen	Eine Ventilationsbahn befindet sich im Kaltluftprozessraum entlang der Gleise, die von Nord nach Süd parallel zur B2 und Mockauer Ring verlaufen. Anhand der Strömungspfeile, die sich bei einer autochthonen Wetterlage ausbilden (siehe Kartenausschnitt) ist ersichtlich, dass diese Ventilationsbahn bei der zugrunde gelegten Wetterlage der Klimaanalyse nicht funktioniert, in anderen Situationen aber zur Be-und Entlüftung angrenzender Siedlungsbereiche beitragen kann.

3.4 Kaltluftprozessraum III - Leitbahn Seehausen, Thekla, Mockau, Schönefeld [4]

Gesamtfläche:	2.965,1 ha
Lage:	Im Nordosten von Leipzig





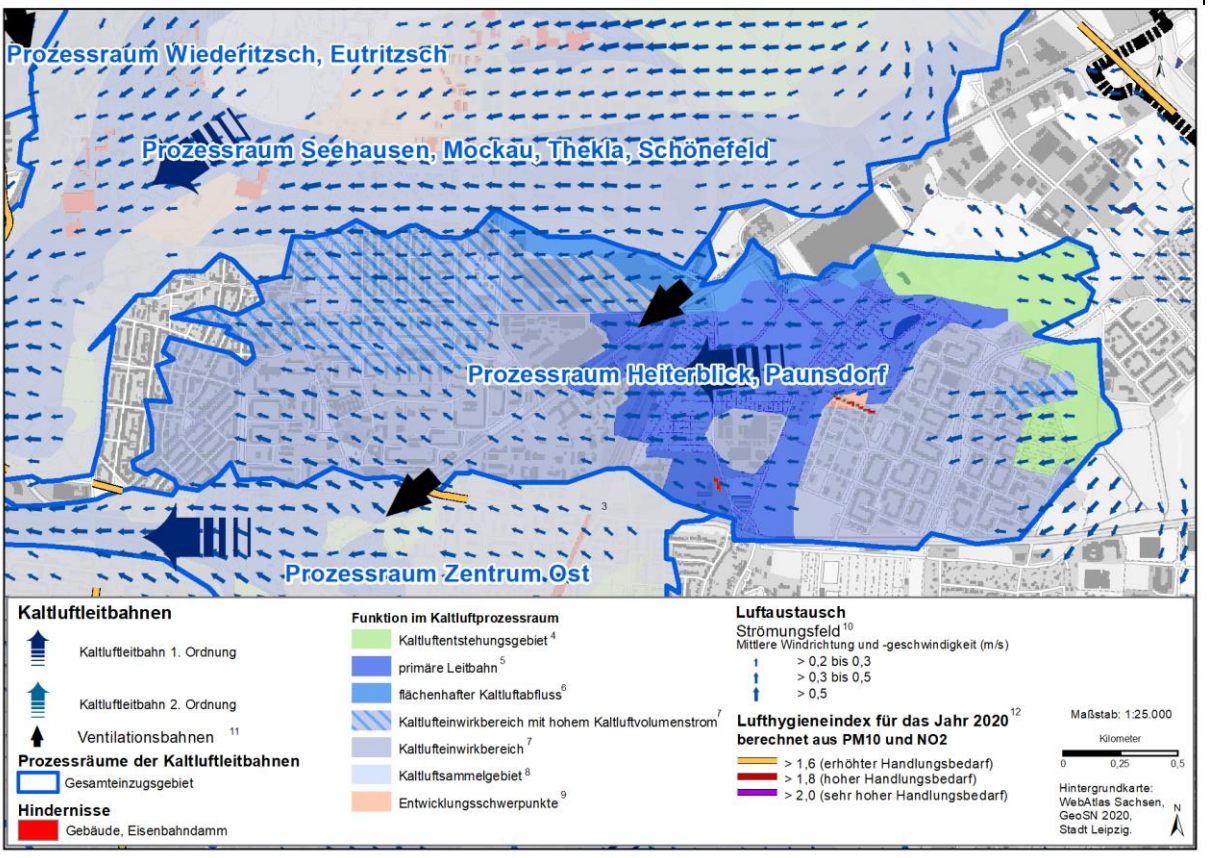
Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	2,6	120,6	57,5
	Kaltluftentstehungsgebiet	2,6	120,6	59,5
	Primäre Leitbahn	12,4	120,6	58,2
	Kaltlufteinwirkbereich	2,6	110,3	51,3
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	22,0	95,9	61,5
	Kaltluftsammelgebiet	29,9	92,2	59,3
	Entwicklungsbereich	29,9	83,2	55,5
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,7	19,9	7,7
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,7	17,1	10,8
	Primäre Leitbahn	1,7	20,0	7,5
	Kaltlufteinwirkbereich	1,8	17,0	5,3
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	1,8	15,7	5,2
	Kaltluftsammelgebiet	1,8	17,6	9,9
	Entwicklungsbereich	2,0	15,1	7,6
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	1,1	0,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	1,1	0,4
	Primäre Leitbahn	0	0,8	0,3
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,7	0,3
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	0,6	0,3
	Kaltluftsammelgebiet	0	0,6	0,2
	Entwicklungsbereich	0	0,5	0,2

Beschreibungen zum Prozessbereich	
Kaltluftentstehungsgebiet	Das Kaltluftentstehungsgebiet ist mit über der Hälfte der Fläche (fast 55 %) die Hauptkategorie des Kaltluftleitbahnsystems im Nordosten. Es gehören v.a. Ackerflächen und Schrebergartensiedlungen zum Kaltluftentstehungsgebiet. Eine weitere Kaltluftentstehungsfläche befindet sich zwischen der Teslastraße, Am Eichberg und Cleudnerstraße.
Primäre Leitbahn	Die primäre Leitbahn macht 12,1% der Fläche an dem Prozessraum der Kaltluftleitbahn aus. Die primäre Leitbahn liegt zum einen an der Parthe, als auch teilweise im Gewerbegebiet an der Torgauer Straße, Gewerbegebiet Leipzig Nordost und weiter über die Leupoldstraße. Im Bereich der Sportschule Egidius Braun und dem Sportpark Gontardweg trifft sie auf den Teil, der entlang der Parthe fließt. Weiter geht es über den Gewerbepark, die Berliner Brücke, die Rackwitzer Straße und die Gleise bis zum Hauptbahnhof. Auch Teile des Mariannenparkes in der Nähe des Hauptbahnhofes werden zur primären Leitbahn gezählt. Im Osten gibt es weitere kleine Leitbahnbereiche, die sich entlang der Sosaer Straße und der Gleise bis zum Haltepunkt Thekla erstrecken und einzelne lokale Systeme sind.
Kaltlufteinwirkbereich	Von der Kaltluft profitieren im Kaltluftprozessraum insgesamt 27,4 % der Siedlungsbereiche, wobei sogar 10,6 % einen Einwirkbereich mit einem sehr hohen KVS im Prozessraum vorweisen. Dies betrifft vor allem das Messegelände, die Einfamilienhaussiedlung zwischen der Mockauer Straße über die Essener Straße und der Majakowskistraße. Im Osten der Kaltluftleitbahn ist das Wohngebiet zwischen der Wotanstraße und der Theklaer Straße im Einwirkbereich. Auch Teile des Gleisanlagenkörpers der Deutschen Bahn profitieren von der Kaltluft.
Kaltluftsammelgebiet	Der Abtnaundorfer Park und die nördlich anschließenden locker besiedelten Bereiche von Abtnaundorf/Schönefeld stellen eine Kaltluftsenke dar. Das DGM ist an der Stelle konkav gewölbt, was bedeutet, dass sich die kalte Luft an dieser Stelle sammelt.
Entwicklungsbereich	Insgesamt sind 2 % der Fläche zum Entwicklungsbereich zu rechnen. Es gibt mehrere Entwicklungsbereiche, die durch Umbaumaßnahmen zu primären Leitbahnbereichen umfunktioniert werden könnten. Ob das jeweils sinnvoll ist, sollte im Einzelfall geprüft und entschieden werden, weil beispielsweise eine starke Überwärmung der Siedlungsgebiete gegeben sein könnte, was jedoch hier nicht der Fall ist. In diesem Fall sind Bäume so dicht gewachsen, dass sie ein Strömungshindernis an der Stelle darstellen. Aber auch Häuser können ein Strömungshindernis darstellen. Im Bereich der primären Leitbahn in Mockau Nord entlang der Stralsunder Straße/Kieler Straße könnte der Leitbahnbereich durch Rückbau erweitert werden. Auch gegenüber: entlang der Kiebitzstraße wäre das denkbar. Der Bereich des Sportplatzes am Gontardweg zählt ebenso zu den Entwicklungsbereichen, da die Strömung hier aufgrund der Bäume stark abgebremst wird.
Hindernisse	Als Strömungshindernisse ist der Bahndamm zu beurteilen, da er genau senkrecht zur Strömungsrichtung verläuft. Auch einzelne Gebäude sind Strömungshindernisse, da sie quer (mit der längsten

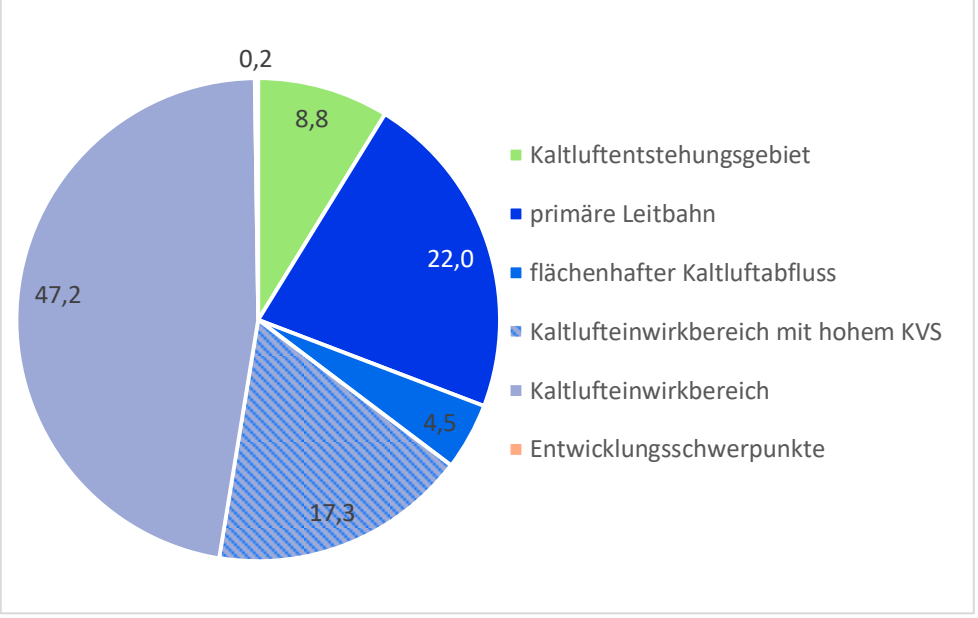
	Seite) zur Fließrichtung stehen. Der Entwicklungsbereich ist z.T. deshalb markiert, da Bäume die Strömung in diesem Bereich abbremsen.
Ventilationsbahnen	Vorhandene Ventilationsbahnen sind außerhalb des Kaltluftprozessraumes im Westen und Südosten vorzufinden.

3.5 Kaltluftprozessraum IV - Leitbahn Heiterblick, Paunsdorf [4]

Gesamtfläche:	432,6 ha
Lage:	Im Osten von Leipzig Heiterblick, Paunsdorf



Flächenanteile im Kaltluftprozessraum:

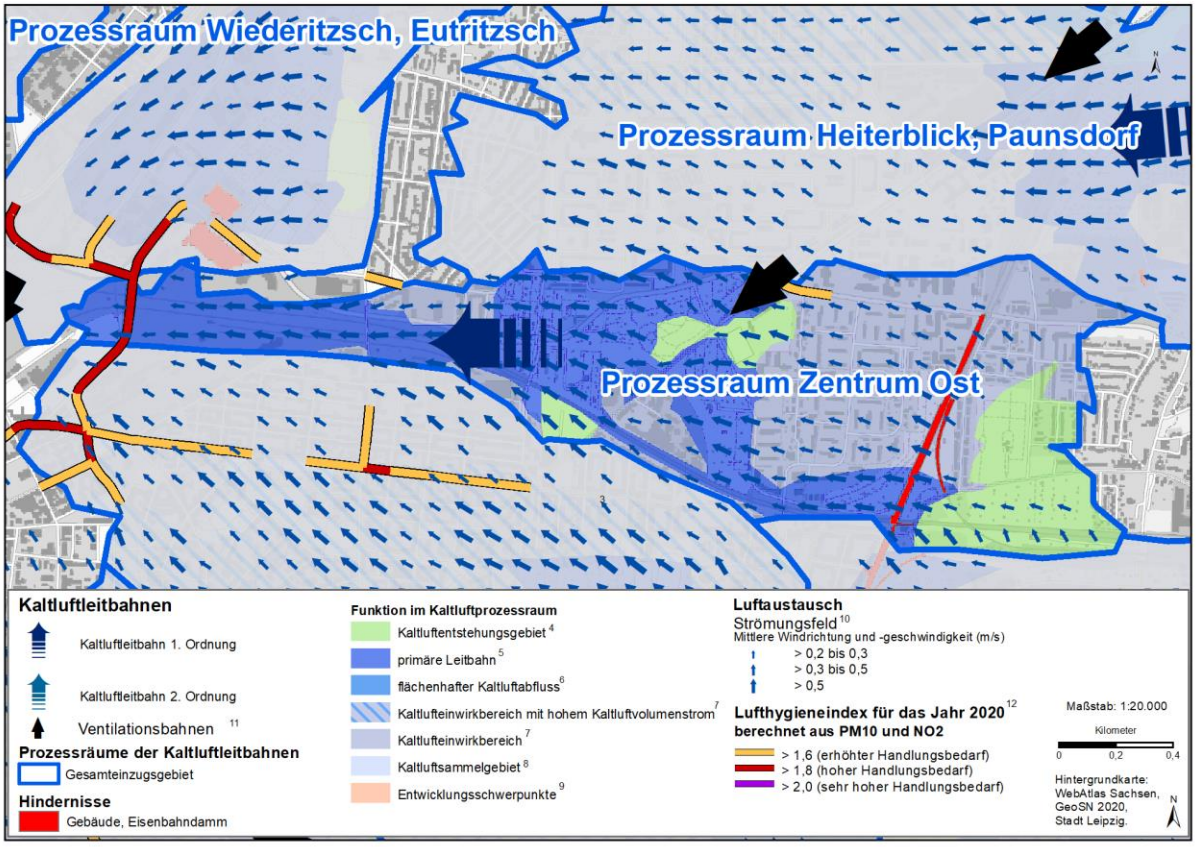


	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Gesamtes Prozessgebiet	8,2	70,6	38,4
	Kaltluftentstehungsgebiet	12,4	70,3	39,7
	Primäre Leitbahn	14,5	67,7	46,0
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	20,5	55,0	34,9
	Kaltlufteinwirkbereich	8,2	64,2	35,1
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	22,4	70,6	51,8
	Entwicklungsbereich	26,8	38,6	35,4
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,9	16,1	7,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	2,7	16,1	11,4
	Primäre Leitbahn	1,9	16,1	9,2
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	2,7	16,3	8,0
	Kaltlufteinwirkbereich	2,7	19,8	4,6
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	2,6	14,2	4,5
	Entwicklungsbereich	2,8	14,4	6,3
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	0,5	0,2
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,4	0,2
	Primäre Leitbahn	0	0,5	0,3
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	0	0,4	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,5	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	0,5	0,3
	Entwicklungsbereich	0	0,3	0,2

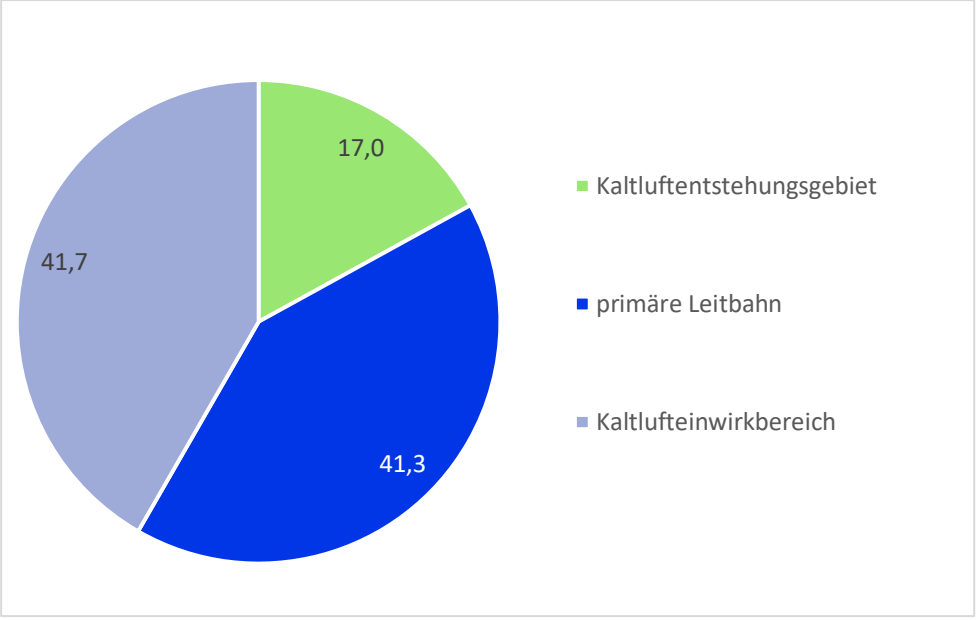
Beschreibungen zum Prozessbereich	
Kaltluftentstehungsgebiet	Zum Kaltluftentstehungsgebiet gehören Teilbereiche des „Grünen Bogens Paunsdorf“ und Teile des Paunsdorfer Wäldchens, welches sich am Eichhörnchenweg erstreckt im östlichen Teil des Kaltluftleitbahneinzugsgebietes. Diese Flächen machen 8,8 % am Kaltluftprozessraum aus und liefern maximale Kaltluftvolumenströme von >70 m³/s. Obwohl die Maximalwerte der Kaltluftproduktion im Funktionsbereich „Flächenhafter Kaltluftabfluss“ mit 19,8 m³/m²h am höchsten sind, ist anhand des Mittelwertes der KPR eindeutig zu sehen, dass die meiste Kaltluft im Funktionsbereich „Kaltluftentstehungsgebiet“ mit 11,3 m³/m²h entsteht. Auch im primären Leitbahnbereich gibt es noch eine hohe Rate von 9,2 m³/m²h.
Primäre Leitbahn	Die primäre Leitbahn erstreckt sich über den Bürgerpark Paunsdorf, über eine große Ansammlung von Brachflächen „An den Theklafeldern“ und verläuft weiter über die Hohentichelnstraße, den Friedhof sowie Schrebergartenanlage und über die Gleisanlagen bis zur B87 Torgauer Straße. Die primäre Leitbahn nimmt eine Fläche von 22 % am gesamten Kaltluftleitbahneinzugsgebiet ein.
Flächenhafter Kaltluftabfluss	Der flächenhafte Kaltluftabfluss ist mit einem recht geringen Anteil von 4,5 % im Kaltluftprozessraum zu finden. Es handelt sich um Flächen, die im nördlichen Bereich liegen und direkt an die primäre Leitbahn angrenzen. Sie liegen entlang der Leupoldstraße und ziehen sich bis kurz hinter die Penckstraße. Die Windgeschwindigkeiten und der KVS sind geringer als in der primären Leitbahn, jedoch besitzt der Bereich aufgrund seiner geringen Rauigkeit immer noch eine Funktion.
Kaltlufteinwirkbereich	Zum Kaltlufteinwirkbereich zählen alle bebauten Bereiche, die nicht zu den anderen Funktionsbereichen gehören. Dazu zählt z. B. das Gewerbegebiet Schönefeld Ost, der Wissenschaftspark an der Permoser Straße und alle umgebenden bebauten Bereiche bis zur Theklaer – und Gorkistraße. Im nördlichen Bereich sind es die Häuser, die an der Geißblattstraße/Rotdornstraße stehen, die von der Zufuhr von Kaltluft profitieren.
Entwicklungsbereich	Ein potenzieller Entwicklungsbereich liegt in einer Engstelle des primären Leitbahnbereiches zwischen der Schrebergartensiedlung und den Häusern bei der Geißblattstraße/Rotdornstraße, am Aussichtspunkt „Am Bogensee“.
Hindernisse	Als Hindernis wurde ein Gebäude an der Hohentichelnstraße identifiziert, das quer zur Strömungsrichtung steht.
Ventilationsbahnen	Es verläuft eine Ventilationsbahn quer vom Nordosten nach Südwesten durch den Kaltluftprozessraum entlang der B87 Torgauer Straße. Diese Ventilationsbahn ist bei einer sommerlichen Hochdruckwetterlage (autochthone Wetterlage) nicht funktionstüchtig, da sich die Strömung in eine andere Richtung ausbildet und über die B87 hinwegströmt. In Situationen mit paralleler Anströmung zur Ventilationsbahn kann sie aber ent- oder belüftend wirken.

3.6 Kaltluftprozessraum V - Leitbahn Zentrum Ost [4]

Gesamtfläche:	205,3 ha
Lage:	Im Osten von Leipzig Zentrum



Flächenanteile im Prozessraum:

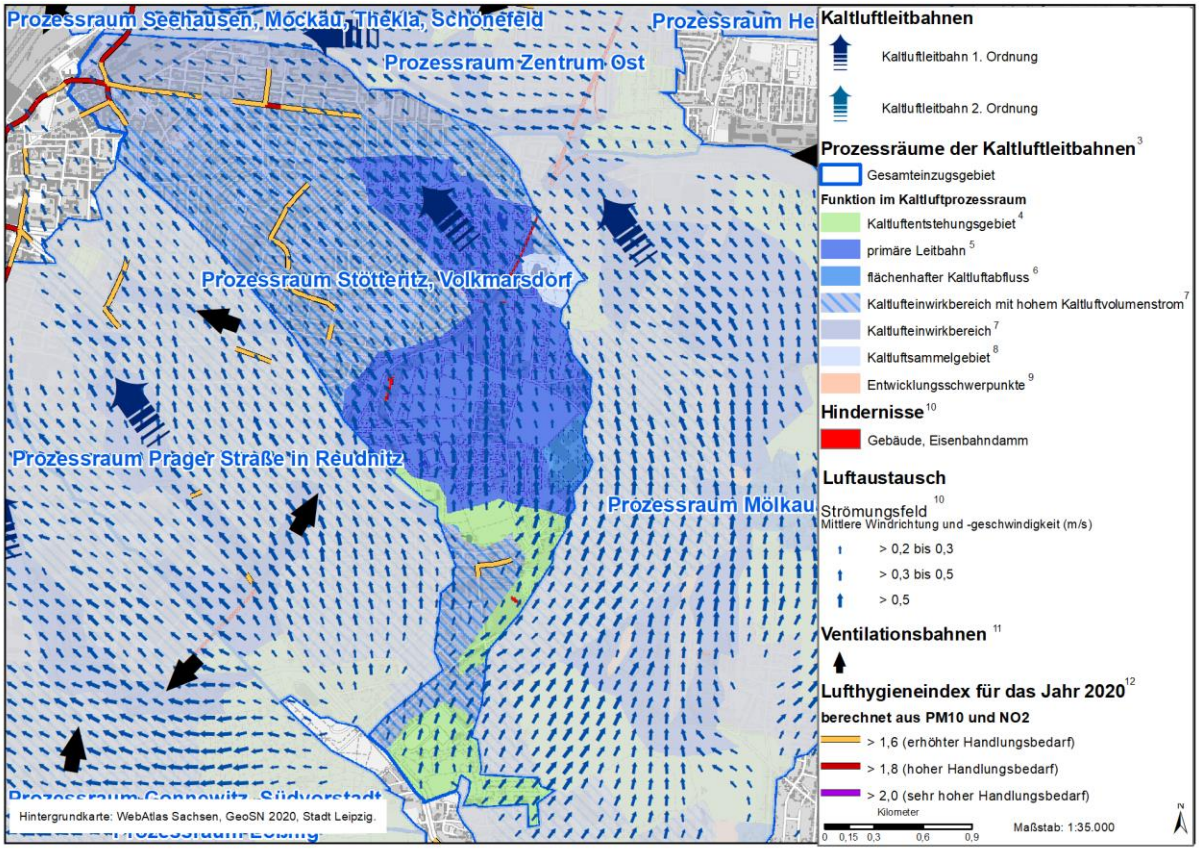


Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	9,1	76,8	40,2
	Kaltluftentstehungsgebiet	15,2	65,8	33,2
	Primäre Leitbahn	9,1	76,8	49,7
	Kaltlufteinwirkbereich	9,9	71,8	36,8
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	2,0	19,4	6,5
	Kaltluftentstehungsgebiet	2,7	19,4	8,4
	Primäre Leitbahn	2,6	15,1	6,2
	Kaltlufteinwirkbereich	2,0	14,3	4,9
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	0,6	0,2
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,6	0,3
	Primäre Leitbahn	0	0,6	0,4
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,5	0,2
Beschreibungen zum Prozessbereich				
Kaltluftentstehungsgebiet	Es gibt drei Teilbereiche, die zum Kaltluftentstehungsgebiet gerechnet werden, die insgesamt 17 % der Fläche im Kaltluftprozessraum ausmachen. Zum größten Kaltluftentstehungsgebiet im Osten gehören der Friedhof in Sellerhausen und der Kleingartenverein Engelsdorf Paunsdorf e.V. Im zentralen Bereich des Kaltluftprozessraumes gehören die Sportanlagen des SV Tapfer Leipzig e.V. und Teile des Volksgartens dazu. Wie bereits im Kapitel 3.1.1 beschrieben, ist der Übergang zwischen Kaltluftentstehungsgebiet und primärer Leitbahn fließend.			
Primäre Leitbahn	Die Kleingartenvereine Grüner Sachse, Ostecke, Volksgarten, Nordostvorstadt und Buren e.V. gehören zum primären Leitbahnbereich, der dann weiter entlang der Adenauer Allee und Gleisanlagen unter der Hermann-Liebmann-Brücke gen Brandenburger Brücke verläuft. Die primäre Leitbahn macht über 41 % der Flächen aus.			
Kaltlufteinwirkbereich	Kaltlufteinwirkbereiche sind südlich der Permoserstraße und westlich der Gleise nach Eilenburg sowie entlang der Torgauer Straße und südlich der Waldbaurstraße zu finden.			

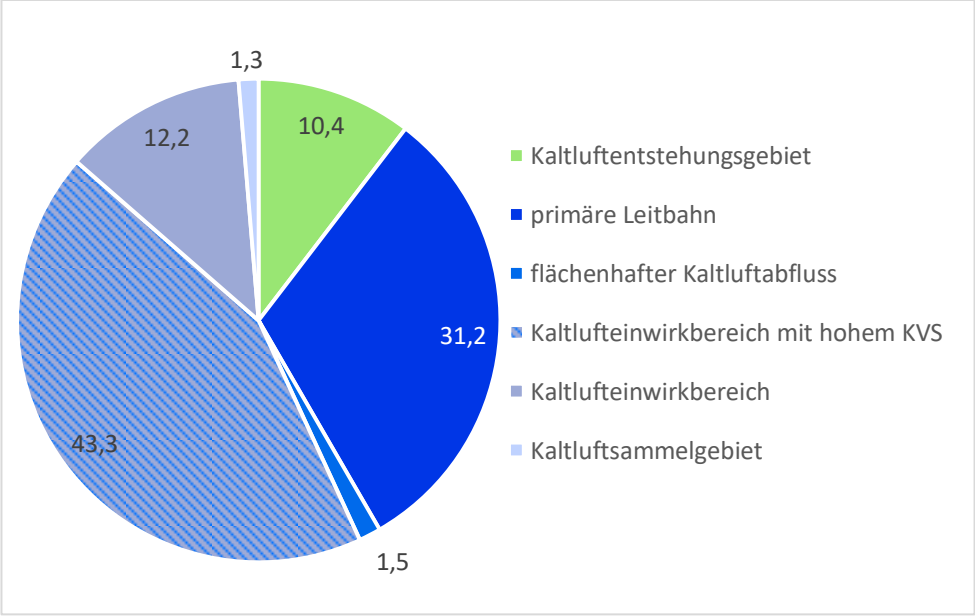
Hindernisse	Als Hindernis, das quer zur Strömungsrichtung der Kaltluft liegt, ist der Eisenbahndamm mit den Gleisen nach Eilenburg zu identifizieren. Allerdings wird dieser, wenn die Kaltluftschicht mächtig genug ist, von der Kaltluft überströmt.
Ventilationsbahnen	Es verläuft eine Ventilationsbahn entlang der Torgauer Straße durch den Kaltluftprozessraum. Diese Ventilationsbahn wird jedoch nicht für die Strömung der Kaltluft genutzt, diese überfließt die Torgauer Straße.

3.7 Kaltluftprozessraum VI - Leitbahn Stötteritz, Volkmarsdorf [4]

Gesamtfläche:	616,2 ha
Lage:	Im Südosten von Leipzig



Flächenanteile im Prozessraum:

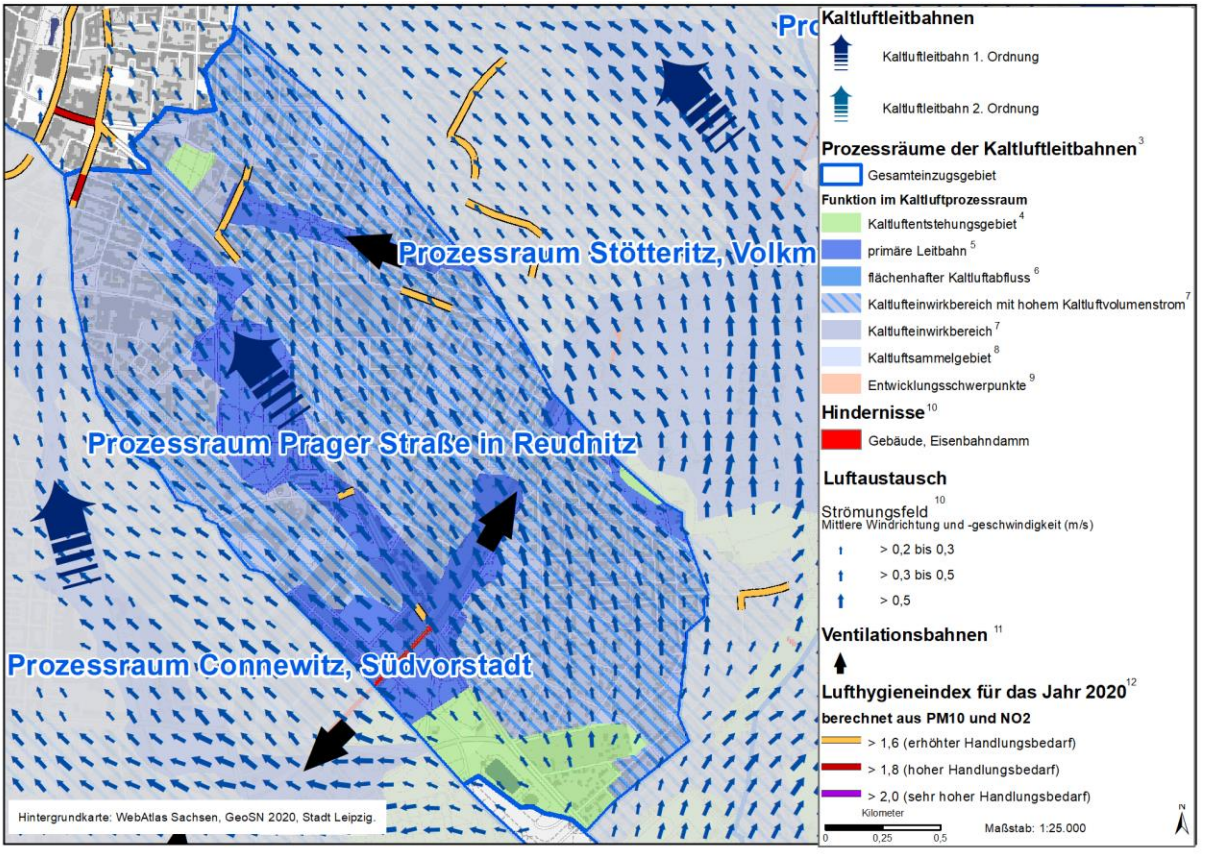


Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	20,1	132,8	66,4
	Kaltluftentstehungsgebiet	33,4	111,7	62,5
	Primäre Leitbahn	44,0	132,8	88,5
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	58,1	104,6	74,0
	Kaltlufteinwirkbereich	44,1	20,1	69,9
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	67,7	30,5	107,5
	Kaltluftsammelgebiet	44,6	73,7	61,5
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,8	19,6	6,6
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,9	19,6	8,7
	Primäre Leitbahn	1,8	19,3	8,1
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	2,6	14,0	3,6
	Kaltlufteinwirkbereich	2,7	14,4	4,0
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	2,6	18,9	4,7
	Kaltluftsammelgebiet	1,8	15,1	10,2
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	0,9	0,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,7	0,3
	Primäre Leitbahn	0	0,9	0,5
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	0	0,6	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,5	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	0,7	0,3
	Kaltluftsammelgebiet	0	0,4	0,2

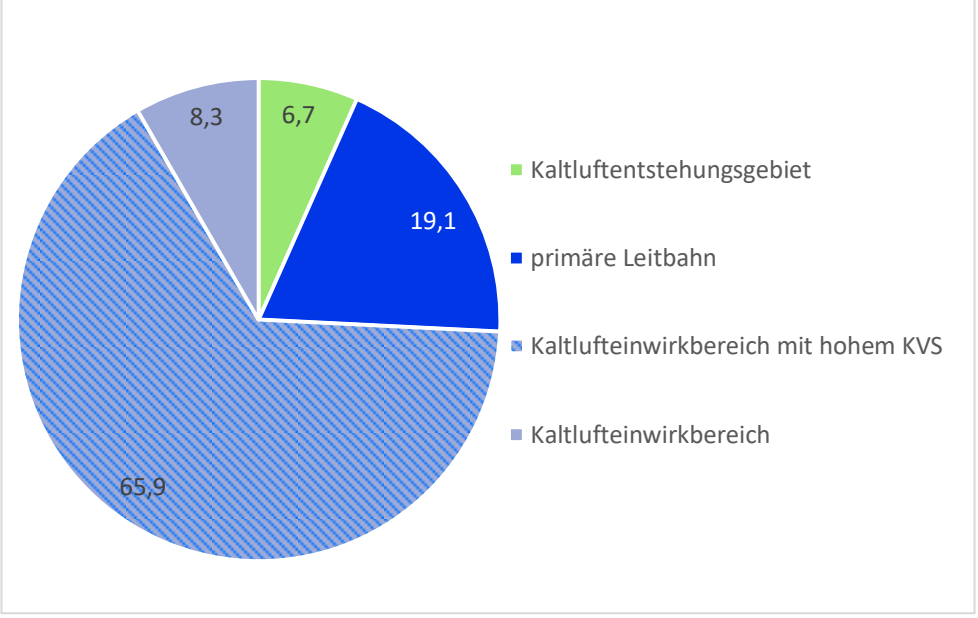
Beschreibungen zum Prozessbereich	
Kaltluftentstehungsgebiet	Ein Zehntel der Flächen gehören zum Kaltluftentstehungsgebiet. Dies sind vor allem Flächen im südlichen Zipfel des Kaltluftprozessraumes und umfassen die Kleingartenanlagen Denkmalblick und Marienhöhe. Die Brachflächen zwischen Holzhäuser und Kolmstraße, der Schrebergarten Osthöhe und Stötteritzer Wäldchen stellen ebenfalls ein Kaltluftentstehungsgebiet dar.
Primäre Leitbahn	Die primäre Leitbahn beginnt unterhalb des Stötteritzer Wäldchens und zieht sich über den Kleingartenverein Am Walde, Neues Leben, Eigene Scholle, den Ostfriedhof über die Zweinaundorfer Straße und dem Anger-Crottendorf Schrebergarten weiter über die Kleingartenanlagen Grüne Aue, Rosenaue, Tunnelwiese bis zum KGV Leipzig-Sellerhausen. Im primären Leitbahnbereich liegen über 31 % der Flächen.
Flächenhafter Kaltluftabfluss	Zum flächenhaften Kaltluftabfluss zählt nur ein geringer Teil der Flächen: 1,5 %. Diese Flächen umfassen Teile des Volkshaines Stünz.
Kaltlufteinwirkbereich	An das südliche Kaltluftentstehungsgebiet schließen sich nach Norden Siedlungsbereiche, die von einem sehr hohen Kaltluftvolumenstrom durchflossen werden. Auch westlich und nördlich der primären Leitbahn befinden sich Siedlungsbereiche, die einen sehr hohen KVS aufweisen. Dieser Kaltluftvolumenstrom schwächt sich dann immer weiter ab, die Kaltluft reicht bis nördlich der Eisenbahnstraße. Insgesamt profitiert ein sehr großer Anteil der Siedlungsflächen im Prozessraum von Kaltluft, daher sind die bebauten Bereiche auch als Kaltlufteinwirkbereich gekennzeichnet.
Kaltluftsammelgebiet	Über 1 % der Flächen zählen zu einem Kaltluftsammelgebiet. Es sind Gewerbeflächen am östlichen Rand des Kaltluftprozessraumes und gelegen an der Sommerfelder Straße.
Hindernisse	Ein Hindernis ist das Gebäude an der Holzhäuser Straße, das im Kaltluftentstehungsgebiet liegt. Westlich des Ostfriedhofs, im Gewerbegebiet Am Güterring, befindet sich ein weiteres langes Gebäude, das quer zur Fließrichtung steht und den KVS abschwächt. Der Eisenbahndamm bis zur Theodor-Neubauer-Straße stellt ebenfalls ein Hindernis quer zur Fließrichtung der Kaltluft dar.
Ventilationsbahn	Es gibt keine Ventilationsbahn im Prozessraum.

3.8 Kaltluftprozessraum VII - Leitbahn Prager Straße in Reudnitz [4]

Gesamtfläche:	500,9 ha
Lage:	Im Südosten von Leipzig



Flächenanteile im Prozessraum:

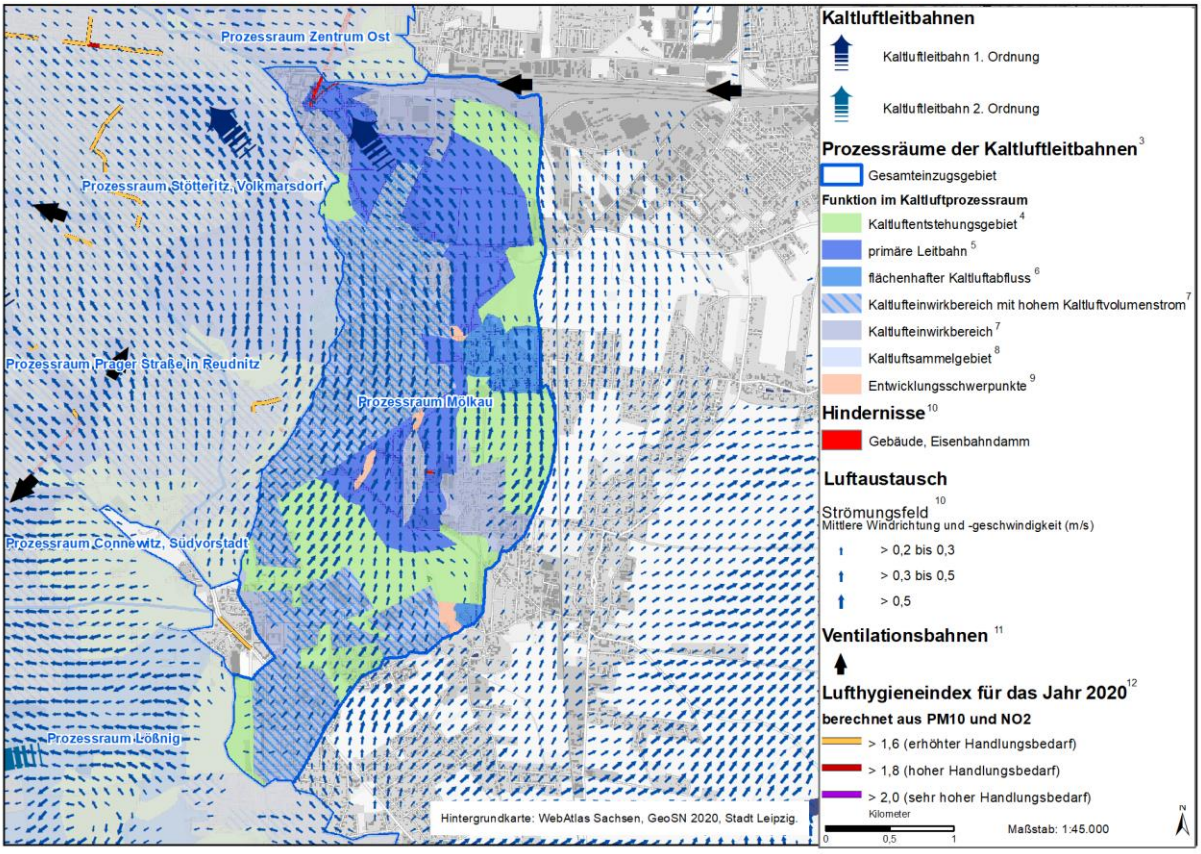


Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	125,1	55,6
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	64,7	40,9
	Primäre Leitbahn	28,5	114,3	71,8
	Kaltlufteinwirkbereich	5,7	63,4	38,8
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	24,4	125,1	70,8
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,8	19,2	6,0
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,8	15,5	8,3
	Primäre Leitbahn	2,4	19,2	7,1
	Kaltlufteinwirkbereich	2,7	14,7	4,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	2,4	14,1	0,3
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	1,0	0,3
	Primäre Leitbahn	0	1,0	0,5
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,5	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,6	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	1,0	0,3
Beschreibungen zum Prozessbereich				
Kaltluftentstehungsgebiet	Zum Kaltluftentstehungsgebiet im Prozessraum Reudnitz gehören 6,7 % der Flächen, was ein recht kleines Gebiet für den Prozessraum darstellt. Sie sind im Süden des Prozessraumes am Völkerschlachtdenkmal zu finden. Weitere kleinere Flächen, die zum Kaltluftentstehungsgebiet zählen, sind das Stötteritzer Wäldchen und der Alte Johannisfriedhof, die im Kaltluftprozessraum Kaltluft produzieren, was am Durchschnittswert in Höhe von 8,3 m³/m²h abzulesen ist. Teile des primären Leitbahnbereiches produzieren ebenfalls Kaltluft, da sie stark durchgrünt sind, bspw. die Zeilenbauten südlich der Holzhäuser Straße. Der Übergang zwischen Kaltluftentstehungsgebiet und primärer Leitbahn ist fließend und kann nicht flächenscharf voneinander			

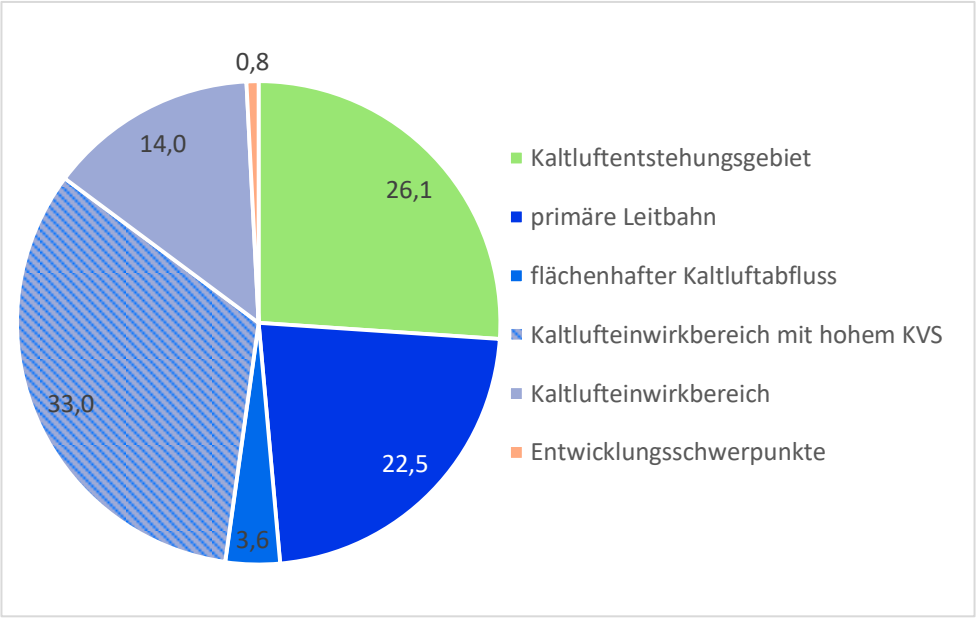
	in diesem Kaltluftprozessraum getrennt werden. Da der Prozessraum an einem flachen Hang liegt, beginnt die Kaltluft zu fließen.
Primäre Leitbahn	19,1 % der Flächen gehören zum primären Leitbahnbereich. Die größte Fläche schließt unmittelbar an das Kaltluftentstehungsgebiet im Süden beim Völkerschlachtdenkmal an (produziert teilweise ebenfalls Kaltluft) und zieht sich dann über die stark durchgrünten Bereiche über die Messebrücke und Straße des 18. Oktobers. Eine weitere primäre Leitbahn folgt dem Lauf der Prager Straße und wird dann über die Kleingartenanlage Siegismund und den Friedenspark bis zum Schrebergarten Johannistal bis zum meteorologischen Institut der Uni Leipzig weitergeführt. Ein weiteres sehr autarkes System befindet sich entlang des Lene-Voigt Parks. Hier wechseln sich Kaltluftentstehung und Weiterfluss der Kaltluft ab. Diese primäre Leitbahn ist auch gleichzeitig als Ventilationsbahn gekennzeichnet. Ebenso wie die nach Nordost verlaufenden Gleise. Diese sind auch bis zur Papiermühlstraße und dem S-Bahnhof Stötteritz als primäre Leitbahn herausgearbeitet worden.
Kaltlufteinwirkbereich	Über 74 % der Siedlungsflächen werden von Kaltluft durchströmt. Sogar fast 66 % mit einem sehr hohen Kaltluftvolumenstrom. Das liegt an der Orographie im Gebiet: Es ist ein eindeutiger Hangabfluss zu sehen.
Hindernisse	Als Hindernis ist der Eisenbahndamm im Südosten des Prozessraumes zu benennen. Da das gesamte Gebiet jedoch aufgrund der Hanglage geneigt ist, wird der Damm ab einer gewissen Kaltluftmächtigkeit überflossen.
Ventilationsbahnen	Die Ventilationsbahnen im Lene-Voigt Park und entlang der Gleisanlagen zum S-Bahnhof Stötteritz sind als primäre Leitbahnbereiche herausgearbeitet worden. Die Strömungssysteme, die sich bei einer autochthonen Sommernacht einstellen, haben jedoch eine andere Richtung (an den Windpfeilen erkennbar).

3.9 Kaltluftprozessraum VIII - Leitbahn Mölkau [4]

Gesamtfläche:	886,0 ha
Lage:	Im Südosten von Leipzig



Flächenanteile im Kaltluftprozessraum:

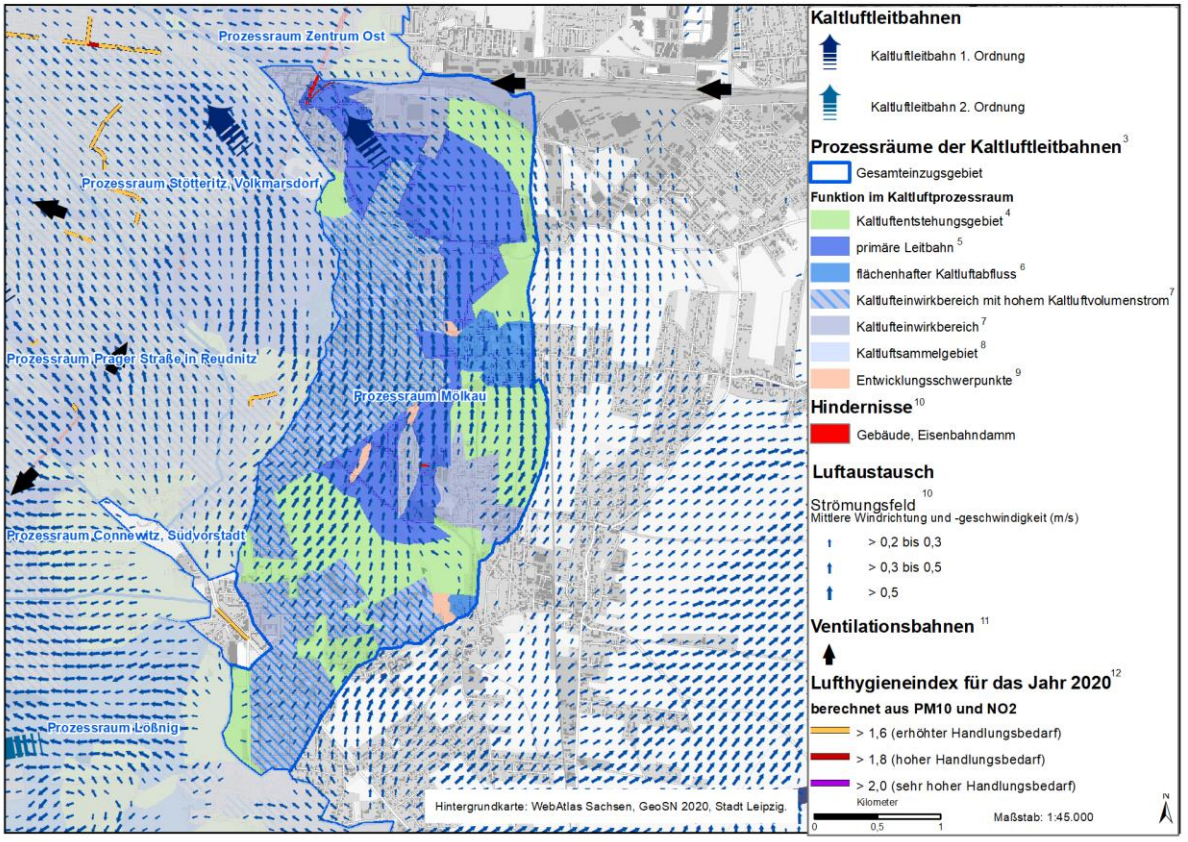


Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	3,9	108,4	53,2
	Kaltluftentstehungsgebiet	14,8	83,6	51,5
	Primäre Leitbahn	22,1	96,7	60,7
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	20,3	84,0	51,9
	Kaltlufteinwirkbereich	3,9	96,3	43,8
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	13,7	108,4	70,2
	Entwicklungsbereich	8,2	85,6	41,1
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,8	20,0	7,9
	Kaltluftentstehungsgebiet	2,6	15,9	11,7
	Primäre Leitbahn	2,5	19,5	11,0
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	1,8	14,2	5,2
	Kaltlufteinwirkbereich	2,4	19,6	5,1
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	1,9	18,0	5,0
	Entwicklungsbereich	2,8	20,0	9,3
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	0,8	0,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,7	0,4
	Primäre Leitbahn	0	0,8	0,4
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	0	0,7	0,3
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,8	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	0,8	0,4
	Entwicklungsbereich	0	0,6	0,2

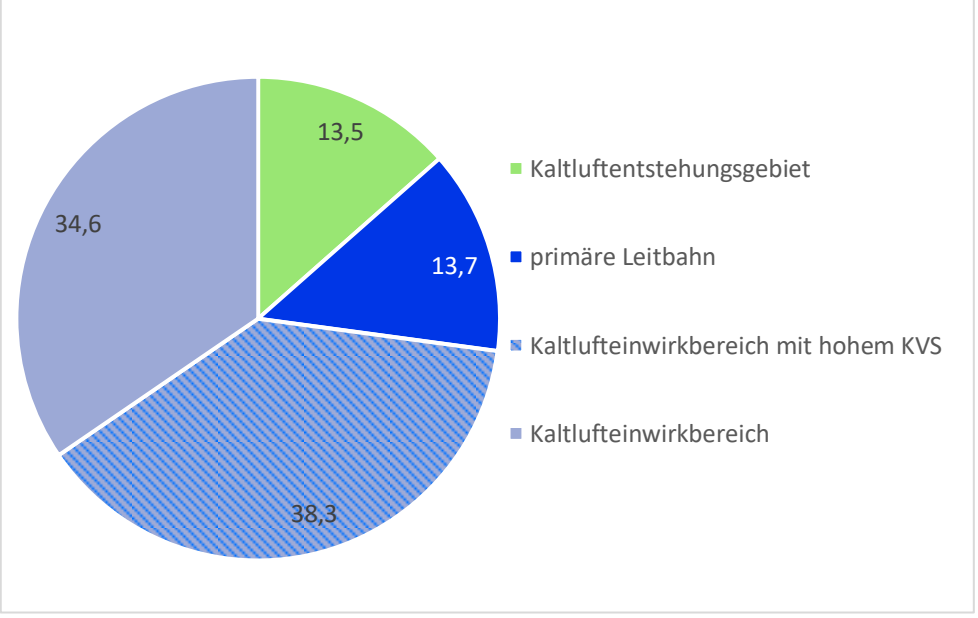
Beschreibungen zum Prozessbereich	
Kaltluftentstehungsgebiet	Die Kaltluftentstehungsgebiete sind über den gesamten Kaltluftprozessraum verteilt und machen über 26 % der Flächen aus. Ein Kaltluftentstehungsgebiet liegt an der Chemnitzer Straße, ein weiteres an der Franzosenallee. Die Freiflächen zwischen der Stötteritzer Landstraße, Strümpellstraße und Kolmstraße gehören zu einem größeren Kaltluftentstehungsgebiet. Die Freiflächen entlang der Mölkauer Straße bis zu den Gleisanlagen im Osten stellen ebenso ein Kaltluftentstehungsgebiet dar. Genauso wie das Mölkauer Wäldchen am Gutspark Mölkau und die Grün- und Freiflächen Am Bahndamm und der Geithainer Straße. Auch der Volkshain Stünz ist Teil eines Kaltluftentstehungsgebietes.
Primäre Leitbahn	Zum primären Leitbahnbereich zählen 22,5 % der Flächen im Kaltluftprozessraum. Es liegen wieder Kleingartenvereine wie Friedenseck, Am Körnerweg Holzhausen, Kinder-Garten, Knauer Garten, Leipzig-Stünz, Stünzer Hain, Sommerwind und Stünzer Höhe darin. Im Bereich der Zweinaundorfer Straße am Kreuzfriedhof Mölkau kommt es zu einer Unterbrechung der primären Leitbahn, der KVS nimmt an dieser Stelle ab. Die Ackerflächen östlich und nordöstlich vom Mölkauer Zentrum zählen ebenso zum primären Leitbahnbereich und sind sehr rauigkeitsarm, so dass die Kaltluft gut fließen kann.
Kaltlufteinwirkbereich	Viele Siedlungsflächen werden im Kaltluftprozessraum von Kaltluft durchströmt und sind daher mindestens in der Kategorie Kaltlufteinwirkbereich zu finden, viele auch mit einem hohen KVS. Teilweise grenzen die Bereiche direkt an die Kaltluftentstehungsgebiete und sind sehr porös aufgrund der lockeren Bebauung und geringen Versiegelung.
Entwicklungsbereich	Entwicklungsbereiche finden sich an der Zweinaundorfer Straße, im Südosten an der Östlichen Rietzschke, Am Sonnenwinkelgraben und in Verlängerung des Richard-Springer Weges.
Hindernisse	Als Hindernis ist der Bahndamm im Norden des Kaltluftprozessraumes auszumachen.
Ventilationsbahnen	Im Nordosten ist eine Ventilationsbahn entlang der Bahnschiene ausgewiesen. Sie verläuft an der Grenze des Kaltluftprozessraumes und hat keine Funktion auf die Strömungssituation bei einem autochthonen Sommertag. In anderen Situationen kann sie zur Be- und Entlüftung der angrenzenden Quartiere dienen.

3.10 Kaltluftprozessraum IX - Leitbahn Connewitz, Südvorstadt [4]

Gesamtfläche:	538,7 ha
Lage:	Im Süden von Leipzig



Flächenanteile im Prozessraum:

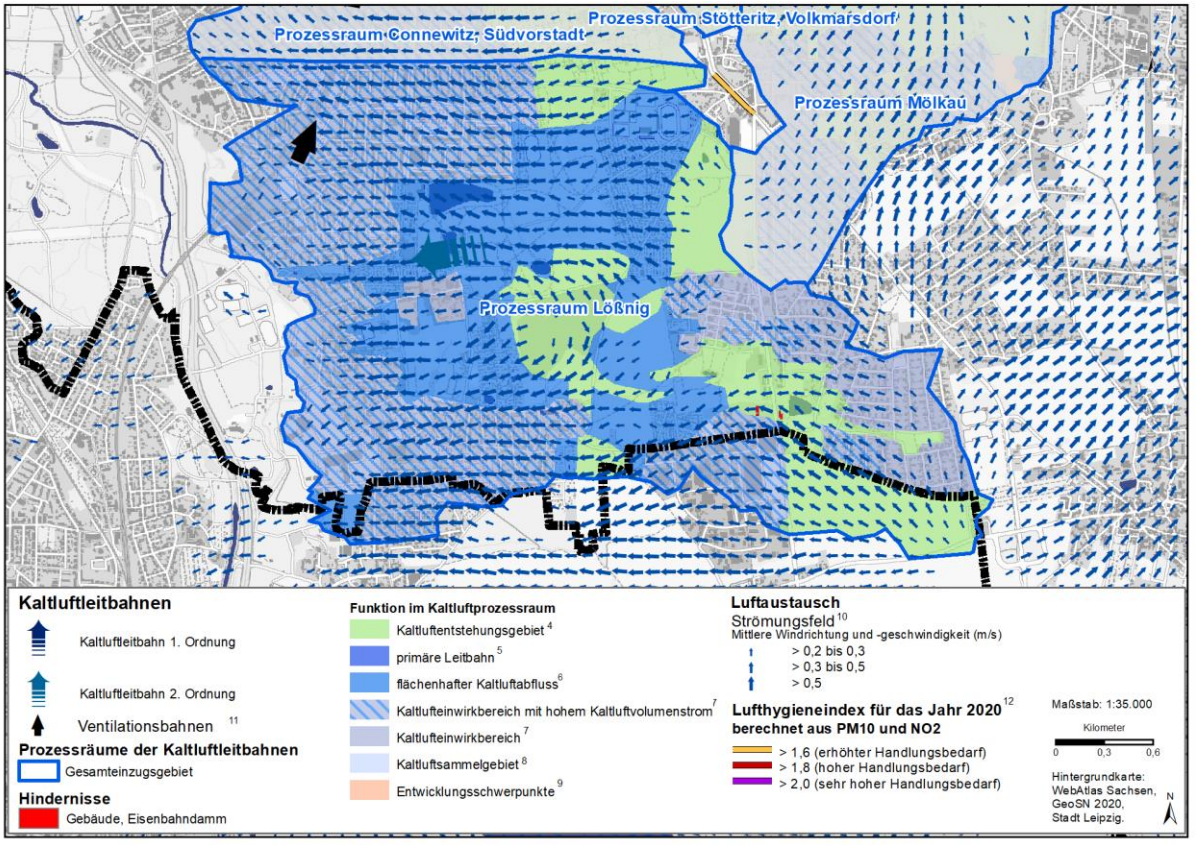


Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	7,5	133,9	55,2
	Kaltluftentstehungsgebiet	16,6	100,4	53,6
	Primäre Leitbahn	15,3	118,2	58,7
	Kaltlufteinwirkbereich	7,5	64,2	36,4
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	30,2	133,9	72,2
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,8	19,9	6,4
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,8	14,4	8,7
	Primäre Leitbahn	2,4	16,2	7,5
	Kaltlufteinwirkbereich	2,1	14,9	4,3
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	2,3	19,9	5,1
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittelwert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	1,0	0,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,9	14,4
	Primäre Leitbahn	0	0,9	0,4
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,5	14,9
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	1,0	0,4
Beschreibungen zum Prozessbereich				
Kaltluftentstehungsgebiet	Das zentrale Kaltluftentstehungsgebiet des Prozessraumes liegt im Südosten und umfasst den Südfriedhof und Teile des Wilhelm-Külz Parkes. Die mittlere Kaltluftproduktionsrate ist von allen Funktionsräumen die höchste mit 8,7 m³/m²h, was typisch für ein Kaltluftentstehungsgebiet ist.			
Primäre Leitbahn	Die primäre Leitbahn schließt unmittelbar an das Kaltluftentstehungsgebiet an und verläuft über/unter der Richard-Lehmann-Straße, entlang der Grün- und Freiflächen der Gleisanlagen über den Kleingartenverein Tiefland zum Bayerischen Bahnhof und darüber hinaus bis zur Windmühlen-, Ecke Grü-			

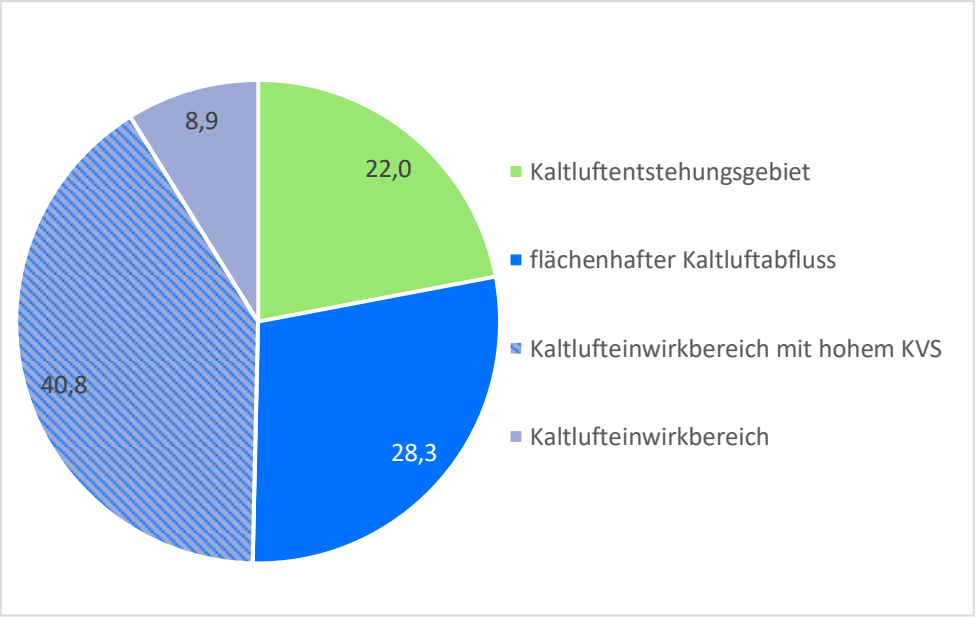
	newaldstraße. Über 15 % der Flächen sind dem primären Leitbahnbereich zuzuordnen.
Kaltlufteinwirkbereich	Sehr viele der Flächen im Prozessraum liegen im Kaltlufteinwirkbereich. Über 38 % sogar im Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS. Die Durchlüftung ist also sehr gut, v.a. im unmittelbaren Anschluss an das Kaltluftentstehungsgebiet.
Hindernisse	Als Hindernis ist die Bahnlinie im Osten markiert. Bei ausreichend mächtiger Kaltluft kann diese jedoch überströmt werden.
Ventilationsbahnen	Eine Ventilationsbahn stellen die Eisenbahngleise im Osten des Prozessraumes dar, die teilweise auch als primäre Leitbahn markiert sind. Die Strömungsrichtung der Kaltluft weicht jedoch wieder von der Richtung der Ventilationsbahn ab. Eine weitere Ventilationsbahn befindet sich entlang der Gleisanlagen im Süden des Prozessraumes Connewitz/Südvorstadt. Dieser Bereich ist in der detaillierten Kaltluftleitbahnanalyse als Kaltlufteinwirkbereich herausgearbeitet worden. Die Strömungsrichtung der Kaltluft weicht wiederum von der Richtung der Ventilationsbahn ab.

3.11 Sekundäre Leitbahn X – Flächenhafter Kaltluftabfluss Lößnig [4]

Gesamtfläche:	952,2 ha
Lage:	Im Süden von Leipzig



Flächenanteile im Prozessraum:

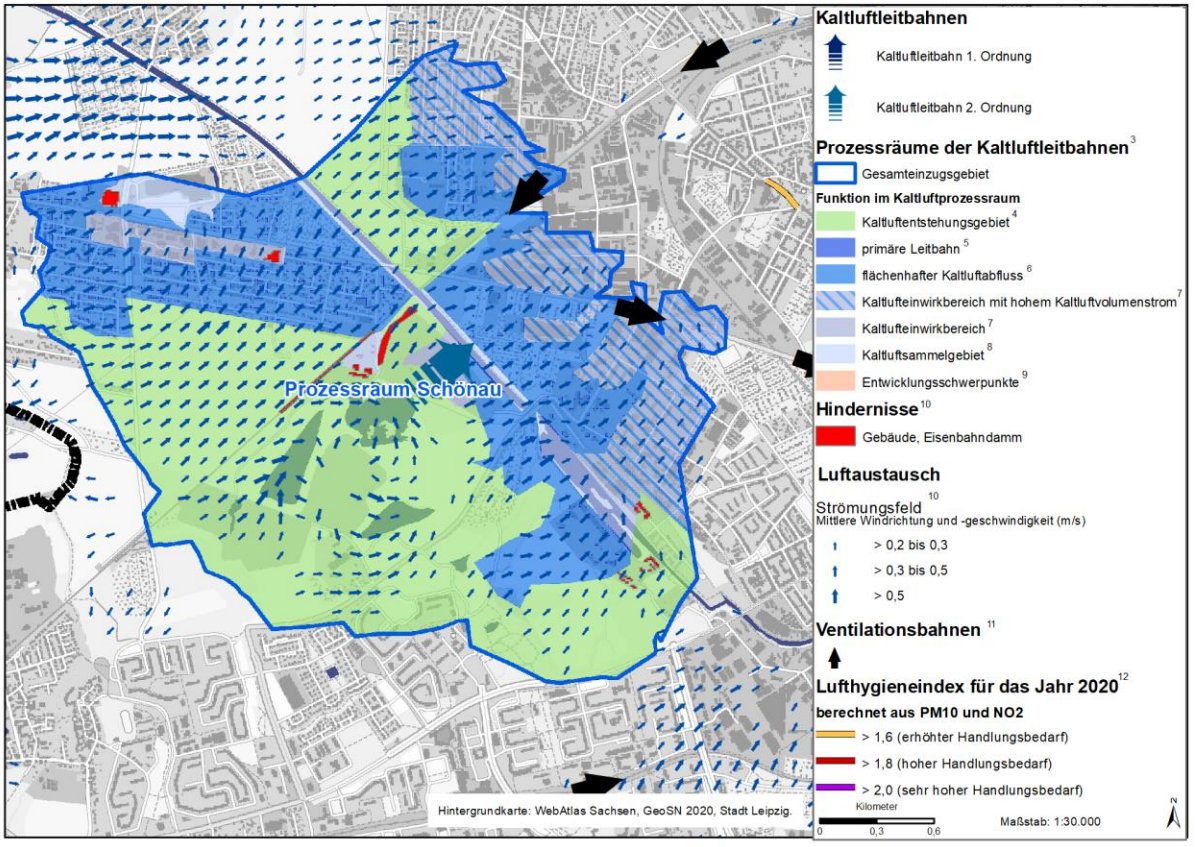


Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittel-wert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	220,6	66,7
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	162,8	51,9
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	13,1	220,6	86,6
	Kaltlufteinwirkbereich	6,6	113,7	39,7
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	7,5	207,7	88,6
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittel-wert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,5	19,2	7,2
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,8	19,2	10,8
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	1,5	15,2	9,0
	Kaltlufteinwirkbereich	2,5	17,0	4,1
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	1,7	17,2	4,8
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittel-wert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	1,4	0,4
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	1,0	0,4
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	0	1,4	0,5
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,8	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	1,2	0,4
Beschreibungen zum Prozessbereich				
Kaltluftentstehungsgebiet	Die sekundäre Leitbahn in Lößnig, die eher durch einen flächenhaften Kaltluftabfluss gekennzeichnet ist, besitzt jeweils am oberen Hangbereich mehrere kleinteilige Kaltluftentstehungsgebiete, die über 19% der Flächen ausmachen. Diese Flächen sind bspw. Teile des Südfriedhofes, der Wald an der Chemnitzer Straße, die Grün- und Freiflächen um die Mülldeponie Leinestraße und entlang des Leinegrabens und eine Ackerfläche, die außerhalb von Leipzig in Markkleeberg liegt.			

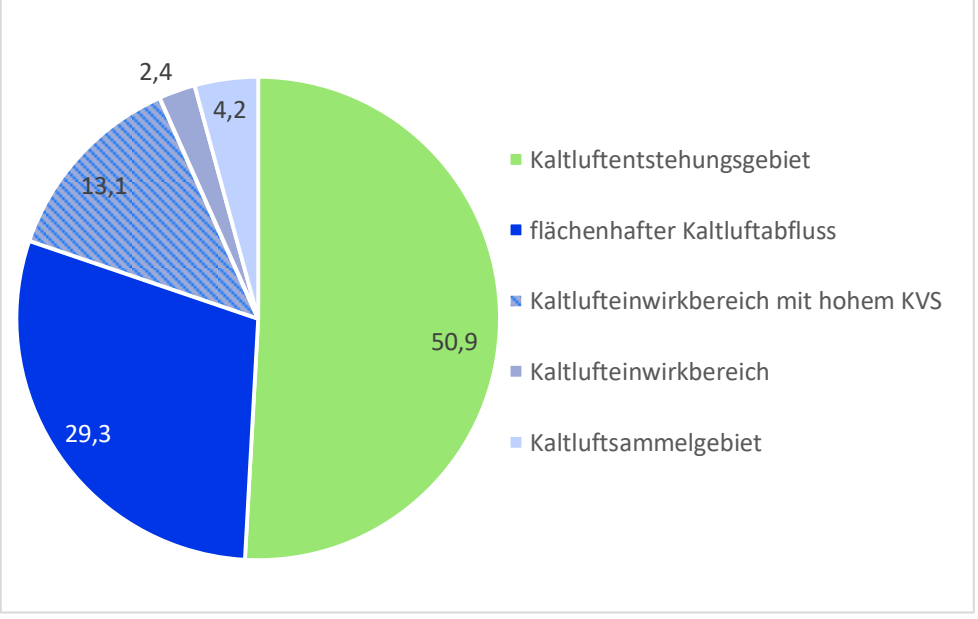
Flächenhafter Kaltluftab-fluss	Der Flächenhafte Katluftabfluss ersetzt für die Leitbahn 2. Ordnung den primären Leitbahnbereich. Hierzu zählen ca. 32 % der Flächen. Diese Flächen sind wiederum Kleingartenvereine wie Am Rundling, Gartenfreunde Lößnig, Friedericken-schlacht, An der großen Eiche etc., aber auch Teile des Erholungsparkes Lößnig Dölitz.
Kaltlufteinwirkbereich	Der von den Kaltluftentstehungsgebieten westlich gelegene Siedlungsbereich weist einen Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS auf, was nicht zuletzt der Hanglage zu verdanken ist.
Hindernisse	Als Hindernisse sind zwei Gebäude im Kaltluftentstehungsgebiet an der Stadtgrenze entlang der Chemnitzer Straße markiert, die jedoch bei ausreichend mächtiger Kaltluft überströmt werden.
Ventilationsbahn	Im nordwestlichen Bereich verläuft eine Ventilationsbahn entlang der Gleise. Diese wird bei einer Hochdruckwetterlage in der Nacht nicht von der Kaltluft genutzt. Sie überströmt die Gleisanlagen.

3.12 Sekundäre Leitbahn XI – Flächenhafter Kaltluftabfluss Schönau [4]

Gesamtfläche:	753,8 ha
Lage:	Im Westen von Leipzig



Flächenanteile im Kaltluftprozessraum:



Kaltluftvolumenstrom [m³/s] je Rasterzellenquerschnitt von 10 m	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittel-wert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	122,7	39,0
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	122,7	37,6
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	1,5	79,6	44,7
	Kaltlufteinwirkbereich	9,9	62,5	32,9
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	12,8	66,0	41,9
	Kaltluftsammelgebiet	4,8	71,2	37,8
Kaltluftproduktionsrate (m³/m²h)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittel-wert
	Gesamtes Prozessgebiet	1,6	20,2	6,8
	Kaltluftentstehungsgebiet	1,6	18,7	11,6
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	1,8	17,5	6,5
	Kaltlufteinwirkbereich	1,9	17,0	6,1
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	2,7	20,2	4,6
	Kaltluftsammelgebiet	1,7	18,0	5,0
Windgeschwindigkeit (m/s)	Teilgebiet	Minimum	Maximum	Mittel-wert
	Gesamtes Prozessgebiet	0	0,9	0,3
	Kaltluftentstehungsgebiet	0	0,9	0,3
	Flächenhafter Kaltluftabfluss	0	0,7	0,3
	Kaltlufteinwirkbereich	0	0,5	0,2
	Kaltlufteinwirkbereich mit hohem KVS	0	0,5	0,2
	Kaltluftsammelgebiet	0	0,7	0,2

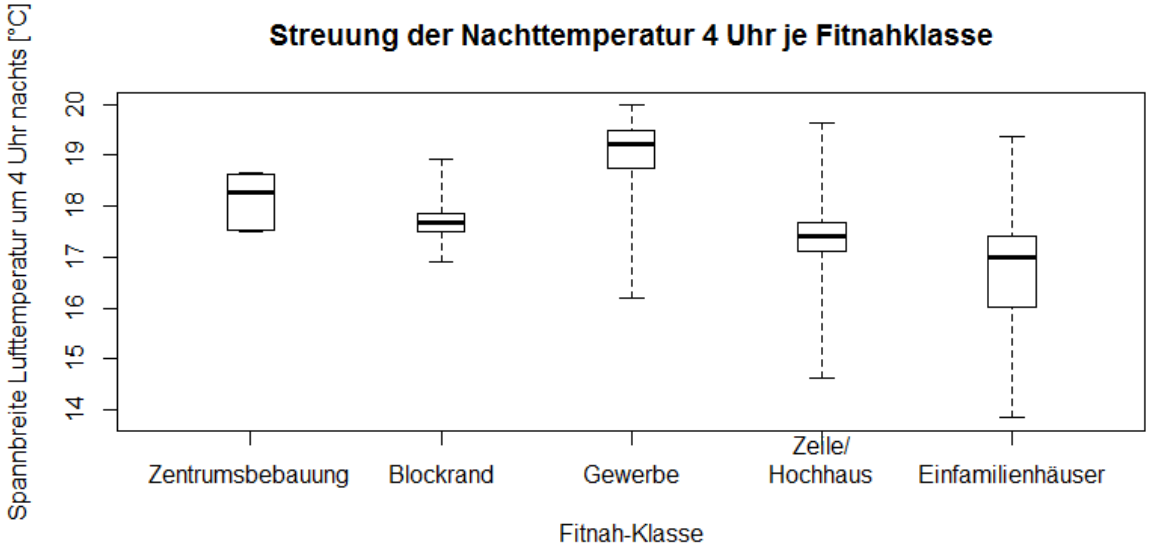
Beschreibungen zum Prozessbereich	
Kaltluftentstehungsgebiet	In der sekundären Kaltluftleitbahn Schönau sind über die Hälfte der Flächen im Kaltluftentstehungsgebiet eingeordnet. Dazu zählen viele Ackerflächen, die Kiesgrube und der Schönauer Park.
Flächenhafter Kaltluftabfluss	Der Flächenhafte Kaltluftabfluss ist direkt den Kaltluftentstehungsgebieten angegliedert und macht 29,3 % der Flächen aus. Als Flächen in dieser Kategorie wurden auch die locker bebauten und stark durchgrünten Siedlungsbereiche im Norden des Prozessraumes, aber auch Kleingartenanlagen deklariert.
Kaltlufteinwirkbereich	Der Kaltlufteinwirkbereich verzeichnet fast ausschließlich einen sehr hohen Kaltluftvolumenstrom. Da in dem Prozessraum vergleichsweise wenig bebaute Flächen vorhanden sind und ein Großteil der locker bebauten Bereiche noch zum „flächenhaften Kaltluftabfluss“ zählt, wird v.a. der Siedlungsbereich im Osten und Nordosten durchströmt und fällt in diese Kategorie.
Kaltluftsammelgebiet	Der Saale-Elster Kanal und der Lindenauer Hafen wirken „bremsend“ (im DGM Senke), aber die Kaltluft strömt aufgrund des großen Gefälles weiter und darüber hinweg.
Hindernisse	Als Hindernisse sind einzelne Gebäude und eine Baumgruppe im Bereich der Kiesgrube identifiziert worden. Ein Stück des Eisenbahndammes kann die Kaltluft behindern, bei ausreichender Mächtigkeit der Kaltluft kann dieser jedoch überflossen werden.
Ventilationsbahnen	Es sind zwei Ventilationsbahnen im Gebiet eingezeichnet. Eine Ventilationsbahn läuft entlang der Bahngleise, die andere ist auf der Merseburger Straße eingezeichnet. Dabei können die Ventilationsbahnen in zwei Richtungen wirksam sein, je nach Anströmungsrichtung bei entsprechender Wetterlage. Die Ventilationsbahn entlang der Gleise dient auch der Kaltluft als Abflussbahn. Die Merseburger Straße wird überströmt und besitzt für eine sommerliche Hochdruckwetterlage keine Funktion.

4 Klimatische Sanierungsbereiche

4.1 Methodik der Ausweisung

Die Siedlungsflächen, die in Leipzig eine hohe thermische Belastung aufweisen, sind auch diejenigen, für die hitzereduzierende Maßnahmen prioritär angewandt werden sollen.

Die Definition der Flächen, die hierunter fallen, betreffen Siedlungsbereiche und auch Gewerbe- und andere versiegelte Flächen, die für den Siedlungsraum in der Klasse 4 *sehr ungünstige thermische Situation* und Klasse 3 *ungünstige thermische Situation* einsortiert wurden. Zugleich werden aber auch Siedlungsflächen betrachtet, die momentan eine *mittlere thermische Situation* (Klasse 2) aufweisen und von denen für die Zukunft unter Zunahme der Temperatur infolge des Klimawandels oder durch eine bauliche Verdichtung zu erwarten ist, dass sie recht schnell in die Klasse 3 *ungünstige thermische Situation* fallen werden. Hierzu wurde eine statistische Auswertung der Flächen, die sich in der mittleren thermischen Belastungsklasse befinden, vorgenommen. Dazu wurden, wie in Abbildung 14 und Abbildung 15 zu sehen ist, die jeweiligen Spannbreiten der nächtlichen Temperatur und die PET um 14 Uhr je Strukturtyp in einem Box-Whisker Plot aufgetragen (Erklärung der Box-Whisker-Plots im Anhang 8.1.2.1, Abbildung 53).



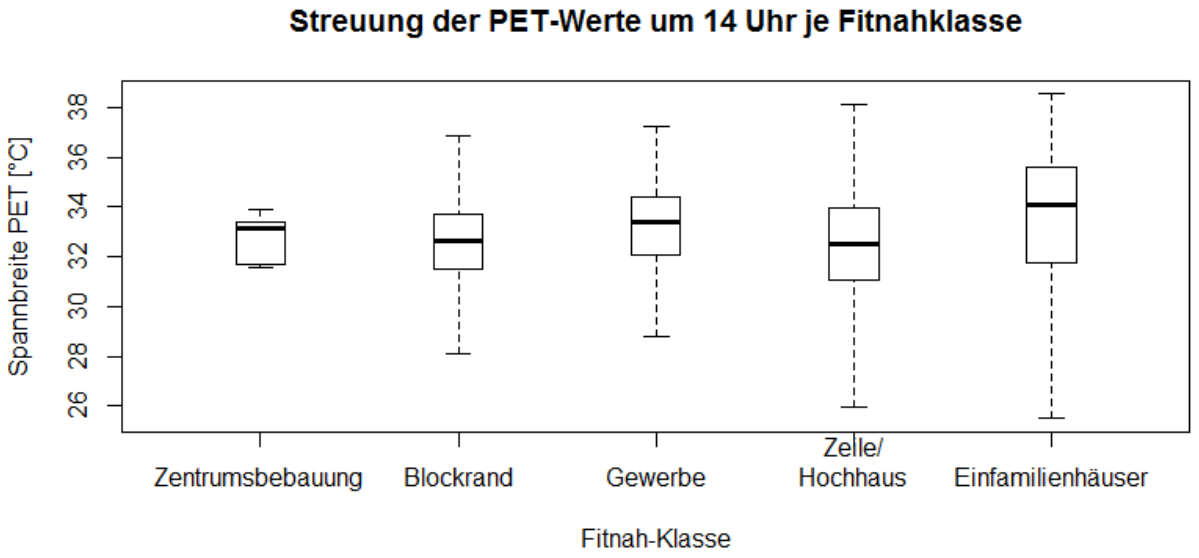
	Zentrumsbebauung	Blockrand	Gewerbe	Zeile/Hochhaus	Einfamilienhaus
Min	17,5	16,89	16,2	14,62	13,84
p25*	17,53	17,49	18,76	17,11	16,01
p50*	18,27	17,67	19,2	17,4	17
p75*	18,64	17,85	19,49	17,68	17,43
p90*	18,64	17,95	19,7	17,91	17,77
Max	18,65	18,94	19,98	19,63	19,36

* p25 - 25% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes;
* p50 – 50% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes,
* p75 – 75% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes,
* p90 – 90% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes

Abbildung 14: Nachttemperatur um 4 Uhr je Fitnah-Strukturtyp. Quelle: Eigene Darstellung

Je nach Strukturtyp variiert die nächtliche Lufttemperatur (siehe Abbildung 14). So weist bspw. der Strukturtyp Gewerbe den höchsten Maximalwert mit knapp 20°C in der Nacht auf und würde damit in die Definition einer Tropennacht fallen. Die Einfamilienhäuser weisen die größte Streuung auf und haben den minimalsten Temperaturwert in der Nacht mit unter 14 °C und 19,4 °C im Maximum. Der Median liegt jedoch unter denen der anderen Strukturtypen.

Bei den Tageswerten der PET (siehe Abbildung 15) ist die Variation zwischen den Strukturtypen nicht ganz so groß wie in der nächtlichen Situation. Das ist zurückzuführen auf die Indexbildung des PET, da in die Berechnung auch die Verschattung durch Bäume und Gebäude einfließt, die Strahlungstemperatur berücksichtigt wird und letztendlich das menschliche Empfinden alle Witterungsbedingungen in gefühlte Werte übersetzt. Dabei ist in Abbildung 15 zu sehen, dass die Einfamilienhäuser den höchsten PET Wert haben, da es dort kleinere Häuser mit geringem Schattenwurf und nur vereinzelt Bäume gibt. Gewerbeflächen und Zentrumsbebauung besitzen ebenfalls einen hohen Medianwert.



	Zentrumsbebauung	Blockrand	Gewerbe	Zeile/Hochhaus	Einfamilienhaus
Min	31,55	28,13	28,82	25,95	25,5
p25*	31,68	31,48	32,09	31,04	31,77
p50*	33,18	32,64	33,43	32,49	34,1
p75*	33,39	33,71	34,38	33,97	35,6
p90*	33,64	34,44	34,77	35,35	36,28
Max	33,89	36,89	37,24	38,1	38,54

* p25 - 25% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes;
* p50 – 50% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes,
* p75 – 75% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes,
* p90 – 90% der Werte befinden sich in diesem Intervall unterhalb des Grenzwertes

Abbildung 15: PET um 14 Uhr je Fitnah-Strukturtyp. Quelle: Eigene Darstellung

Die Klasse 3 *ungünstige* - und Klasse 4 *sehr ungünstige thermische Situation* werden in die klimatischen Sanierungsbereiche überführt. Die Siedlungsflächen, die in der Klasse 2 *mittlere thermische Belastung* über dem 75. Perzentil der Temperatur in der Nacht *oder* der PET (um 14 Uhr) liegen und einen überdurchschnittlichen Versiegelungsgrad (über 50%) aufweisen, werden ebenfalls in die klimatischen Sanierungsbereiche aufgenommen. Es ist davon auszugehen, dass diese Flächen unter den weiter zunehmenden Temperaturen aufgrund des Klimawandels und der steigenden Nachverdichtung und damit der Beseitigung von grüner Infrastruktur, eine deutlich höhere thermische Belastung aufweisen werden, die von den Einwohnenden als unangenehm wahrgenommen wird, weil ein erholsamer Schlaf in der Nacht nicht mehr ausreichend möglich ist und die Hitzebelastung am Tag zunimmt.

4.1.1 Klimasanierungscluster

Die eng beieinander liegenden Klimasanierungsgebiete wurden zusammengefasst und von diesen Flächen nur solche ausgewählt/dargestellt, die eine Größe von 50 ha überschreiten und die bewohnt sind (> 5 Einwohner). So sind 5 Cluster mit einer besonders hohen Anzahl an Blöcken im klimatischen Sanierungsbereich entstanden, in denen Maßnahmen für die Anpassung an den Klimawandel und die Reduzierung von Hitzestress prioritär umgesetzt werden sollten (z. B. Entsiegelung oder Durchgrü-

nung). Weitere Siedlungsentwicklungen (Nachverdichtung) sollten einer genauen Prüfung unterzogen werden und wenn überhaupt, nur mit stadtklimaangepassten Maßnahmen umgesetzt werden. Die Klimasanierungscluster wurden vom Stadtplanungsamt und dem Amt für Umweltschutz erarbeitet und zur Verfügung gestellt und dienen den übergeordneten strategischen Fragen der Stadtentwicklung. Im Folgenden wird weiter der blockscharfe klimatische Sanierungsbereich verwendet, um die erreichte Auflösung der Modellierung nicht zu verallgemeinern.

4.2 Vulnerable Bevölkerungsgruppen und Einrichtungen

Eine Priorisierung der klimatischen Sanierungsbereiche kann anhand mehrerer sozialer Indikatoren erfolgen. Dazu dienen sowohl vulnerable *Einrichtungen*, als auch vulnerable *Bevölkerungsgruppen*, die einem hohen Risiko ausgesetzt sind, Hitzestress zu erfahren. Für die vulnerablen Bevölkerungsgruppen gilt, dass sie nicht selbstständig in der Lage sind, sich an den Hitzestress anzupassen oder ihm zu begegnen. Empfindliche Gruppen sind dabei Kleinkinder sowie ältere und kranke Menschen (siehe Karte nächste Seite), die eine eingeschränkte Funktionalität ihrer Thermoregulation haben. Auch Blöcke mit einer hohen Bevölkerungsdichte (Einwohner je Hektar, siehe Karte nächste Seite, oben rechts) zeigen Handlungsbereiche auf.

Für die Analyse der vulnerablen Bevölkerungsgruppen wurden für Leipzig folgende Kriterien definiert:

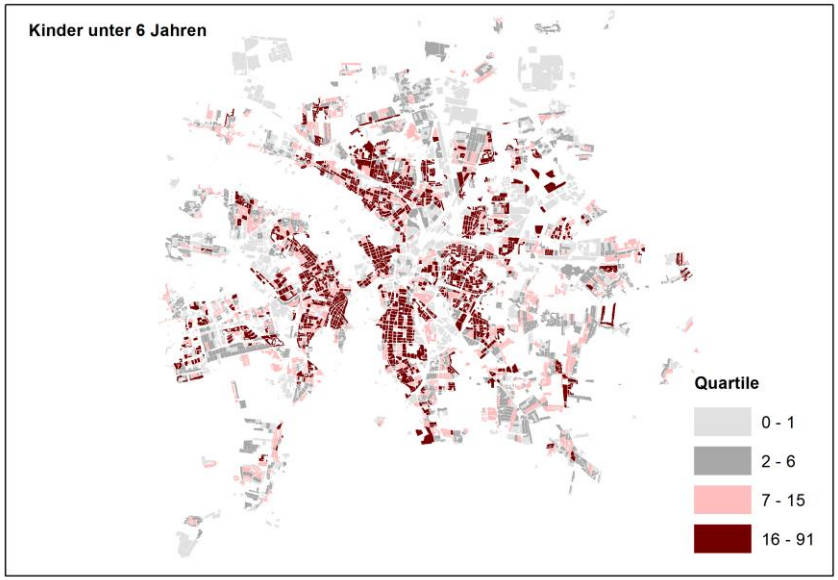
- hoher Anteil der Kinder (0 bis 6) und der Älteren (> 65 Jahre)
- hohe Bevölkerungsdichte (Einwohner je Hektar).

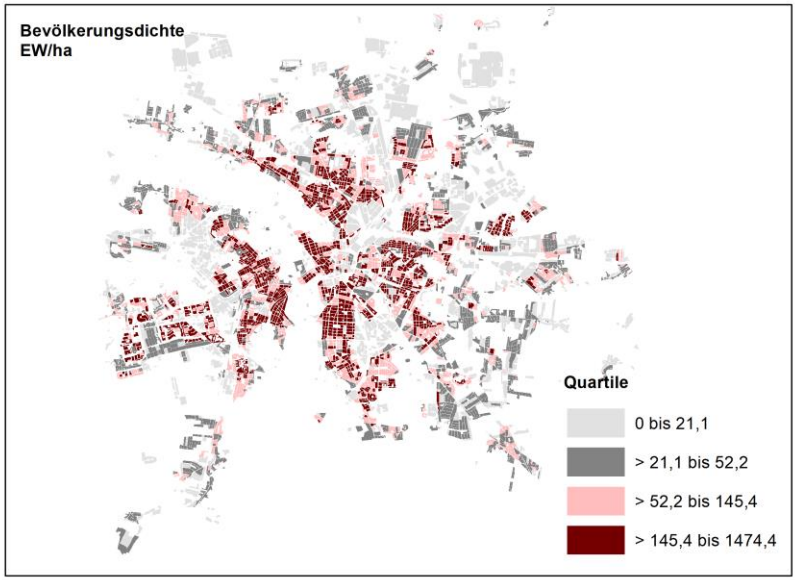
Dabei wird "hoch" mit dem 75. Perzentils des jeweiligen Indikators gleich gesetzt. Das heißt, es werden jeweils die 25% der Blöcke im Stadtgebiet priorisiert, die am kinderreichsten sind, bzw. in denen ein besonders hoher Anteil an Älteren wohnt (siehe auch Karte auf der nächsten Seite). Wie in der Karte auf der nächsten Seite zu sehen ist, unterscheiden sich die räumlichen Muster der Indikatoren deutlich. Ein Zusammenhang der räumlichen Verteilung lässt sich zwischen den Kleinkindern (bis 6 Jahren) und der Bevölkerungsdichte sehen.

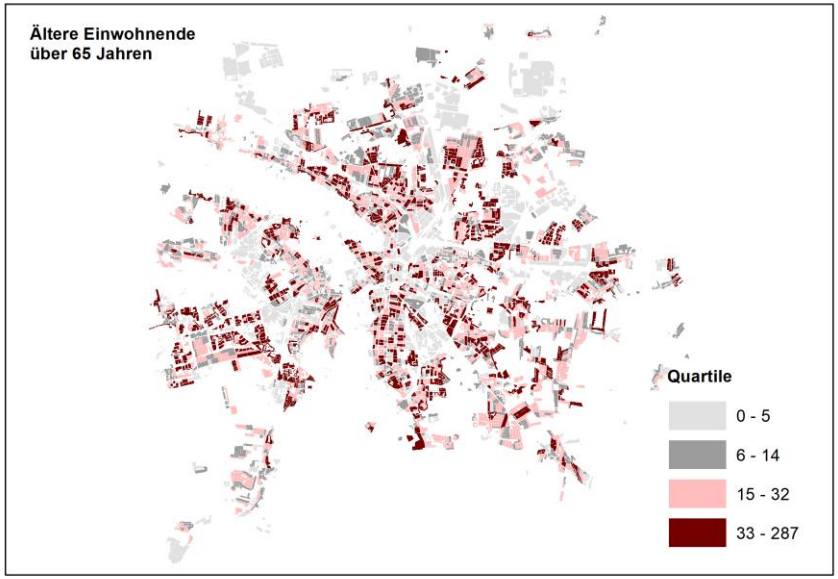
Die Verschneidung des klimatischen Sanierungsbereiches mit vulnerablen Bevölkerungsgruppen und Einrichtungen kann eine Grundlage für eine aktive Politik der Anpassung liefern. Daher werden die vulnerablen Bevölkerungsgruppen und sensiblen Einrichtungen (Krankenhäuser, Altenheime oder Betreutes Wohnen) mit den klimatischen Sanierungsgebieten überlagert. Sie sind in der Karte im Anhang 8.3 zu finden. Ebenso findet sich ein Teil der Vulnerabilitätsanalyse in der Maßnahme: „Förderung stadtgesellschaftlicher sozialer Netzwerke“ (Maßnahme 6.8) wieder. Üblicherweise wird oft der Indikator „Grünflächenversorgung“ als weiterer Baustein einer Vulnerabilitätsanalyse benannt. Diese Information fließt in diesem Projekt bei der Bewertung der Grünflächen hinsichtlich ihres Schutzstatus (siehe Kapitel 5) ein.

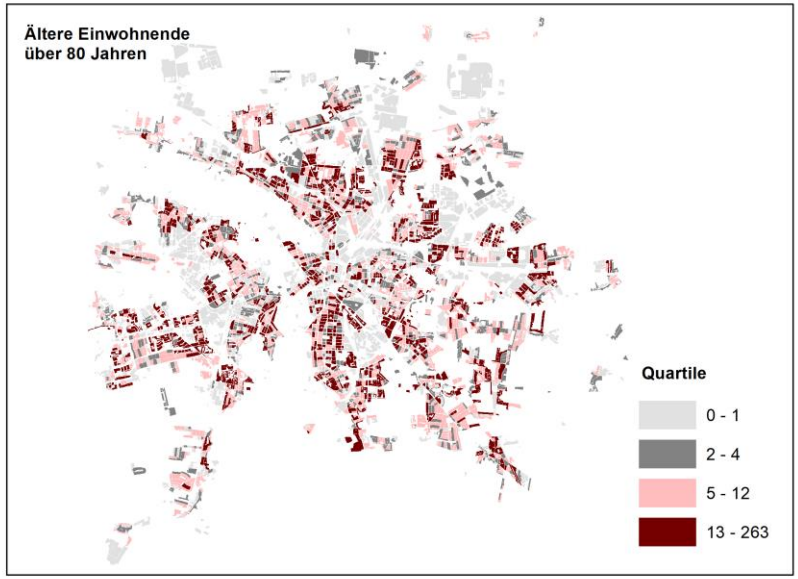
Für die Planungspraxis von Relevanz sind v.a. folgende Erkenntnisse einer Vulnerabilitätsanalyse (Birkmann et al. 2020, S. 75), die gezielt für weitere Maßnahmen zurate gezogen werden können:

- „[…] Identifizierung von Stadtteilen mit der höchsten Priorität für Maßnahmen (nicht nur hohe städtische Klimaverschmutzung, sondern auch besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen).
- Bewertung der Effizienz von Anpassungsmaßnahmen (mit derselben Maßnahme können in besonders dicht besiedelten oder gefährdeten Stadtteilen deutlich mehr Adressaten erreicht werden). […]“
- Auf die jeweilige Problemsituation zugeschnittene Auswahl von Anpassungsmaßnahmen. Das kann z. B. die Verbesserung der sozialen Infrastruktur bedeuten, ebenso die Bereitstellung von öffentlichen Diensten und sozial-integrativer Angebote hauptsächlich für ältere oder wirtschaftlich benachteiligte Menschen.
- Informations- und Diskussionsgrundlage für die ämterübergreifende Koordination sowie für die Nutzung von Synergien und die Vermeidung von Konflikten zwischen Maßnahmen.
- „[…] Grundlage für eine erste Bewertung (Überprüfung) der Auswirkungen geplanter Maßnahmen auf die Umwelt (insbesondere den Schutz des Menschen) im Rahmen der Umweltbewertung. […]“ sind möglich.


Kinder unter 6 Jahren
Quartile
0 - 1
2 - 6
7 - 15
16 - 91


Bevölkerungsdichte
EW/ha
Quartile
0 bis 21,1
> 21,1 bis 52,2
> 52,2 bis 145,4
> 145,4 bis 1474,4


Ältere Einwohnende
über 65 Jahren
Quartile
0 - 5
6 - 14
15 - 32
33 - 287


Ältere Einwohnende
über 80 Jahren
Quartile
0 - 1
2 - 4
5 - 12
13 - 263

4.3 Ergebnisse

Insgesamt sind 2.273 Baublöcke mit einer Flächengröße von ca. 3.090 ha als klimatische Sanierungsbereiche definiert worden (siehe Anhang 8.3).

Der klimatische Sanierungsbereich erstreckt sich über weite Teile von Leipzig, größtenteils entlang der großen Ausfallstraßen wie B2, B6 und B87. Südöstlich des Leipziger Hauptbahnhofes sind viele Blöcke innerhalb Neustadt-Neuschönefeld, Volkmarsdorf, Reudnitz bis zur Südvorstadt und Connewitz zu finden. Fast der gesamte Innenstadtbereich ist dem klimatischen Sanierungsbereich zugeordnet bis auf die Oper und das Neue Rathaus (innerhalb des Rings). Nördlich vom Hauptbahnhof betrifft es v.a. das Gewerbegebiet entlang der Berliner Straße, Berliner Brücke und Maximilianallee. Viele Blöcke sind hier mit einer thermisch sehr ungünstigen Situation bewertet. Im Norden am Rand von Leipzig befinden sich die Gewerbegebiete von BMW, Porsche und die Messe im Sanierungsgebiet in der ungünstigen Klasse. Am Südrand ist das Gewerbegebiet am Zwenkauer See in Knautnaundorf im klimatischen Sanierungsbereich.

Aber auch in Leipzig Möckern rund um den Coppiplatz hin zur General-Olbricht-Kaserne erstreckt sich der klimatische Sanierungsbereich. In Plagwitz zwischen den Gleisen und der Zschocherschen Straße sind viele Blöcke im Gewerbegebiet in der Klasse thermisch sehr ungünstige Situation zu finden. Der klimatische Sanierungsbereich erstreckt sich hier weiter bis nach Schleußig und teilweise nach Altlindenau und Neulindenau. In Leipzig Leutzsch, nördlich der Merseburger Straße ist ein weiteres Cluster des klimatischen Sanierungsbereiches auszumachen. In Grünau sind jedoch im Vergleich nur vereinzelte Blöcke im klimatischen Sanierungsbereich.

Werden die Blöcke analysiert, die unter Klimawandelbedingungen mit einer Zunahme der Temperatur schnell in die Klasse ungünstig kippen würden, ist ersichtlich, dass sich die Blöcke über ganz Leipzig verteilen. Östlich und südöstlich vom Hauptbahnhof lässt sich eine vermehrte Anzahl an diesen Blöcken finden, aber auch in Neulindenau und Liebertwolkwitz. Die Blöcke sind durch einen hohen Versiegelungsgrad in den Innenhöfen und einer recht kompakten Gebäudestellung: entweder recht eng zum Nachbarhaus oder geschlossener Blockrand gekennzeichnet.

Abbildung 16 zeigt eine Auswertung der 2.273 Blöcke nach Flächengröße und Einwohnerdichte je thermischer Bewertungsklasse: sehr ungünstige und ungünstige thermische Situation sowie die Kippflächen, die aktuell eine mittlere thermische Belastungssituation aufweisen. Die Klasse mit den höchsten Flächensummen ist die der ungünstigen thermischen Situation mit über der Hälfte (64%). Ein Viertel der Flächensummen des klimatischen Sanierungsbereiches befinden sich in der sehr ungünstigen thermischen Situationsklasse. Wird die mittlere Einwohnerdichte des klimatischen Sanierungsbereiches berücksichtigt, ist ersichtlich, dass es mehr Einwohner je Hektar in der Kippklasse gibt, gefolgt von ca. 112 Einwohner/ha in der Klasse ungünstige thermische Situation, und dass die geringste Einwohnerdichte mit 77 Einwohner/ha in die Klasse sehr ungünstig fallen. Dies spricht dafür, dass es sich hier größtenteils um Gewerbegebiete mit Arbeitsplätzen handelt. Hier sollte besonderer Augenmerk auf die Verbesserung der Aufenthaltsqualität am Tage gelegt werden.

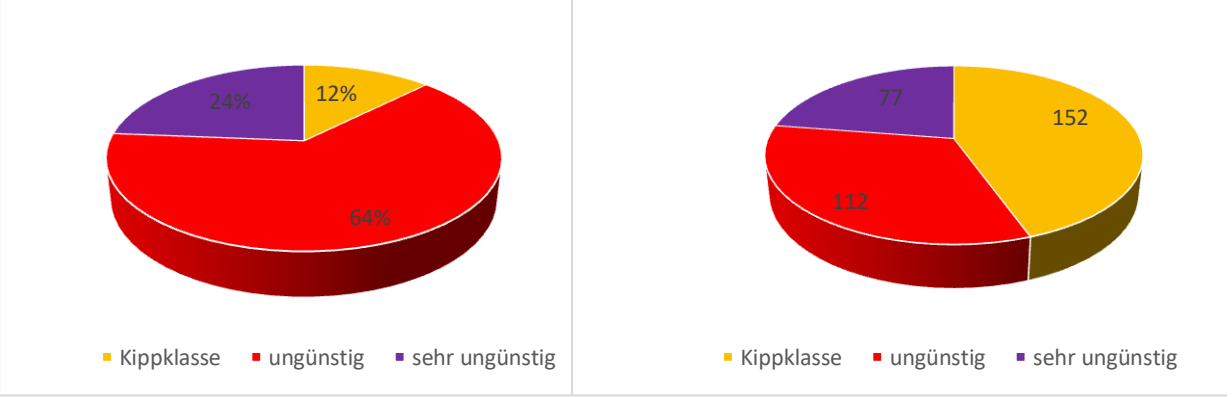


Abbildung 16: Statistische Auswertung des klimatischen Sanierungsbereiches nach Fläche [ha] (links) und nach Einwohnerdichte EW/ha (rechts).

Werden nun die überlagerten Vulnerabilitätsindikatoren analysiert, so wird ersichtlich, dass 937 Blöcke des klimatischen Sanierungsbereiches mit ca. 943 ha gleichzeitig vulnerable Bevölkerungsgruppen (Kinder und ältere Menschen ab 65 Jahren) vorweisen. Die Spalte mit der Kennzeichnung „hohe Anzahl an vulnerabler Bevölkerung“ verdeutlicht die Verteilung für den prioritären Handlungsbedarf und ist in der Karte im Anhang mit Schraffur dargestellt.

Tabelle 2: Indikator vulnerable Bevölkerungsgruppen im klimatischen Sanierungsbereich. Die Darstellung wird für den gesamten klimatischen Sanierungsbereich dargestellt und die Spalten mit einer hohen Anzahl an vulnerablen Gruppen verdeutlichen den besonderen Handlungsbedarf und sind in der Karte im Anhang 8.3 mit Schraffur dargestellt.

Indikator: vulnerable Bevölkerungsgruppen Kinder unter 6 [über 15 je Block] ältere Menschen über 65 [über 32 Menschen je Block] ältere Menschen über 80 Jahre [über 12 Menschen je Block]	**Gesamtanzahl der Blöcke**	**Hohe Anzahl an vulnerablen Gruppen**	**Gesamtfläche in [ha]**	**Hohe Anzahl vulnerabler Gruppen (Fläche in ha)**
gesamt	2.273	937	3.090	943
In Klasse: 4-sehr ungünstige thermische Situation	532	202	732	248
In Klasse: 3-ungünstige thermische Situation	1.304	510	1.971	491
In Klasse: 2-mittlere thermische Situation/Kippklasse	437	225	387	204

Der Indikator Bevölkerungsdichte zeigt für den gesamten klimatischen Sanierungsbereich eine Dichte für die 2.273 Blöcke im Mittel von 112 Einwohner/ha, wobei die höchste mittlere Bevölkerungsdichte in der Kippklasse mit 152 EW/ha zu finden ist. Die Karte im Anhang 8.3 zeigt eine Schraffur für die Bereiche mit einer hohen Bevölkerungsdichte. Die Blöcke sind über das gesamte Stadtgebiet in Leipzig verteilt. Sie reihen sich sowohl um das Zentrum, als auch teilweise um die einzelnen Ortsteilkerne. Gohlis, Schönefeld, Neustadt-Neuschönefeld, der Südvorstadt/Connewitz, Altlindeau, Plagwitz und Grünau sind Bereiche mit einer hohen Bevölkerungsdichte.

In 19 Blöcken gibt es eine Mehrfachüberlagerung der Indikatoren (eine Vielzahl von Kindern als auch älteren Menschen und eine hohe Bevölkerungsdichte) in Kombination mit der *sehr ungünstigen Klasse* des klimatischen Sanierungsbereiches und einer vulnerablen Einrichtung. Die Klasse der *ungünstigen klimatischen Situation* weist 81 Blöcke mit einer Mehrfachbelastung auf (vulnerablen Gruppen und eine hohe Bevölkerungsdichte) und 6 vulnerable Einrichtungen. Die *Kippklasse* weist in Kombination mit den Vulnerabilitäts-Indikatoren 39 Blöcke auf mit 4 vulnerablen Einrichtungen. Die Abbildung 17 zeigt die Lage der Flächen in einem Zoom auf das Stadtgebiet. Eine Häufung lässt sich in Gohlis finden und südlich des Zentrums in der Südvorstadt.

Die identifizierten 19 Blöcke, die eine Mehrfachbelastung mit einer sehr ungünstigen thermischen Situation aufweisen, besitzen eine hohe Priorität und sollten als erstes eine Verbesserung der thermischen Situation erfahren.

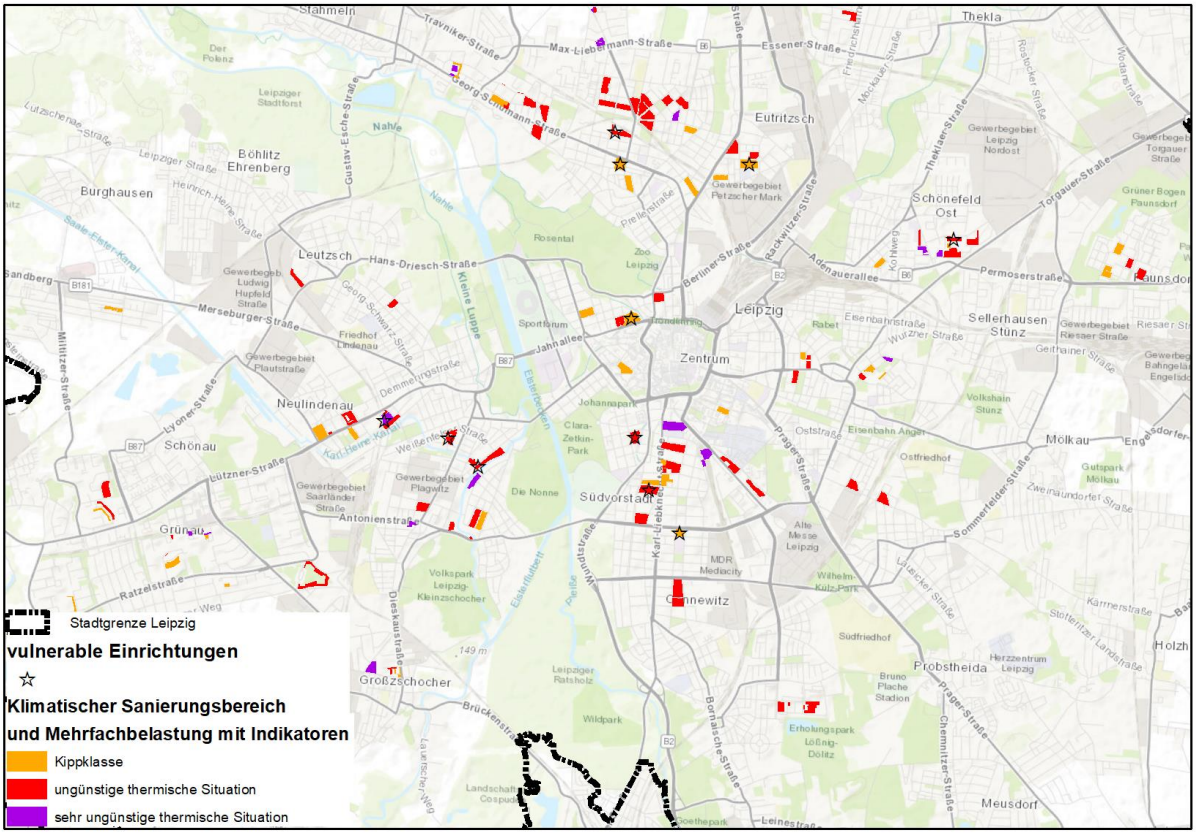


Abbildung 17: Überblick über die räumliche Verteilung der Blöcke, die im klimatischen Sanierungsbereich liegen und eine Mehrfachbelastung durch vulnerable Gruppen und hoher Bevölkerungsdichte aufweisen.

5 Besonders schützenswerte Grünflächen und ihre Aufwertung

5.1 Methodik der Ausweisung

Nachdem in der Planungshinweiskarte alle Grünflächen im Stadtgebiet hinsichtlich ihrer stadtklimatischen Funktion bewertet wurden, werden nun weitere Eigenschaften der Grünflächen geprüft, um eine Flächenkulisse von Grün- und Freiflächen zu schaffen, die aus stadtklimatischer Sicht für die Bewohnenden besonders wertvoll sind. Für die Nachtsituation wurden die nun vorliegenden detaillierten Untersuchungen zum Kaltlufthaushalt zugrunde gelegt. Für die Tagsituation wurden neben der Entfernung zum klimatischen Sanierungsbereich auch die Grünflächenversorgung der Bürger und Bürgerinnen sowie die Nähe zu vulnerablen Gruppen und Einrichtungen in die Ableitung der Schutzwürdigkeit integriert. Die Abbildung 18 und die Abbildung 19 zeigen die Bewertungen der Grünflächen unter dem Aspekt der Schutzwürdigkeit für die Tag- und Nachtsituation.

Am *Tag* (Abbildung 18) spielt v.a. die fußläufige Erreichbarkeit (250 m, ca. 5 Gehminuten) aus dem klimatischen Sanierungsbereich (siehe Abschnitt 4) eine große Rolle, v.a. wenn die Blöcke mit öffentlichen Grünflächen unterversorgt sind. Hier wurde eine Analyse der Stadt Leipzig zur Grünflächenversorgung übergeben. Ziel ist es nach dem Integrierten Stadtentwicklungskonzept (INSEK), Fachkonzept Freiraum und Umwelt, jeden Einwohnenden in Leipzig mit mindestens 6 m² öffentlicher wohnungsnaher Grünfläche im Abstand von 250 m zu versorgen (laut Landschaftsplan 2013 beträgt der Versorgungsrichtwert für wohnungs- und siedlungsnahe Grünflächen in Anlehnung an den GALK-Richtwert insgesamt 13 m²/EW.). Um der teilweise geringen Verfügbarkeit an Grünflächen in diesem Radius angemessen zu begegnen und etwas weiter weg liegende, dennoch u.U. erreichbare Grünflächen nicht zu vernachlässigen, wurde in der Abfrage (s. Abb. 25) eine zweite Stufe bei 500 m Entfernung integriert.

Der Wald wird, aufgrund seiner herausragenden Stellung als klimatisch optimaler Aufenthaltsraum mindestens mit der Klasse „schutzwürdig“ bewertet.

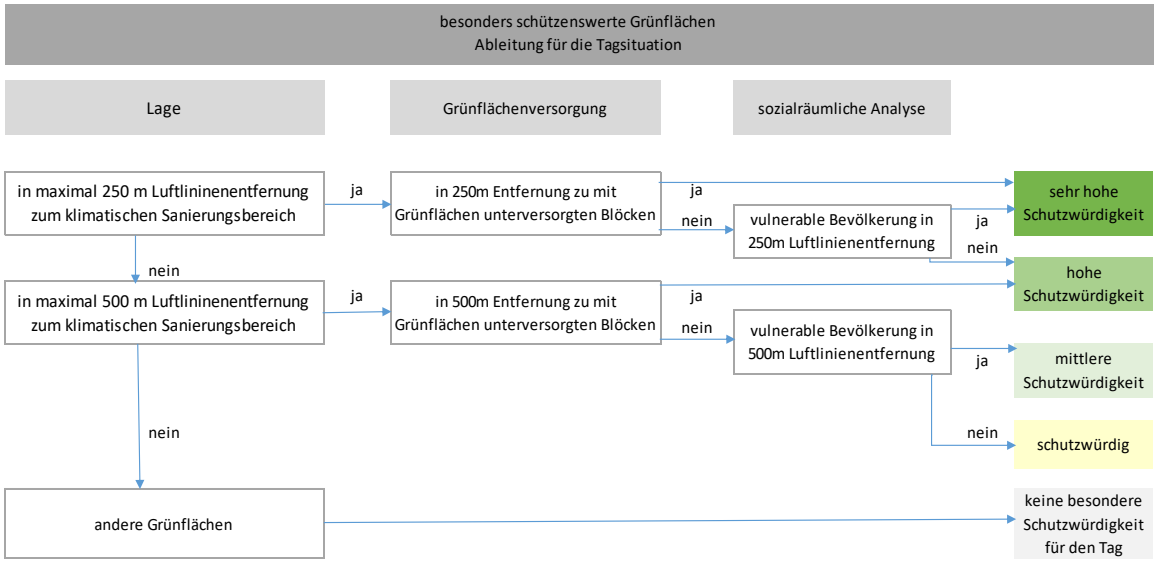


Abbildung 18: Abfrageschema für den Tag

In der *Nacht* (Abbildung 19) fließt v.a. die detaillierte Analyse zu den Kaltluftleitbahnen ein (siehe Kapitel 3) und führt zu einer Bewertung der Grünflächen hinsichtlich ihrer Funktion in den Prozessräumen. So werden das Kaltluftentstehungsgebiet, die primäre Leitbahn und der flächenhafte Kaltluftabfluss als sehr hoch schutzwürdig eingestuft. Die Entfernung der Grünfläche zum klimatischen Sanierungsbereich spielt ebenfalls eine übergeordnete Rolle, umso mehr, wenn es vulnerable Bevölkerungsgruppen oder Einrichtungen in der Nähe (100 m) gibt, denn die Grünflächen können durch ihre Kühlleistung den Schlaf erholsamer machen.

Grünflächen, die außerhalb der Kaltluftprozessräume liegen, werden nach ihrem Kaltluftvolumenstrom, ihrer Kaltluftproduktionsrate und Durchströmung (Windgeschwindigkeit) und ebenso über ihre Lage zum klimatischen Sanierungsbereich und zu vulnerablen Bevölkerungsgruppen/Einrichtungen

bewertet. Außerhalb der Kaltluftprozessräume versorgen Grünflächen den unmittelbar angrenzenden Siedlungsbereich mit kühler Luft und gewinnen daher an Bedeutung.

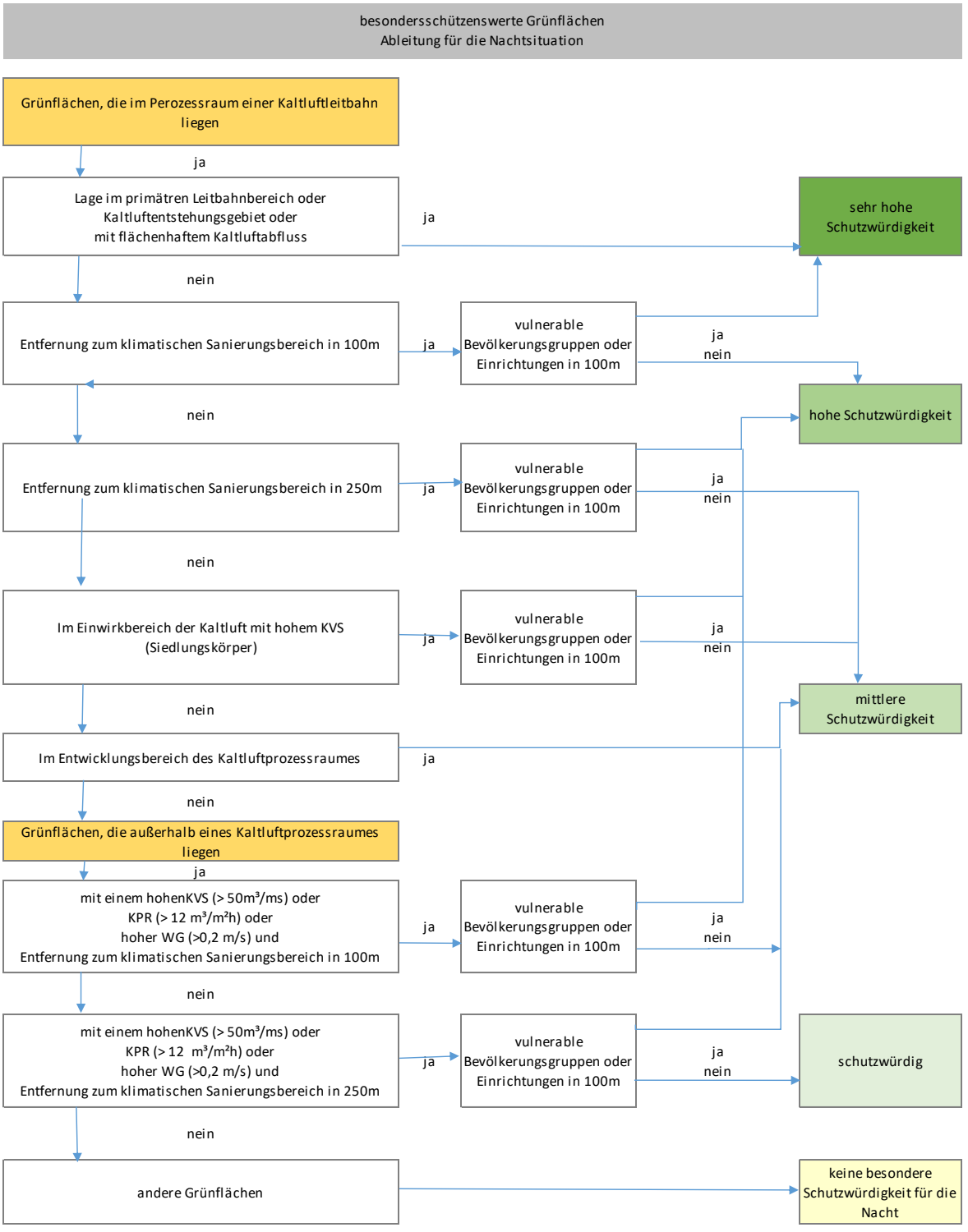


Abbildung 19: Abfrageschema für die Nacht

Nach Durchlaufen der Bewertung wurden die *öffentlichen Grünflächen* wie Parkanlagen einem weiteren Bewertungsschritt unterzogen, um deren Bedeutung für die Einwohnenden in Leipzig herauszustellen. Falls ein Teil einer öffentlichen Parkanlage eine höhere Kategorie als die restlichen Flächen aufweist, wurde diese höchste Bewertungskategorie auf die gesamte öffentliche Parkanlage übertragen.

Die Kombination der Grünflächenbewertung für die *Tag- und Nachtsituation* zu einer Gesamtbewertung erfolgte indem die jeweils höchste Kategorie übertragen wurde.

Die *Aufwertung* der besonders schützenswerten Grünflächen ist in Abbildung 20 zu sehen und wird für die drei Bereiche angegeben:

- Aufwertung der mikroklimatischen Vielfalt (auch Maßnahme M14 (siehe Kapitel 6.14)
- Bessere Durchströmbarkeit der Fläche für die Kaltluft (auch Maßnahme M09 (siehe Kapitel 6.9)
- Freie Zugänglichkeit zur Grünfläche herstellen.

Für die Grünflächen, die tagsüber einen hohen PET (> 35 °C) aufweisen, wird eine mikroklimatische Aufwertung empfohlen, die Verschattungselemente auf den Grünflächen in Form von Bäumen oder gebauten Verschattungen ebenso wie die Anlage von anderen verdunstungsaktiven Flächen wie Springbrunnen, Sumpfpflanzen etc. umfassen kann. Für Grünflächen, die nicht öffentlich zugänglich sind und die sich in den Klassen schutzwürdig bis sehr hoch schutzwürdig befinden, wird die Schaffung der beschränkungsfreien Zugänglichkeit empfohlen. Alle Grünflächen befinden sich in einem maximalen Luftlinienabstand von 500 m zum klimatischen Sanierungsbereich.

Die Aufwertung der Grünflächen für ein verbessertes Fließen der Kaltluft in der Nachtsituation wird anhand der in den Kaltluftprozessräumen identifizierten Entwicklungsbereiche vollzogen.

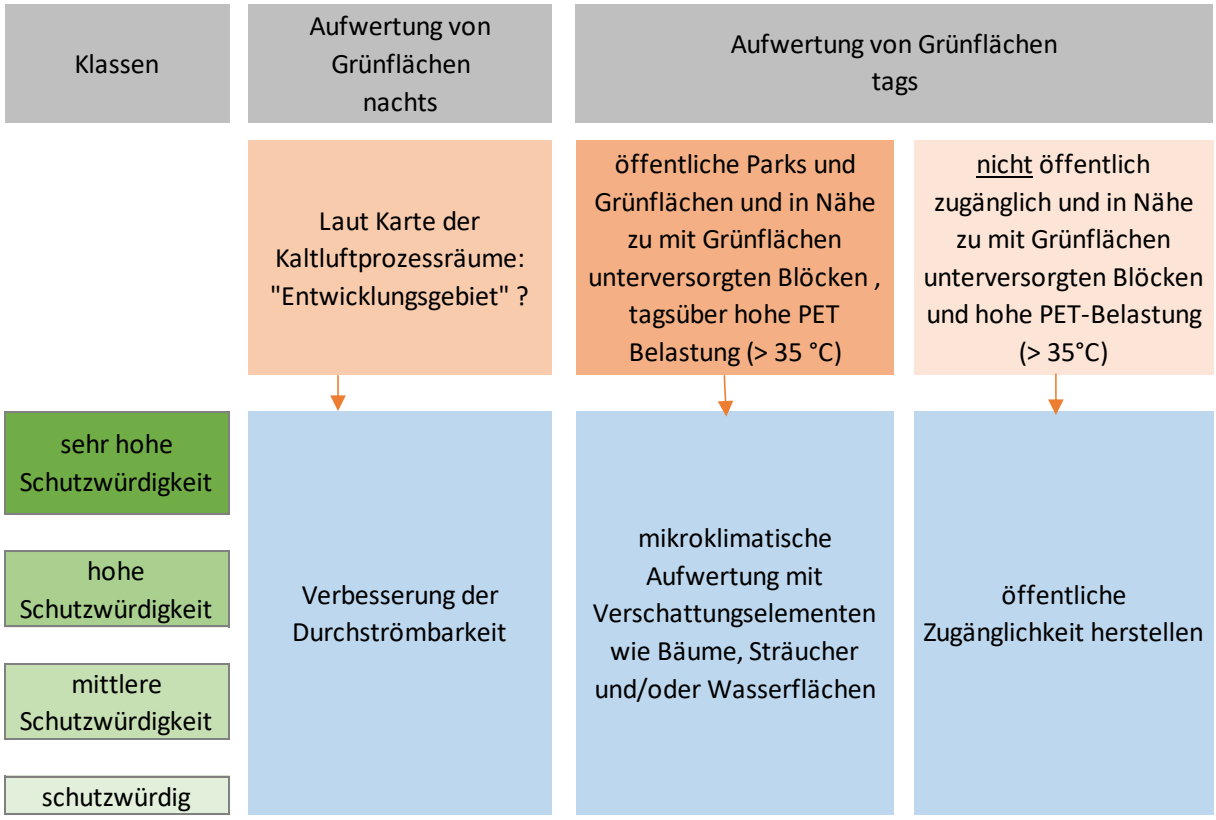


Abbildung 20: Überblick über die Aufwertung der besonders schützenswerten Grünflächen

5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der stadtklimatisch besonders schützenswerten Grün- und Freiflächen finden sich in der Karte mit den klimatischen Sanierungsgebieten im Anhang 8.3 wieder.

Tabelle 3: Statistik zu den besonders schützenswerten Grünflächen

Schutzwürdigkeit der Grünflächen	Anzahl	Fläche in ha
keine besondere Schutzwürdigkeit	569	1.828
schutzwürdig	144	795
mittlere Schutzwürdigkeit	14	31
hohe Schutzwürdigkeit	1.032	3.318
sehr hohe Schutzwürdigkeit	6.903	12.303

Die Tabelle 3 und Abbildung 21 zeigen die Aufteilung der Flächen in den einzelnen Schutzwürdigkeitskategorien. Die meisten Grünflächen mit einer Anzahl von 6.903 und einer gesamten Flächengröße von 12.303 ha (67 %) fallen in die Kategorie der *sehr hohen Schutzwürdigkeit*. Die Flächen sind über die gesamte Stadt Leipzig verteilt und beinhalten neben Ackerflächen auch Teile des Auwaldes und alle im Zentrum befindlichen Grün- und Freiflächen sowie viele weitere öffentliche Grünanlagen wie bspw. das Rosental, Clara-Zetkin- und Johannapark, den Alten Johannisfriedhof oder den Lene-Voigt Park. Es sind Flächen, die zur Reduzierung der stadtklimatischen Belastungen und einer Unterversorgung mit öffentlichen Grünflächen beitragen können. Sie sollten eine sehr hohe Priorität beim Schutz und Erhalt erfahren.

Abbildung 21: Statistische Auswertung der besonders schützenswerten Grün- und Freiflächen nach Fläche.

Immerhin 1.032 Flächen mit 18 % Flächenanteil sind in die *hohe* Schutzwürdigkeitskategorie eingeordnet. Diese Flächen liegen deutlich weiter entfernt von den Siedlungsflächen in Leipzig. Es sind Grün- und Freiflächen wie der südliche Auwald, Teile des Erholungsparkes Lößnig-Dölitz, Flächen nördlich der Altdeponie Möckern entlang der Luppe und Grün- und Freiflächen an den Rändern der Stadt in dieser Kategorie eingeordnet. Da die fußläufige Erreichbarkeit der Grün- und Freiflächen zu Erholungszwecken und die Reichweite von nächtlichen Kaltluftströmungen zugrunde liegen, entsteht dieses Muster der Schutzkategorien. Der Status der *mittleren Schutzwürdigkeit* ist mit 14 Grün- und Freiflächen und 31 ha sehr gering. 569 Grün- und Freiflächen mit 1.828 ha (10 %) haben *keine besondere Schutzwürdigkeit*. Diese Flächen liegen fast ausschließlich am Stadtrand von Leipzig. Einige

Flächen sind in Zweinaundorf, Kleinzschocher und südlich von Grünau verortet. Dort gibt es kaum Siedlungsflächen im klimatischen Sanierungsbereich und dementsprechend haben die Grünflächen *keine besondere Schutzwürdigkeit*, da sie tagsüber weder fußläufig als Erholungsräume bei hoher Wärmebelastung genutzt werden können noch nachts besondere Ausgleichsfunktionen durch Kaltluftlieferung und -transport erfüllen.

Die Aufwertung der Grün- und Freiflächen wird für die weiter oben genannten drei Gruppen empfohlen: Aufwertung der mikroklimatischen Vielfalt, Verbesserung der Durchströmbarkeit der Grünflächen für die Kaltluft, Herstellen von freier Zugänglichkeit zur Grünfläche.

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Aufwertung der Grün- und Freiflächen in Leipzig.

Aufwertungen	Anzahl	Fläche in ha
Aufwertung freie Zugänglichkeit	5.178	5.264
Aufwertung des Mikroklimas	1.793	1.077
Bessere Durchströmbarkeit für Kaltluft	52	1,3

Die *Schaffung von freiem Zugang* ist mit 5.178 Flächen mit einer Gesamtgröße von 5.264 ha vorgeschlagen und ist somit die meistgenannte Aufwertungsmöglichkeit für die Grün- und Freiflächen. In diese Aufwertungskategorie fallen v. a. *nicht öffentliche* Grünflächen, wie bspw. Kleingartenanlagen oder Sportflächen zwischen Kleiner Luppe und Weißer Elster zwischen Gohlis, Zentrum-Nordwest und Leutzsch. Flächen in dieser Kategorie erstrecken sich über das gesamte Stadtgebiet von Leipzig und orientieren sich sehr stark an der Lage des klimatischen Sanierungsbereiches, der mit Grünflächen unterversorgt ist.

Die *Aufwertung des Mikroklimas* betrifft v. a. *öffentliche* Grünflächen, die eine hohe Wärmebelastung am Tag aufweisen und die in der Nähe zu mit Grünflächen unterversorgten Blöcken liegen. Sie bieten demzufolge an Sommertagen nicht ausreichende stadtklimatische Erholungsfunktionen für die Bevölkerung. Wie anhand der Karte im Anhang 8.3 sichtbar ist, wird diese Maßnahme oftmals für kleinere Flächen ausgewiesen. Diese sind jedoch ebenso über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Es sind 1.793 Flächen, mit ca. 1.077 ha Flächen dafür identifiziert. Dabei wurden öffentliche Parkareale zusammengefasst und die mittlere Wärmebelastung aller Parkareale zusammen bewertet. Oftmals gibt es einen durchaus gewollten Wechsel von Baumgruppen, offenen Wiesenbereichen oder Wasserflächen in öffentlichen Parks. Gerade die offenen Wiesenbereiche würden in der Auswertung sehr schlecht abschneiden, da sie tagsüber einer starken Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, sich daher stark erwärmen und somit teilweise deutlich über den 35 °C PET liegen, was einer starken Wärmebelastung entspricht.

Für eine *bessere Durchströmbarkeit* der Grün- und Freiflächen für die nächtliche Kaltluft werden 52 Flächen mit einer Größe von 1,3 ha ausgewiesen. Die detaillierte Analyse der Prozessräume der Kaltluft (siehe Kapitel 3) mit der Identifizierung von Entwicklungsbereichen führt zu dieser Flächenkulisse. Diese Grün- und Freiflächen erstrecken sich v. a. im Norden und Osten von Leipzig: in Gohlis, Eutritzsch, Mockau und Stötteritz. Hier könnte durch geeignete Maßnahmen wie die lockerere Anordnung von Bäumen oder Gebäuden das Weiterfließen der Kaltluft optimiert werden.

6 Maßnahmen für eine klimaangepasste Stadtentwicklung und -planung

Neben der erarbeiteten Planungshinweiskarte mit den allgemeingültigen Planungshinweisen, werden an dieser Stelle konkrete Maßnahmen für eine klimaangepasste Stadtentwicklung und -planung aufgezeigt. Dabei werden sowohl für den Siedlungs-, Straßenraum als auch für den Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) Maßnahmen empfohlen, um die Aufenthaltsqualität am Tag zu verbessern, die Hitzebelastung zu reduzieren oder die klimaökologische Funktion der Flächen zu erhalten. Oftmals ergänzen sich die Maßnahmen, so dass mehrere Maßnahmen einem Block, dem Straßenraum oder einer Grün- und Freifläche zugeordnet werden können.

Die Zuordnung der Maßnahmen basiert vor allem auf den Ergebnissen der Modellsimulation und dem daraus entstandenen Produkt: der Planungshinweiskarte (vgl. Klimaanalyse Phase I). Weitere Bausteine sind die detaillierte Prozessraumanalyse der Kaltluftleitbahnen (Kapitel 3), die klimatischen Sanierungsbereiche (Kapitel 4) und die besonders schützenswerten Grün- und Freiflächen (Kapitel 5). Zusätzlich wurden weitere Geo- und Sachdaten einbezogen, um zu einer möglichst flächenscharfen Empfehlung zu kommen. Diese sind in einer jeweiligen Maßnahmen-Karte zusammengefasst und liegen in der Stadt Leipzig als GIS-Daten für die weitere Arbeit vor.

Weiterhin wird versucht über bereits in anderen Projekten quantifizierte Verbesserungen, oftmals in Form der Reduktion der Lufttemperatur in der Nacht oder der PET am Tag, über die Wirksamkeit der Maßnahmen zu informieren. Dabei dienen diese Werte und Angaben lediglich als Richtwert, da je nach Umgebung andere Wertespannen erreicht werden können.

Die zusammengestellten Informationen zu anwendbaren Maßnahmen richten sich vorrangig an die für die Umsetzung der Maßnahmen zuständigen Stellen der Kommunalverwaltung wie Stadtplanungs- und Umweltamt, Verkehrs- und Tiefbauamt, Amt für Stadtgrün und Gewässer, Amt für Wohnungsbau- und Stadterneuerung. Insbesondere im Zusammenhang mit Maßnahmen im Bestand sind die Akteure der Stadtsanierung und der Architektur, der Investierenden, und Immobilien besitzende - sowie mietende Personen die Zielgruppe.

Im Folgenden wird der für Leipzig identifizierte Maßnahmenkatalog textlich beschrieben. Die 17 Einzelsteckbriefe bieten leipzigspezifisches kartographisches und erläuterndes Abwägungsmaterial, Entscheidungsgrundlagen und (sofern vorhanden) Umsetzungsbeispiele in Leipzig oder aus anderen Städten. In der Tabelle 5 sind die Maßnahmen mit ihrem Titel und der betreffenden Raumeinheit und Maßstabsebene gelistet.

Tabelle 5: Empfehlungen zu raumeinheitenspezifischen Maßnahmen

Maß-nahme	**Bezeichnung**	**Empfehlung für Raumeinheit**				
		Siedlungs-raum	**Stra-ßen, Wege, Plätze**	**Grün- und Freiflä-chen**	**Ge-wässer**	**Maßstabs-ebene**
M01	Verschattung von Gebäuden	ja	nein	nein	nein	Gebäude
M02	Dachbegrünung	ja	nein	nein	nein	Gebäude
M03	Energetische Gebäudesanie-rung	ja	nein	nein	nein	Gebäude

M04	Potenzialprüfung Entsiegelung	ja	ja	nein	nein	Block
Maß-nahme	**Bezeichnung**	**Empfehlung für Raumeinheit**				
		Siedlungs-raum	**Stra-ßen, Wege, Plätze**	**Grün- und Freiflä-chen**	**Ge-wässer**	**Maßstabs-ebene**
M05	Durchgrünung	ja	ja	nein	nein	Block
M06	Erhöhung der Oberflächen-Albedo	ja	ja	nein	nein	Block
M07	Schaffung von frei zugänglichen Grünflächen	ja	nein	ja	nein	Quartier
M08	Förderung stadt-gesellschaftlicher sozialer Netz-werke und Pro-jekte	ja	ja	ja	nein	Quartier
M09	Vermeidung von Austauschbarrie-ren	ja	ja	ja	ja	Kaltluftprozess-raum
M10	Verschattung von Straßen, öffentlichen Plät-zen, Gehwegen und Parkplätzen	nein	ja	ja	nein	Straßenraum
M11	Reduzierung der Mehrfachbelas-tung	nein	ja	nein	nein	Straßenraum
M12	Begrünung von Gleistrassen	nein	ja	nein	nein	Straßenraum
M13	Bewegte Was-serflächen im öffentlichen Raum schaffen	nein	ja	ja	nein	Straßenraum
M14	Erhöhung der mikroklimati-schen Vielfalt in öffentlichen Grünflächen	nein	nein	ja	nein	Grünflächen

M15	Schutz bestehender großflächiger Parks / Grünflächen	nein	nein	ja	nein	Grünflächen
M16	Schutz von Waldflächen	nein	nein	ja	nein	Grünflächen
M17	Schutz von offenen Wasserflächen	nein	nein	ja	ja	Wasserflächen

6.1 M01 - Verschattung von Gebäuden

Das primäre Ziel dieser Maßnahme ist es, die direkte Aufheizung sowie die Wärmespeicherung der Gebäude über die Gebäudehülle (Dach, Fassade, Fenster) zu verringern. Folgende Faktoren beeinflussen das sommerliche Wärmeverhalten von Gebäuden (Rodríguez Castillejos et al. 2017):

- Standort und Ausrichtung des Gebäudes nach Himmelsrichtungen
- Bauweise, inkl. Farbe (siehe Maßnahme M06, Abschnitt 6.6)
- Art des Sonnenschutzes und der Verglasung
- Lüftung und Nutzerverhalten

Die höchste Sonneneinstrahlung und damit Wärmezufuhr für unterschiedliche Oberflächen wie Fassaden und Bodenbeläge variieren über den Tagesverlauf und müssen gesondert behandelt werden:

- Für *waagerechte Bodenoberflächen* ist der Zeitpunkt der größten Sonneneinstrahlung der Sonnenhöchststand zur Mittagszeit. Für senkrechte Fassaden ist das je nach Ausrichtung deutlich früher oder später im Tagesverlauf.
- Eine *Ostfassade* bekommt das Maximum der Bestrahlungsstärke am frühen Vormittag. Hier sollte bei vorhandenen großen Fensterflächen ebenfalls eine Verschattung bedacht werden, was bspw. jüngst im Projekt Heat Resilient City (2020) bei der Analyse der Innenraumtemperaturen eines Gründerzeithauses in Erfurt nachgewiesen wurde.
- Eine *Südfassade* kann je nach maximalem Sonnenhöhenwinkel ein Maximum der solaren Einstrahlung am Vormittag und Nachmittag erhalten oder es fällt auf den Mittag wie bei den waagerechten Bodenoberflächen. Generell wird die Südfassade *am längsten* durch die Sonne im Tagesverlauf beschienen.
- Eine *Westfassade* wird *am stärksten* erwärmt, da hier der Einfallswinkel der Sonne zu einer intensiveren Erwärmung der Fassade führt. Die Fassade ist von Mittag bis in die Abendstunden besonnt (Rodríguez Castillejos et al. 2017, S. 52).

Prioritär sollten also Maßnahmen zur Reduzierung der Wärmebelastung an West- und Südfassaden ergriffen werden.

Die Forschenden (HeatResilientCity 2020) weisen mehrfach darauf hin, dass eine Kombination von unterschiedlichen Maßnahmen wie Verschattung am Gebäude, plus Wärmedämmung und korrektes Lüftungsverhalten (tagsüber geschlossene Fenster und Rollläden/Jalousien; abends und in der Nacht querlüften) die Innenraumtemperatur deutlich reduzieren kann und damit zu einer besseren Wohn- und Schlafumgebung beitragen kann, v. a. in Dachgeschosswohnungen (HeatResilientCity 2020).

Gebäude können durch Vegetation wie Bäume oder Gebäudebegrünung oder auch durch bautechnische Maßnahmen verschattet werden (Abbildung 22).

Für die Verschattung sind großkronige Laubbäume gegenüber Nadelbäumen zu bevorzugen, da sie im Winter einen vergleichsweise geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können (Abbildung 22 und Abbildung 25). Die meisten architektonischen Möglichkeiten bieten Neubauten. Viele bautechnische Elemente lassen sich aber auch nachrüsten. Ausführungsbeispiele hierfür sind Vordächer und Vertikallamellen (auch Brise Soleils genannt), sowie Markisen und Sonnensegel. Für die Maßnahmen direkt am Gebäude trägt der (private) Eigentümer die Verantwortung bzgl. der kommunalen Liegenschaften ist dies die öffentliche Hand. Im Randbereich von Straßenräumen zu Liegenschaften anderer Eigentümer kann die öffentliche Hand aber auch zugunsten dieser Eigentümer tätig werden. Eine Verschattung ist in fast allen Flächentypen möglich und sinnvoll (Abbildung 22 und Abbildung 25).

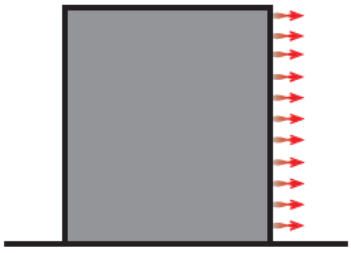
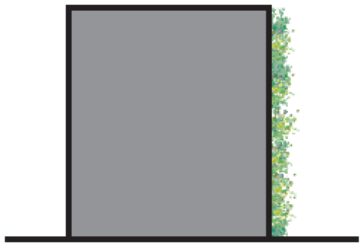
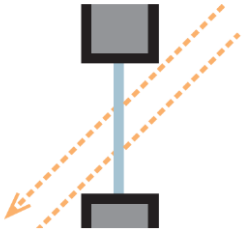
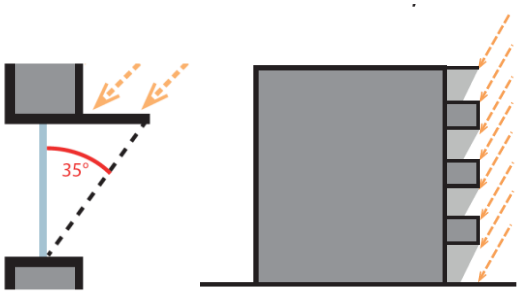
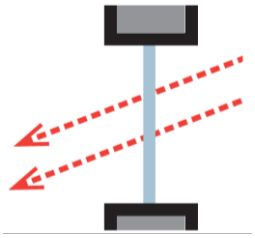
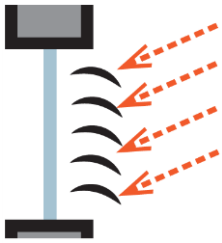
Ausgangssituation	Maßnahme
Fassaden mit Lastreserven, für Begrünung geeignet 	Fassadenbegrünung 
Fassaden mit genügend Platz/Freiraum vor der Fassade	Bäume als Verschattungselemente
Fenster mit Süd-Ausrichtung 	Verschattungselement: horizontaler Sonnenschutz in Form von Brise Soleils oder Balkonen 
Fenster mit West- und Ost-Ausrichtung 	Verschattungselement: vertikaler Sonnenschutz in Form von Brise Soleils oder Jallousien 

Abbildung 22: Verdeutlichung und Möglichkeiten der Verschattung von Gebäuden. Quelle: (Rodríguez Castillejos et al. 2017, 50f)

Im Folgenden wird auf konkrete Möglichkeiten eingegangen.

Fassadenbegrünung

Der planmäßige und kontrollierte Bewuchs geeigneter oder speziell vorgerichteter Fassaden mit Pflanzen wird als Fassadenbegrünung bezeichnet. Es wird zwischen erd- und fassadengebundenen Systemen unterschieden.

In erster Linie wirkt die Grünfassade dämmend auf das Gebäude und führt zu Abmilderung der Innentemperaturextreme im Tages- und Jahresverlauf. Das schattenwerfende Blattwerk, die Luftschicht zwischen der Vegetation und der Hauswand sowie die Evaporation des Fassadengrüns verringern die Wärmeaufnahme und die Oberflächentemperatur der Gebäudehülle und erhöhen den thermischen Komfort in allen Stockwerken des Gebäudeinneren sowie im unmittelbar angrenzenden Außenklima. Ein weiterer positiver Effekt ist die Verbesserung der Luftqualität in der Nähe der Fassadenbegrünung. Die relativ große Pflanzenoberfläche ad- und absorbiert den Feinstaub und andere Luftschadstoffe. Auch eine lärmmindernde Wirkung der Fassadenbegrünung ist messtechnisch nachgewiesen. Ähnlich wie Dachbegrünung tragen auch Fassadenbegrünungen zur Speicherung und Verdunstung von Niederschlagswasser sowie zur Erhöhung der Biodiversität bei (Pfoser et al. 2013).

Es gibt diverse Ausführungsmöglichkeiten einer Fassadenbegrünung. Die Entscheidung hängt hauptsächlich von den Bauwerkseigenschaften ab und sollte gut geplant werden, um eventuelle Schäden am Gebäude oder der Begrünung zu vermeiden. Dabei ist sowohl der Aufbau (Pflanzenart, Befestigungsart und die entstehende Last) zu berücksichtigen als auch die späteren pflegerischen Maßnahmen (Bewässerung, Pflanzenschnitt).

Aufgrund seiner umfassenden humanbioklimatischen Wirkung und seiner Multieffektivität in Bezug zu anderen Schutzgütern (s.o.) kann die Maßnahme als absolut prioritär bezeichnet werden. Analog zur Dachbegrünung liegt auch hier die Verantwortung für die Umsetzung der Maßnahme vor allem bei den Gebäudeeigentümern.

Abbildung 23: Empfehlungen für Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier Fassadenbegrünung. Oberes Foto Kolonadenviertel in Leipzig (Julia Zimmerhäkel), unten Erlangen, Untere Karlstraße (Janko Löbig)

Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden: Fenster- und Glasflächen

Der Überhitzung von Räumen vorzubeugen ist das wesentliche Ziel des sommerlichen Wärmeschutzes. Dabei geht es darum, ein behagliches Innenraumklima während der Sommermonate sicherzustellen und gleichzeitig den Energieverbrauch für die Kühlung möglichst gering zu halten. Der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz ist in der EnEV geregelt und für neu zu errichtende Wohngebäude und Nichtwohngebäude verpflichtend (EnEV 2013 in Verbindung mit DIN 4108-2 2005). Auch für die Höhe der Raumtemperatur in Arbeitsstätten gibt es Technische Regeln (ASTA 2010).

Abbildung 24: Gutes Beispiel für die Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier Sonnenschutzglas der Einkaufsgalerie „Höfe am Brühl“. (Foto: Constanze Berbig)

Effektive Maßnahmen um möglichst wenig Wärme in das Gebäude zu lassen, beziehen sich vor allem auf Fenster- und sonstige Glasflächen. Hier sind insbesondere außen liegende Sonnenschutzelemente wie Jalousien, Markisen und Fensterläden zu nennen. Eine weitere Möglichkeit stellt reflektierendes oder absorbierendes Sonnenschutzglas oder -folie dar. Innenliegende Elemente sind deutlich weniger effektiv, aber z. B. bei bestimmten Vorgaben des Denkmalschutzes eine gute Alternative.

Neben der Verglasung sind aber auch die verwendeten Baumaterialien und Wanddicken entscheidend. Je geringer ihre Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind, desto weniger tragen sie zur Aufheizung des Innenraums bei bzw. unterstützen dessen nächtliche Auskühlung. Dieser Effekt wird durch Beschattung der Gebäudehülle unterstützt (siehe Ausführungen oben, sowie Abbildung 22, Abbildung 23, Abbildung 25 und Abbildung 26). Zum sommerlichen Wärmeschutz gehört ebenfalls eine geeignete Raumlüftung durch die Bewohnenden, die nur erfolgen sollte, wenn die Temperatur der Außenluft unter derjenigen der Innraumraumluft liegt, also in den Nacht- oder frühen Morgenstunden. Tagsüber kann eine Lüftung hingegen zu einer zusätzlichen Erwärmung der Räume führen (Rodríguez Castillejos et al. 2017).

Abbildung 25: Empfehlungen für Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier Bäume. Tarostraße in Leipzig. (Foto: Hannes Burkhardt)

Auch wenn der gesetzlich geregelte sommerliche Wärmeschutz speziell für Neubauten gilt, besteht das weitaus größere Potential im Bestand. Hier sind vor allem sämtliche Ansätze, die in Verbindung mit der Verglasung stehen, von Relevanz.

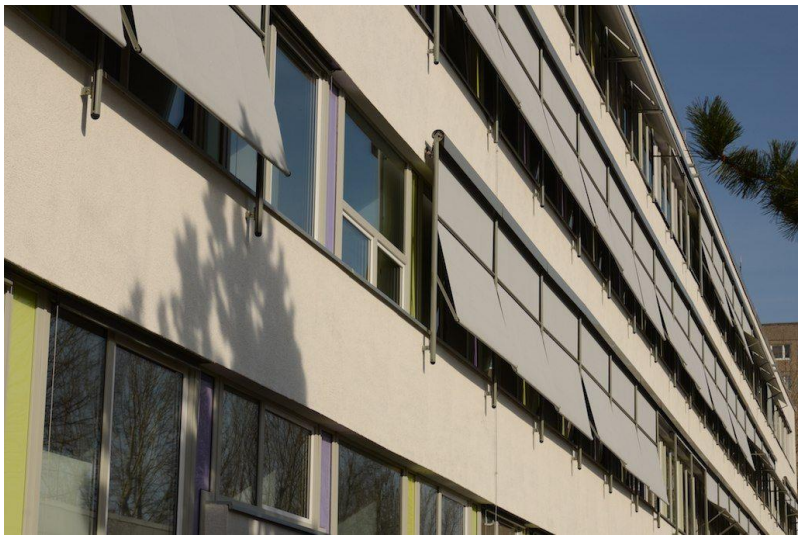


Abbildung 26: Empfehlungen für Maßnahme 1 „Verschattung von Gebäuden“, hier bautechnische Gebäudeverschattung, Ostwald-Gymnasium in Leipzig. (Foto: Johann Simowitsch)

In der Tabelle 6 sind Minderungen von Fassadenbegrünung und sommerlicher Wärmeschutz aufgetragen.

Tabelle 6: Wirkung und Reichweiten von Verschattungselementen. Quelle: (Stadt Zürich)

Mögliche Maßnahmen und Ihre Wirkungen	Ø Verbesserung		Verbesserung der maximalen:		Wirkungsbereich in (m)	
	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts
Fassadenbegrünung	-4,8	-1,3	-6,6	-1,7	4m-14m	2m-4m
Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden (vglb. Pergola auf Asphalt)	-3,7	-0,3	-6,0	-0,8	2m-3m	2m-3m

Die Maßnahme wird im Leipziger Stadtgebiet pauschal dem klimatischen Sanierungsbereich zugeordnet, da keine Informationen zu den vorhandenen Verschattungselementen wie Fassadenbegrünung, Markisen oder Rollläden oder Dämmungsstatus der Gebäude flächendeckend zur Verfügung stehen.

6.2 M02 - Dachbegrünung

Die Dachbegrünung kann die Erwärmung der Gebäude am Tage abschwächen. Sie wirkt positiv auf einen Gebäudebestand ein, da die Verdunstungskälte des Wassers an Pflanzenbestandteilen einen abkühlenden Effekt auf umgebende Luftmassen hat. Die Vegetation wirkt zusammen mit dem Substrat isolierend und verringert damit das Aufheizen darunter liegenden Wohnraums. Allerdings können nur relativ niedrige Gebäude (wie z.B. Einzel- und Reihenhäuser) mit Dachbegrünung zu einem im bodennahen Bereich positiven Abkühleffekt beitragen. Gründächer auf Gebäuden mit 4 oder mehr Geschossen zeigen in der untersten Schicht der Stadtatmosphäre (= Aufenthaltsbereich des Menschen, 2 m ü. Grund) keinen nennenswerten positiven Temperatureffekt. Voraussetzung für die Kühlwirkung ist allerdings immer ein ausreichendes Wasserangebot für die Vegetation. Im Winter isoliert ein Gründach zusätzlich und kann zur Senkung des Heizenergiebedarfes beitragen. Ein weiterer Vorteil von Dachbegrünung ist im Retentionsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird.

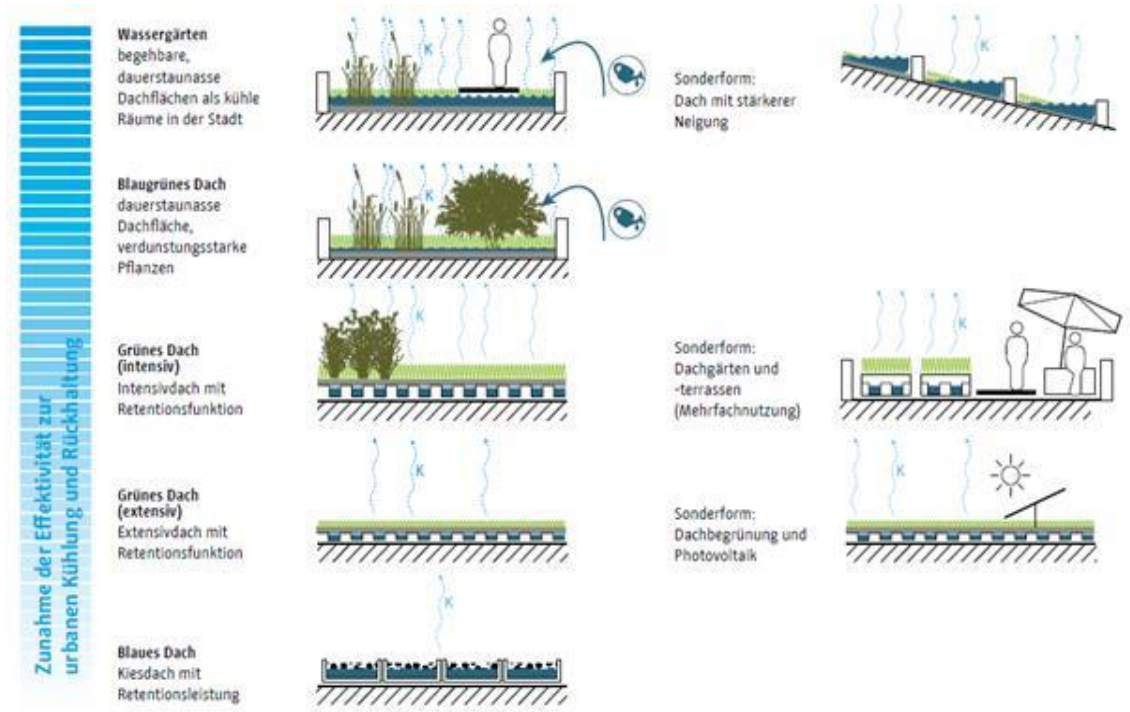


Abbildung 27: Dachaufbau bei unterschiedlich ausgeführten Gründächern und ihre Kühlwirkung und Rückhaltung (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016, S. 27)

In der Abbildung 27 sind die unterschiedlichen Ausführungen der Dachbegrünung dargestellt. Sie verdeutlicht die Unterschiede beim Dach- und Substrataufbau zwischen extensiven, intensiven Dachbegrünungen und Dächern, die in der Lage sind, Wasser zurückzuhalten und zwischenzuspeichern. Dabei ist es schwierig genau fest zu legen, ab welchen Substratdicken die Kühlwirkung von Dachbegrünung am größten ist. Eine Ausführung von Gründächern als Retentionsdach oder Wassergärten erzielt die größte Wirkung für die unmittelbare Temperaturreduktion. Die Bereithaltung von ausreichend Wasser zur Bewässerung des Gründaches besitzt eine stärkere Wirkung als eine größere Mächtigkeit der Substratschicht.

Intensive Gründächer können zudem begangen werden und bieten damit auch unmittelbar eine thermische Komfortzone. Dachbegrünungen sind mit vielen weiteren Synergieeffekten verbunden. Hierzu zählen u.a. Reduktion des Niederschlagsabflusses, Lärmminderung und die Erhöhung der Biodiversität (Pfoser et al. 2013). Die Reichweiten und Wirkungen von intensiver und extensiver Dachbegrünung lassen sich im Leitfaden zur Planung der Hamburger Gründachstrategie[5] nachlesen.

[5] https://www.hamburg.de/contentblob/10603292/c6eb1f159c491cfd8c7188f77b0dd277/data/d-leitfaden-dachbegruenung.pdf

Sollen zusätzlich *Photovoltaikmodule* (PV) installiert werden, wird zum einen der Wirkungsgrad der PV-Systeme um bis zu 3 % pro Jahr (BUE, S. 29) und bis zu 17 % im Sommer (Berliner Regenwasseragentur 2020) gesteigert. Zum anderen kann das Dach nicht mehr als intensiv genutztes Dach mit großen Stauden und Sträuchern ausgeführt werden sondern eher mit kleinwüchsigen Pflanzen, die gut mit Wasser versorgt sind, um auch den Pflegeaufwand (Schnitt) gering zu halten. Am meisten verdunsten Pflanzen, die ihre Spaltöffnungen auch bei Hitze offen lassen können und darüber verdunsten (keine Sedumpflanzen (dickblättrige Gewächse)). Die Pflanzen sind in der Lage die Umgebungstemperatur und damit die Photovoltaikmodule zu kühlen. So reduzieren sie den wärmebedingten Leistungsverlust und erhöhen damit die Effizienz der Anlage (BUE, S. 29; BBSR 2019, S. 191). Dabei ist durch Aufständerung der Module und bewusster Pflanzenwahl darauf zu achten, dass die Dachbegrünung die Module nicht verschattet.

In der Abbildung 28 ist ein gutes Beispiel der Umsetzung der Kombination von Dachbegrünung und Photovoltaikmodulen zu sehen.

Abbildung 28: Gutes Beispiel einer Dachbegrünung mit Photovoltaikelementen in Dresden. (MVI 2012)

Alle Dachbauweisen bis ca. 15° sind für Begrünungen grundsätzlich geeignet. Eine Prüfung der statischen Verhältnisse ist erforderlich. Vor allem für die intensive Begrünung ist eine massive Baukonstruktion unabdingbar. Außerdem muss das Dach wasserdicht sein und gegen Durchwurzelung geschützt werden (FLL 2018). In Abhängigkeit dieser bautechnischen Vorgaben besteht in Leipzig ein vielfältiges Potential für Dachbegrünungen in thermisch belasteten Räumen wie die nachfolgende Karte zeigt. Die entscheidenden Akteure sind die Gebäudeeigentümer, so dass für die Öffentliche Hand für ihre eigenen Liegenschaften eine unmittelbare Umsetzungskompetenz besteht.

Seit dem Herbst 2020 wird der Bau von Gründächern mit einem kommunalen Förderprogramm zur Dachbegrünung in Leipzig unterstützt. Begrünungen in den klimatischen Sanierungsbereichen werden besonders stark gefördert.

Abbildung 29: Gutes Beispiel für die Maßnahme 2 Dachbegrünung, hier die extensive Dachbegrünung auf der Gerda-Taro Schule in Leipzig (Foto: Nadine Zimmer).

In der Maßnahmenkarte sind die Gebäude dargestellt, die im klimatischen Sanierungsbereich liegen und eine Neigung < 15° aufweisen. Auf ihnen sollte eine Dachbegrünung umgesetzt werden, sofern nicht schon eine Begrünung realisiert wurde.

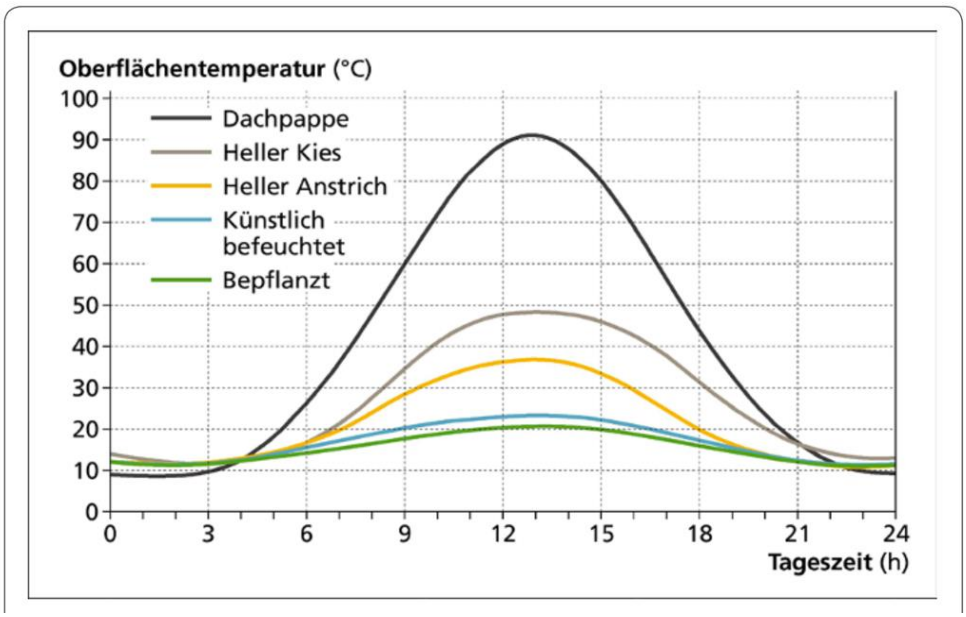


Abbildung 30: Oberflächentemperaturen von Dachabdeckungen mit schwarzer Dachpappe, heller Kiesschüttung, hellem Anstrich und künstlich befeuchteten bzw. bepflanzten Substraten Quelle : Kuttler 2011, S. 5

Die Abbildung 30 zeigt unterschiedliche Oberflächentemperaturen für unterschiedliche Dachmaterialien. Deutlich ist zu sehen, dass ein bepflanztes Dach zu geringen Oberflächentemperaturschwankungen im Tagesverlauf führen. Außerdem weist ein Gründach die geringsten Werte im Vergleich zu anderen Materialien auf.

6.3 M03 - Energetische Gebäudesanierung

Die energetische Gebäudesanierung ist in erster Linie eine Klimaschutzmaßnahme, die durch technische und bauliche Maßnahmen den (Heiz- und Kühl-)Energiebedarf der zu sanierenden Gebäude verringern soll. Allerdings weisen die gängigen Dämmmaterialien auch einen geringeren Wärmedurchgang von außen nach innen auf, so dass im Sommer auch der thermische Komfort im Innenraum verbessert wird. Die Energieeinsparverordnung (EnEV 2013) regelt die einzuhaltende Qualität der Dämmstoffe. Es besteht eine enge Verbindung zu M06 – Erhöhung der Oberflächenalbedo, auch zu Maßnhame M01 – Verschattung von Gebäuden und M02 – Dachbegrünungen weisen dämmende Eigenschaften auf (vgl. 6.1, 6.2 und 6.6).

Das Potenzial der Maßnahme ist für Leipzig groß und wird durch verschiedene Instrumente wie dem INSEK 2030 oder durch die Ausweisung von Klimaquartieren in den Programmgebieten Stadtumbau Ost genutzt. In Alt-Schönefeld und Lindenau/Plagwitz wird seit 2015 ein energetisches Sanierungsmanagement auf Quartiersebene verankert. Sanierungsmöglichkeiten der Gebäudehülle bestehen bei fast allen Flächentypen des Siedlungsraumes (Abbildung 31). Relevante Akteure sind die jeweiligen Eigentümer der Gebäude, aber auch finanzierende Banken spielen eine entscheidende Rolle (z. B. die Kreditanstalt für Wiederaufbau).

Abbildung 31: Empfehlung für Maßnahme 3 „Energetische Gebäudesanierung“, links unsanierte Gebäude auf der Straße des 18. Oktober, rechts energetisch sanierte Gebäude auf der Ferdinand-Rohde-Straße in Leipzig. (Fotos: Hannes Burkhardt)

Die Maßnahmen-Karte zeigt den klimatischen Sanierungsbereich in Leipzig, bei dem eine energetische Gebäudesanierung auch aus Sicht der Klimaanpassung sinnvoll ist. Detaillierte Gebäudeinformationen zum Energetischen Standard der Gebäude liegen der Auswertung nicht vor. U. U. ist die Maßnahme an Einzelobjekten bereits umgesetzt.

6.4 M04 - Potenzialprüfung Entsiegelung

Unter dieser Maßnahme Potenzialprüfung Entsiegelung wird der Austausch von vollständig versiegelten Flächen zugunsten einer Komplettentsiegelung mit anschließender Begrünung oder zugunsten von teilversiegelnden Oberflächenmaterialien (z. B. Rasengittersteine, Fugenpflaster, Sickerpflaster) verstanden (siehe Abbildung 32). Hierzu kann auch der Rückbau von alten Gebäuden und Brachflächen gezählt werden (siehe Abbildung 33). Das Ziel der Maßnahme ist die (teilweise) Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen. Aus klimatischer Sicht sind vor allem die Effekte einer reduzierten Wärmespeicherung sowie einer erhöhten Verdunstungskühlung von Bedeutung.

Entsiegelungsprojekte entsprechen zudem den Zielen des Bodenschutzes, des Hochwasserschutzes sowie eines naturnahen Wasserkreislaufs und unterstützen den Ansatz einer dezentralen Siedlungswasserwirtschaft. Die Maßnahme kann daher als multieffektiv bezeichnet werden. In Leipzig ist sie insbesondere auf Parkplätzen, öffentlichen Plätzen, wenig befahrenen Straßen und teilweise auch Gehwegen (teilversiegelte Materialien wie Sickerpflaster, Fugenpflaster, wassergebundenen Decken), sowie Hinter- und Innenhöfen umsetzbar. Insofern können sowohl die Öffentliche Hand als auch Privatpersonen und die Privatwirtschaft als zentrale Akteure identifiziert werden.

Abbildung 32: Gutes Beispiel: Entsiegelte Fläche in Lüneburg. (Foto: Elke Hipler)

Durch den Rückbau von Gebäuden werden die Bebauungsdichte und das Bauvolumen verringert, wodurch wiederum der Wärmeinseleffekt lokal reduziert wird. Auf frei werdenden Flächen in hochbelasteten Stadträumen ist bei der Nachnutzung die Schaffung klimatischer Entlastungsgebiete vorrangig, z. B. durch neue Pocket Parks. Die geringere Bebauung führt zur Verbesserung der Durchlüftung. Der erhöhte Vegetationsanteil senkt die umgebende Lufttemperatur und es kommt zur Verringerung des Regenwasserabflusses. Die Siedlung gewinnt an Ästhetik und bietet Erholungsmöglichkeiten vor Ort. Es entstehen neue Lebensräume, die im Idealfall mit weiteren vernetzt werden können.

Rückbaumaßnahmen mit anschließender Begrünung sind am konfliktärmsten in Stadtteilen mit Bevölkerungsrückgang zu realisieren. Für Städte wie Leipzig mit einem flächendeckend hochdynamischen Wachstum beschränkt sich das Potential vor allem auf Blockinnenhöfe (z. B. Garagen oder Lagerhallen) oder Industrie- und Gewerbebrachen. Folglich liegt die Verantwortung für die Umsetzung der Maßnahme eher im privaten Bereich, die Öffentliche Hand kann hier aber unterstützend tätig sein (z. B. im Rahmen des Stadtumbaus).

Die Maßnahme wurde anhand eines sehr hohen Versiegelungsgrades der Flächen bei gleichzeitiger hoher thermischer Belastung (Grundlage: klimatischer Sanierungsbereich) in der Stadt Leipzig ausgewiesen. Dabei werden auch die stärker versiegelten Einfamilienhausgebiete und Zeilenbauten mit betrachtet.

Die Maßnahme ist über den gesamten Stadtraum von Leipzig verteilt. Die gesamte Innenstadt ist für diese Maßnahme erfasst, aber auch wiederum das Werksgelände BMW, das Messegelände und das Porschewerk. Viele Flächen entlang der B6 in Eutritzsch und viele Flächen in Plagwitz weisen dabei sogar eine sehr ungünstige Situation auf (= sehr hohe Wärmebelastung, siehe Violettfärbung auf der Karte).

Abbildung 33: Beispiel für eine Brachfläche in der Nähe des Bayrischen Bahnhofes in Leipzig, mit dem Potenzial des Rückbaus der Gebäude und Aufwertung zum Park. (Foto: Hannes Burkhardt)

Die Tabelle 7 gibt wiederum einen Überblick über die Verwendung von anderen Oberflächenmaterialien als Asphalt und zeigt deren Wirkung und Reichweite in Hinblick auf Temperatur- und PET-Reduktionen. Eine komplette Entsiegelung, also Rasen statt Rasengitter oder Pflasterung zum Asphalt erzielt die höchsten Reduzierungen sowohl am Tag als auch in der Nacht.

Tabelle 7: Wirkung und Reichweiten bei dem Wechsel der Versiegelungsmaterialien. Quelle: (Stadt Zürich)

Mögliche Maßnahmen und Ihre Wirkungen	Ø Verbesserung		Verbesserung der maximalen:		Wirkungsbereich in [m]	
	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts
Rasen statt Asphalt	-3,6	-0,4	-6,6	-0,7	2m-4m	2m-3m
Rasen statt Pflasterung	-3,0	-0,9	-5,5	-1,3	2m-4m	2m-3m
Pflasterung statt Asphalt	-2,4	-0,2	-4,1	-0,4	2m-4m	2m-3m
Rasengitter statt Asphalt	-2,2	-0,2	-4,0	-0,4	2m-4m	2m-3m
Rasengitter statt Pflasterung	-1,8	0,0	-3,3	-0,3	2m-4m	2m-3m

6.5 M05 - Durchgrünung

Das Ziel der Maßnahme Durchgrünung liegt in der Verbesserung des Mikroklimas direkt vor Ort. Dabei steht die Verbesserung der Tagsituation durch die Bereitstellung von Schattenflächen im Fokus. Durch die Kombination einer Entsiegelung (M04) mit einer Verschattung von sonnenexponierten Gebäudeseiten (M01) kann auch eine unmittelbare Verbesserung der thermischen Situation im Gebäudeinneren insbesondere auch für die Nachtsituation erreicht werden (Abbildung 34).

In Leipzig bietet sich als erstes der klimatische Sanierungsbereich für die Umsetzung der Maßnahme an. Hierzu können Innen- oder Hinterhöfe entkernt oder entsiegelt werden. Zentrale Akteure bei der Maßnahmenumsetzung sind zum einen Privatpersonen (EigentümerInnen und BewohnerInnen) und die Privatwirtschaft (Wohnungsbaugesellschaften). Wettbewerbe und Förderprogramme können für diese Gruppe aktivierend wirken. Als effektiv haben sich in vielen Städten auch Nachbarschaftsaktionen zur Gestaltung der Hinterhöfe erwiesen (z. B. Urbaner Wald Schönauer Holz). Zum anderen kann die Öffentliche Hand in ihren eigenen Liegenschaften direkt tätig werden.

Abbildung 34: Empfehlung für Maßnahme 5 „Durchgrünung". Beispiel aus Hannover, Oststadt (Foto: Gregor Meusel)

In der Flächenkulisse zur Maßnahmenumsetzung sind gleichzeitig vulnerable und sensible Einrichtungen wie KiTas, Altenheime und Krankenhäuser dargestellt sowie Grundschulen und Betreutes Wohnen. Diese Informationen können dazu genutzt werden, zielgerichtet auch für diese „Wohnformen" qualitätsvolle Aufenthaltsräume unmittelbar im Hinterhof oder auf dem Gelände anzulegen. Treffen vulnerable Einrichtungen mit Flächen zusammen, die für diese Maßnahme ausgewiesen sind, sollte eine prioritäre Umsetzung erfolgen.

Vulnerable Bevölkerungsgruppen wie Kinder oder ältere Menschen haben ein eingeschränktes Thermobefinden und tw. Durstempfinden und sind daher sehr stark von Hitzebelastungen betroffen. Wenn diese vulnerablen Bevölkerungsgruppen bereits in Pflegeeinrichtungen oder Krankenhäusern sind oder die Kinder in der Kindertagesstätte, ist ihr Bewegungsradius auf die unmittelbare Umgebung bzw. den Innenhof mit Garten beschränkt, was einen besonderen Anspruch an dessen Qualität stellt.

Mittlerweile gibt es mehrere Studien zur Wirkung von „Grün" auf die Gesundheit und Psyche, die Kowarik et al. in ihrem Bericht zu den Ökosystemdienstleistungen in der Stadt zusammengefasst und ausgewertet haben. Sie kommen zu dem Ergebnis: die positiven Wirkungen städtischer Grünräume auf die Gesundheit des Menschen sind anhand von bspw. geringerer Schmerzmitteleinnahme und kürzerer Verweildauer im Krankenhaus ersichtlich (Kowarik et al. 2016, S. 117). Die Durchgrünung der Stadt besitzt bereits präventive Wirkung, da sie zur Bewegung an der frischen Luft einlädt, dadurch

Stress reduzieren oder bspw. auch Lärm und Schadstoffbelastung mindern kann (Kowarik et al. 2016).

Viele Pflegeeinrichtungen und Kindertagesstätten haben bereits jetzt ausreichend beschattete Bereiche wie bspw. das Klinikum St. Georg oder die Heliokliniken mit ihren integrierten Parkbereichen im Gelände. Nichtsdestotrotz sind bspw. dennoch Teilbereiche des St. Georg Klinikums für diese Maßnahme vorgeschlagen, da es immer noch hoch versiegelte Bereiche im Krankenhauskomplex gibt.

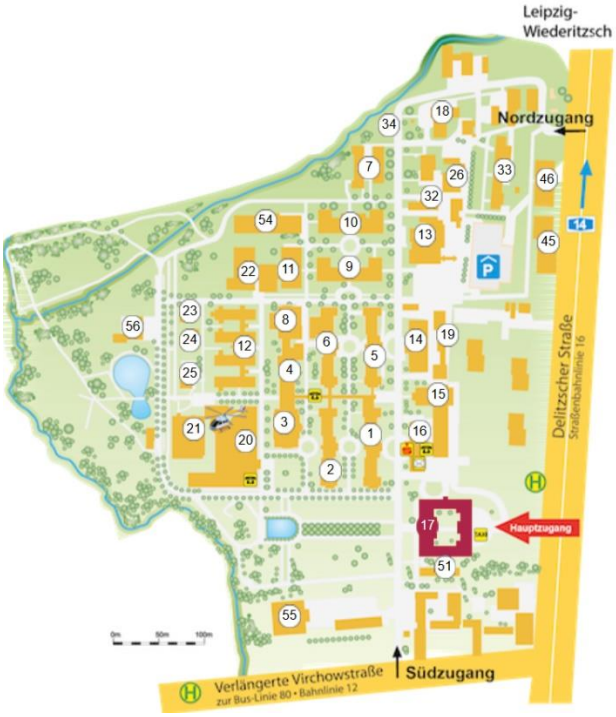


Abbildung 35: Gutes Beispiel für die Maßnahme 5 „Durchgrünung". Lageplan des St. Georg in Leipzig mit gut sichtbarem Parkareal und Baumstandorten. Quelle: https://www.sanktgeorg.de/lageplan/karte.php?standort=1&institut=57

Als Grundlage für die Ausweisung von Flächen, für die diese Maßnahme angewendet werden sollte, dient der klimatische Sanierungsbereich. Stark versiegelte bewohnte Flächen (Wohnblöcke > 50 % und Gewerbe > 80 % Versiegelung) mit wenig Grünvolumen sind in der Maßnahmenkarte dargestellt.

6.6 M06 - Erhöhung der Oberflächen-Albedo

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Ausbildung der urbanen Wärmeinsel ist die Beschaffenheit der städtischen, nicht natürlichen Oberflächen (vor allem Gebäude, Dächer, Straßen). Sie bestimmt die Wärmeleitfähigkeit ins Gebäude (bzw. in den Boden) sowie die Oberflächentemperatur und damit die Lufttemperatur im angrenzenden Außenraum (Kuttler 2013).

Ein Maß für das Rückstrahlvermögen von Oberflächen ist die Albedo. Sie gibt das Verhältnis von einfallender zu reflektierter Strahlung an und wird in Werten von null bis eins angegeben. Eine hohe Albedo hat aus thermischer Perspektive sowohl eine positive Auswirkung auf die Wärmeleitung als auch auf die Lufterwärmung. Je höher also die Albedo der Baumaterialien oder der Fassadenanstriche („cool colors“) ist, desto mehr einfallende Sonnenstrahlung wird von ihnen reflektiert und desto geringer fällt die Erwärmung der Oberfläche und der angrenzenden Luftmassen aus.

Die Maßnahme kann zum einen beim Neubau von Gebäuden und Straßen angewendet werden. Vor allem bei Südfassaden, die der stärksten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, ist ein heller Anstrich empfehlenswert (Abbildung 36). Dachflächen können ebenso mit einem hellen Material oder Anstrich versehen werden (siehe auch 6.2 Maßnahme M02 Dachbegrünung und Wirkung in Abbildung 30).

Das weitaus größere Potenzial besteht allerdings im thermisch belasteten Bestand. Praktisch bei jedem Gebäude und jeder Fläche im Straßenraum kann im Rahmen der Instandhaltung oder Sanierung die Albedo der Fassade, des Daches oder ebenerdig versiegelter Flächen erhöht werden (Abbildung 36). Entsprechend vielfältig sind auch die entscheidenden Akteure.

Abbildung 36: Gutes Beispiel für die Maßnahme 6 „Erhöhung der Oberflächen-Albedo“, hier Tarostraße in Leipzig.(Foto: Hannes Burkhardt)

Die Reduzierung der Lufttemperatur und Wirkung der Maßnahme lässt sich in Tabelle 8 nachlesen, v.a. bezogen auf die Maximalwerte der nächtlichen Lufttemperaturreduktion und der PET-Reduktion am Tag weist die Tabelle 8 eine Wirkung von -1,8 bis -2,8 K (PET) auf.

In der Maßnahmen-Karte ist der klimatische Sanierungsbereich dargestellt, bei dem die Erhöhung der Oberflächenalbedo gezielt vonstattengehen sollte. Eingangs wurde bereits erwähnt, dass diese Maßnahme bei jedem Umbau, Sanierung oder Neubau angewendet werden kann.

Tabelle 8: Wirkung und Reichweite der Maßnahme Erhöhung der Oberflächen-Albedo. Quelle: (Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018)

Mögliche Maßnahmen und ihre Wirkungen	Ø Verbesserung		Verbesserung der maximalen:		Wirkungsbereich in (m)	
	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts
helle Fassade	-1,0	-0,1	-1,8	-0,2	2m-3m	1m-2m
helles Dach	-1,2	-0,1	-2,1	-0,3	2m-4m	1m-2m
Straßenalbedo (Asphalt helle Farbe statt Asphalt)	-1,5	-0,2	-2,8	-0,5	2m-4m	2m-3m

Eine Erhöhung der Albedo kann allerdings auch negative Effekte haben. Die Strahlung wird bei einer hohen Albedo reflektiert und nur noch zu geringen Teilen absorbiert, was dazu führt, dass sich die umgebende Lufttemperatur durch die Strahlungstemperatur erhöht. Da dies auch oftmals der Aufenthaltsbereich von Menschen ist, kann es zu einer Reduktion des thermischen Wohlbefindens führen. Bei der Verwendung von sehr hellen Materialien kann es weiterhin zu einer Blendung der Augen führen (Kruse und Rodríguez Castillejos 2017). Es überwiegt jedoch die positive Wirkung einer hohen Albedo an Häuserfassaden und auf Dächern, auf Plätzen sollte dagegen eine hohe Albedo vermieden werden und eher mittelhelle Materialien / Farben verwendet werden, um das thermische Empfinden der Menschen nicht zu beeinträchtigen. Plätze sollten eher verschattet als mit hellem Belag versehen werden.

6.7 M07 - Schaffung von frei zugänglichen Grünflächen

Frei zugängliche Grünflächen sind beispielsweise Waldgebiete oder öffentliche Parkanlagen, aber auch kleinere Pocket-Parks und Friedhöfe. Es können kleine (manchmal auch gärtnerisch gestaltete) Grün- oder Brachflächen im innerstädtischen Raum sein. Neue, frei zugängliche Grünflächen werden vornehmlich auf ungenutzten oder brachliegenden Flächen oder Baulücken errichtet, so dass die zentralen Akteure von den jeweiligen Besitzverhältnissen abhängig sind. Ihre Ausstattung reicht von einfachen Pflanzenbeeten und Bänken unter Bäumen bis hin zu Gartenkunst mit hochwertiger Gestaltung (Abbildung 38). Die Anlage von zusammenhängenden größeren Grünflächen wie Parkanlagen oder Urbane Wälder in bebauten Stadtquartieren (z.B. GleisGrünZug Bahnhof Plagwitz) ist besonders anzustreben. Sie sind sowohl für den nächtlichen Kaltlufthaushalt als auch für die Erholung vom thermischen Stress am Tage von besonderer Bedeutung. Bei der Neuanlage sollte vor allem auf eine ausreichende Mikroklimavielfalt sowie auf eine Vermeidung von Austauschbarrieren geachtet werden.

Abbildung 37: Brachfläche mit Mikroklimavielfalt am Bayerischen Platz. (Foto: Hannes Burkhardt)

Dominieren auf der Fläche Bäume und/oder offene Wasserflächen, bieten sie an heißen Sommertagen eine lokale Kühlinsel zum Abbau des thermischen Stresses. Ein dichtes Netz aus Parks und Pocket-Parks stellt die Nutzbarkeit durch alle zu jeder Zeit sicher. Sind die Parks so verteilt, dass sie zur Vernetzung größerer Grünflächen beitragen, kann ihre bioklimatische Wirkung verstärkt werden (Stiftung DIE GRÜNE STADT 2010). Darüber hinaus dienen die Anlagen auch einer Verbesserung der Biotopvernetzung.

Die Maßnahme Schaffung oder Erweiterung von frei zugänglichen Grünflächen basiert im ersten Schritt auf der Analyse der Versorgung der Bevölkerung mit Erholungsflächen, worunter öffentliche Park- und Grünanlagen zählen. Dafür erfolgte eine Berechnung der fußläufig (250 m) pro Kopf zur Verfügung stehenden Quadratmeterzahl von öffentlichen Grünflächen pro Block. Als unterversorgt gilt ein Block, der unter 6 m² Grünfläche in 250 m Luftlinienentfernung je EinwohnerIn aufweist. Der zweite Schritt beinhaltete die Analyse der frei zugänglichen Freiflächen wie Waldgebiete, bspw. der Auwald oder auch Friedhöfe. Ein Block gilt als mit Frei- und Grünflächen versorgt, wenn diese frei zugänglichen Grünflächen in 250 m Luftlinienentfernung erreichbar sind. Die übrig gebliebenen mit Grünflächen unterversorgten Blöcke werden mit einem Suchradius für neue Parks und Grünflächen von 250 m Luftlinienentfernung gepuffert. Hier sollten, falls Möglichkeiten bestehen, neue Grünflächen

geschaffen werden. Auf der Karte sind die unterversorgten Blöcke nach der Wärmebelastung am Tag dargestellt und gleichzeitig die vorhandenen Grünflächen (öffentliche Grünflächen, Wald und Friedhöfe) eingeblendet.

Abbildung 38: Empfehlung für Maßnahme 7 "Schaffung von frei zugänglichen Grünflächen", Berlin Rudolph-Wilde-Park. (Foto: Dominika Leßmann)

Im Ergebnis ist ersichtlich, dass der größte Teil des Zentrums von Leipzig, die Südvorstadt, Neuschönefeld, Engelsdorf, Gohlis, Rückmarsdorf und Plagwitz mit frei zugänglichen Grünflächen unterversorgt sind.

6.8 M08 - Förderung stadtgesellschaftlicher sozialer Netzwerke und Projekte

Unter der Förderung stadtgesellschaftlicher sozialer Netzwerke und Projekte werden sämtliche Maßnahmen subsummiert, in denen zwischenmenschliche Beziehungen geknüpft und gefördert werden. Positiver Nebeneffekt ist die Reduktion der Vulnerabilität der QuartiersbewohnerInnen gegenüber thermischem Stress (Kowarik et al. 2016). In Gebieten, wo es bereits Altenheime, betreutes Wohnen sowie KiTas gibt, sollten spezielle Schulungen und Sensibilisierungen der Verantwortlichen hinsichtlich Anpassung an die Hitzebelastung erfolgen. Darunter fällt bspw. ältere Menschen zur Aufnahme von Flüssigkeit während Hitzeperioden zu animieren und tagsüber nur beschattete Bereiche aufzusuchen. Hierzu informieren bspw. das Gesundheitsamt die ÄrztInnen und ApothekerInnen. In Leipzig wurden bereits Trinkbrunnen errichtet (u. a. Kurt-Masur-Straße, Windorfer Straße, Peterstraße, Katharinenstraße und Lindenauer Markt). Auf Gebiete sollte in Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit gerichtet werden, wo es noch keine soziale Infrastruktur gibt, aber ein hoher Anteil an vulnerabler Bevölkerung in hitzebelasteten Blöcken und Quartieren lebt. Für ein Seniorenzentrum in Remscheid wird z.Z. mit Förderung des BMU ein Risikomanagement bei Hitzewellen entwickelt, das in Handlungsleitfäden, -strategien und einer App münden wird (https://www.hap-rs.de/haus-am-park/foerderprojekt-klimaanpassungskonzept.html).

Aus städtebaulicher Sicht kann hierbei allen Projekten im Zusammenhang mit dem Programm der deutschen Städtebauförderung „Soziale Stadt“ bzw. dem öffentlich finanzierten Stadtteil- und Quartiersmanagement ein großes Potenzial zugeschrieben werden. Die Projekte werden in aller Regel unter intensiver Einbeziehung der QuartiersbewohnerInnen und damit der vulnerablen Gruppen durchgeführt. Über diese Projekte können beispielsweise Maßnahmen wie die vom Deutschen Städtetag geforderten „Trinkpatenschaften“ (Deutscher Städtetag 2012), Sensibilisierung von sozialen Einrichtungen der Jugend- und Altenzentren initiiert oder auch „Hitzestuben“ für Obdachlose eingerichtet werden.

Abbildung 39: Beispiele für Urban Gardening Projekte in Leipzig; hier: der Nachbarschaftsgarten in Leutzsch (Quelle: https://www.nachbarschaftsgaerten.de/leutzsch/)

Neben diesen eher top-down initiierten Formen zur Förderung des sozialen Zusammenhalts existieren auch primär bottom-up veranlasste Ansätze. Hierzu zählt u.a. das in Leipzig sehr beliebte Urban Gardening, die gärtnerische Nutzbarmachung oder Attraktivitätssteigerung städtischer Brachflächen, z. B. die Nachbarschaftsgärten in Lindenau und Leutzsch (Abbildung 39). Das gemeinschaftliche Gärtnern kann zum einen direkt dem Stadtklima zugutekommen, z. B. wenn Industrie- oder Gewerbebrachen entsiegelt und umgenutzt werden oder sogar als lokal bedeutsame Kaltluftproduktionsflächen fungieren. Zum anderen bieten die gemeinschaftlichen gärtnerischen Projekte auch Möglichkeiten mit vul-

nerablen QuartiersbewohnerInnen in Kontakt zu kommen und so ggf. Nachbarschaftshilfemodelle zu initiieren.

Persönliche soziale Kontakte werden heute zunehmend durch Begegnungen in digitalen Medien ergänzt. Über soziale Netzwerke, Apps, Spiele etc. kann den StadtbewohnerInnen das Hitzeproblem zum einen anschaulich nahe gebracht werden, zum anderen besitzen diese Instrumente aber auch das Potenzial, NachbarInnen miteinander zu verbinden.

In Leipzig besteht Bedarf an der Förderung stadtgesellschaftlicher sozialer Netzwerke und Projekte insbesondere dort, wo eine hohe thermische Belastungssituation (klimatischer Sanierungsbereich) und ein überdurchschnittlicher Anteil an stadtklimatischen Risikogruppen an der Quartiersbevölkerung vorzufinden sind (siehe Maßnahmen-Karte). Die Karte zur Maßnahme zeigt den bewohnten klimatischen Sanierungsbereich, der eine besonders hohe Bevölkerungsdichte oder eine hohe Anzahl an Personen der vulnerablen Gruppen (Kinder und ältere Menschen) aufweist. Die vulnerablen Einrichtungen sind nachrichtlich auf der Karte dargestellt..

6.9 M09 - Vermeidung von Austauschbarrieren

Durch die Vermeidung von Austauschbarrieren auf Flächen, die für den Kaltlufthaushalt relevant sind, wird sichergestellt, dass die entstehende Kalt- bzw. Frischluft auf den Flächen möglichst ungehindert ausströmen kann. Andernfalls können diese Flächen ihre anvisierte Wirkung nicht oder nur anteilig entfalten. Die Wirkung einer Kaltluftleitbahn ist desto besser je hindernisfreier sie ist.

Austauschbarrieren sollten daher im Einflussbereich von Kaltluftflüssen grundsätzlich vermieden werden. Das gilt für Grün- und Freiflächen als auch für das Eindringen der Kaltluft in den Siedlungskörper.

Die Grün- und Freiflächen produzieren die Kaltluft. Großräumige, gut wasserversorgte und durch flache Vegetation geprägte Freiflächen wie Wiesen, Felder, Kleingartenanlagen und Parklandschaften sind Quellen für Kalt- und Frischluft und bedürfen daher eines besonderen Schutzes. Wälder sind v.a. an Hängen als Kaltluftproduzenten zu verstehen.

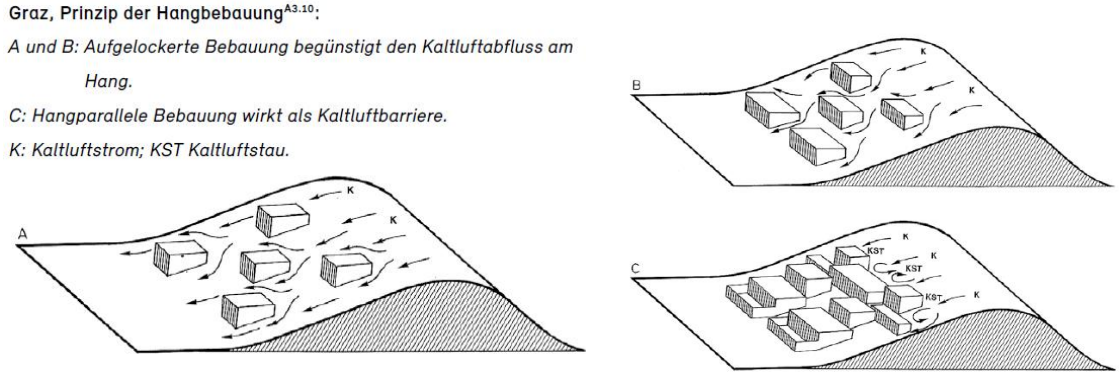


Abbildung 40: Bebauungsvarianten am Hang, bei denen auch die Talströmung nicht behindert wird (links) und Barrieren-Bebauung am Hang (rechts) (Quelle: Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018, S. 35)

Grünland produziert während seiner nächtlichen Abkühlung Kaltluftmengen in der Größenordnung von etwa 2 - 18 m³/m²* h (Abbildung 41), wobei eine hohe Produktionsrate mit über 12 m³/m²*h im Projekt definiert ist. Bei einer Neigung von 1° beginnt die Kaltluft zu fließen oder sie wird aufgrund des bestehendem thermischen Temperaturgradienten zwischen kühleren Grün- und Freiflächen zum bebauten wärmeren Siedlungsraum angesogen (Struktur- und Flurwinde, vgl. Kapitel 3). Hindernisse bremsen den Fluss der Kaltluft ab. Auch Wälder können Kaltluftquellgebiete darstellen, die nächtlichen Abkühlungsraten sind aber geringer als über dem Freiland. Am bewaldeten Hang ist die Katluftproduktion höher und die Kaltluft fließt aus dem Stammraum der Wälder den Hang hinunter. Am Tage sind Wälder in der Lage, auch Kaltluft für angrenzende Siedlungsflächen zu erzeugen. Besonders wirksam für die Abkühlung am Tage sind stadtnahe Wälder an Nord- und Osthängen (MVI 2012).

Auch wenn ihre Wirkung meist überschätzt wird, nehmen neben den großen Kaltluftentstehungsgebieten im städtischen Umland auch größere Grün- und Parkanlagen im innerstädtischen Bereich eine wichtige Funktion für den lokalen Kaltlufthaushalt ein. Für Leipzig sind hier insbesondere der Auwald, der Abtnaundorfer Park, das Rosental und die städtischen Parks wie Clara-Zetkin-, Johanna- oder Lene-Voigt-Park usw. hervorzuheben. Auch stark durchgrünte Siedlungstypen können einen Beitrag zum Kaltlufthaushalt leisten, bspw. dadurch dass neue Kaltluft entsteht oder die Kaltluft weitertransportiert wird und somit die Durchlüftung gewährleistet wird (vgl. Kapitel 3.1).

Abbildung 41: Kaltluftentstehungsgebiete im Leipziger Umland (Fotos: Hannes Burkhardt)

Relativ dicht aneinander stehende und vor allem hohe Hindernisse verursachen örtliche Turbulenzen beim Fließen der kalten Luft. Dieser Effekt führt zwar lokal zu einer Durchmischung der Luftmassen und somit ggf. zur Verdünnung der Luftschadstoffe, aber er führt auch zum Abbremsen des Lufttransports und erschwert so die Belüftung der ferner liegenden Bebauung. Bei Barrieren handelt es sich um quer zur Fließrichtung der Kaltluft verlaufende natürliche (z. B. Baumgruppen) oder bauliche Hindernisse (z. B. Bahndämme, Gebäude). In Einzelfällen kann eine vorhandene oder absichtlich errichtetet Barriere auch der Umleitung von Kaltluft dienen und dadurch die Durchlüftung einer Siedlung verbessern. Über Grünflächen und rauigkeitsarmen Strukturen wie Wiesen, Flüssen/Gewässer aber auch Straßen wird kalte Luft weitertransportiert.

Abbildung 42: Maßnahme 9 „Vermeidung von Austauschbarrieren“, hier der Friedenspark, der einen flächenhaften Kaltluftabfluss im Prozessraum Prager Straße in Reudnitz aufweist.(Foto: Hannes Burkhardt)

Mit Blick auf die dynamische Leipziger Stadtentwicklung ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass nicht jede Bebauung im Randbereich oder Übergangsbereich einer Grün-/Freifläche auch gleichzeitig ein relevantes Austauschhindernis darstellen muss. Generell sollte versucht werden, eine Bebauung in der primären Leitbahn und ihren dazugehörigen Quellgebieten zu vermeiden. Falls doch gebaut werden soll, sollte, sofern keine anderen gewichtigen Gründe dagegensprechen, gewährleistet werden,

dass die Gebäude parallel zur Fließrichtung der Kaltluft angeordnet sind sowie ausreichend (grüne) Freifläche zwischen ihnen erhalten bleibt (Abbildung 40). Durch auf die individuelle Situation abgestimmten Gebäudeausrichtungen und Bebauungsdichten lassen sich also Kompromisse finden, sofern klimaökologische Belange möglichst frühzeitig in die Planung einbezogen werden. Die Bauberatung und die verbindliche Bauleitplanung bieten hierfür entsprechende Mechanismen an. Nichtsdestotrotz gilt für alle Flächen mit einem relevanten Beitrag zum Leipziger Luftaustauschsystem, dass Austauschbarrieren möglichst vermieden werden sollten. Die raumkonkreten Hinweise sollten daher bereits auch auf der Ebene der Flächennutzungsplanung besonders beachtet werden.

Die hier für die Maßnahme ausgewählten Grün- und Freiflächen liegen alle in den 11 identifizierten Kaltluftprozessräumen (siehe Kapitel 3), die eine Wirkung für die Stadt Leipzig entfalten. Die Grünflächen sind auf die Gebiete, die zur Kaltluftentstehung beitragen, in einer primären Leitbahn liegen, die zum flächenhaften Kaltluftabfluss gehören oder einen Entwicklungsschwerpunkt darstellen, beschränkt. Als Siedlungsbereich sind die Blöcke dargestellt, die ebenfalls innerhalb einer primären Leitbahn, im flächenhaften Kaltluftabfluss liegen oder zum Einwirkbereich der Kaltluft in die Bebauung zählen. Straßen, die im Einwirkbereich der Kaltluft oder im flächenhaften Kaltluftabfluss liegen, sind auf der Maßnahmenkarte gesondert herausgestellt, da sie zum Kaltlufttransport beitragen. Im ausgewiesenen Siedlungs- und Straßenraum auf der maßnahmen-Karte sollte unbedingt auf den Erhalt der Durchlüftung geachtet werden und somit bei Neubebauungen die Baukörperstellung angepasst werden.

6.10 M10 - Verschattung von Straßen, öffentlichen Plätzen, Gehwegen und Parkplätzen

Straßen, (Geh- und Fahrrad-)Wege sowie Stadtplätze sind der zentrale öffentliche Aufenthaltsbereich der Stadtbevölkerung und der TouristInnen im Außenraum. Die Flächen werden entweder zum längeren Aufenthalt aufgesucht (z. B. Markt in der Innenstadt) oder aber als Weg genutzt, um ein Ziel zu erreichen (z. B. Arbeits- oder Einkaufsweg, Sightseeing, oder auch Grün-/Freiflächen zur Erholung, siehe bspw. Abbildung 43 und Abbildung 45). Mit Blick auf den Klimawandel (häufigere und intensivere Hitzeperioden), den demographischen Wandel (höherer Anteil an hitzesensiblen Bevölkerungsgruppen), den zunehmenden Fußgänger- und Fahrradverkehr sowie die weiter steigenden TouristInnenzahlen sollte einer nicht gesundheitlich belastenden thermischen Situation auf diesen Flächen besondere Beachtung geschenkt werden. Die gezielte Verschattung stellt eine zentrale Maßnahme zur Verringerung der thermischen Belastung durch die direkte Sonneneinstrahlung am Tage dar.

Die zumeist ungehinderte Einstrahlung führt tagsüber zu einer hohen Wärmebelastung direkt auf den ebenerdig versiegelten Flächen. Für waagerechte Bodenoberflächen ist der Zeitpunkt der größten Sonneneinstrahlung der Sonnenhöchststand zur Mittagszeit.

Abbildung 43: Gutes Beispiel: Begrünte Einkaufsstraße in Frankfurt Main (Foto: Dominika Leßmann)

Die Verschattung erfolgt im öffentlichen Raum oder Straßenraum mit Bäumen und Sträuchern, wird jedoch auch ergänzt durch Gebäudeanbauten (z. B. Markisen in Fußgängerzonen) oder Kleinbauten (z. B. Wartehäuschen an ÖPNV-Haltestellen). Perspektivisch ist mit einem großflächigeren Einsatz künstlicher Materialien zu rechnen wie z. B. Sonnensegel.

Abbildung 44: Gutes Beispiel für Maßnahme 10 „Verschattung von Straßen, öffentlichen Plätzen, Gehwegen und Parkplätzen". Beispiel aus Leipzig Tarostraße/Straße des 18. Oktober, Parkplatz (Foto: Hannes Burkhardt)

Die beschatteten Straßen/Gehwege, Plätze und Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten (siehe Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden. Bei verschatteten Parkplätzen wird zusätzlich die Wärmeemission der an- und abfahrenden Kraftfahrzeuge durch Verschattung und Verdunstungskühlung kompensiert und auch der Aufheizung der PKW-Innenräume wird vorgebeugt. Alternativ oder ergänzend können Überdachungen, Sonnensegel oder ähnliche Schatten liefernde Bauten eingesetzt werden. Aufgrund der fehlenden Verdunstung, ist ihre Wirkung im Vergleich zur Bepflanzung jedoch herabgesetzt. Darüber hinaus übernehmen Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Durch die Begrünung wird das Gelände ästhetisch aufgewertet.

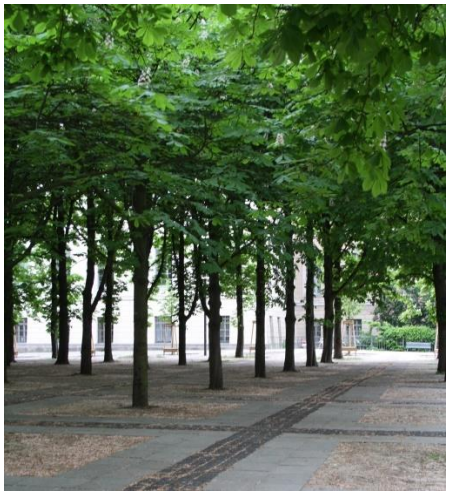
Abbildung 45: Gutes Beispiel für eine Begrünung am Gehweg, Beispiel aus Kroatien (Foto: Constanze Berbig)

Die Umsetzung der Maßnahme kann beim Errichten von neuen Plätzen, Parkplätzen, Straßen und beim Stadtumbau erfolgen. Beim Pflanzen der Bäume und Aufstellen von Sonnensegeln etc. muss auf die Verkehrssicherheit geachtet werden. Es muss genügend Platz und gute Sichtbarkeit für die Ein-

parkmanöver vorhanden sein. Je nach Besitzverhältnissen können entweder die Öffentliche Hand, Unternehmen oder Privatpersonen die zentralen Akteure darstellen.

Bei der Umsetzung der Maßnahme sollte darauf geachtet werden, dass der vertikale Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Luftleitbahnen dürfen Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und sollten möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (siehe auch M09, Abschnitt 6.9).

Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (Klima-Arten-Matrix von Roloff et al. 2008) Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen aufweisen, die zur Bildung von Ozon beitragen (Abbildung 46).



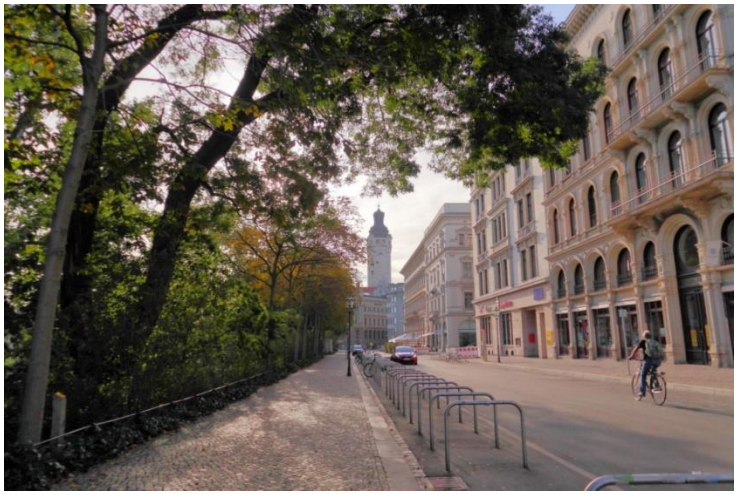


Abbildung 46: Gute Beispiele: Baumpflanzungen auf öffentlichem Platz links (ohne Ortsangabe) und im öffentlichen Raum entlang eines Gehweges rechts (Schillerstraße), (Fotos: links Björn Büter, rechts Hannes Burkhardt)

Der Effekt und die Auswirkung von verschattenden Maßnahmen ist in der Tabelle 9 zu finden. Für die Aufenthaltsqualität am Tag und die Auskühlung in der Nacht hat ein Baum über entsiegeltem Boden die größte Wirkung, auch in seiner Kühlungswirkung für die unmittelbare Umgebung erreicht er die größte Reichweite.

Tabelle 9: Auswirkungen von verschattenden Maßnahmen für die Tag- und Nachtsituation. Quelle: (Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018; Stadt Zürich)

Mögliche Maßnahmen und Ihre Wirkungen	Ø Verbesserung		Verbesserung der maximalen:		Wirkungsbereich in (m)	
	PET am Tag	Lufttem-peratur nachts	PET am Tag	Lufttem-peratur nachts	PET am Tag	Luft-tempe-ratur nachts
Baum auf Asphalt	-2,3	-0,2	-4,5	-0,5	7m-20m	2m-3m
Baum auf Rasen	-4,2	-0,6	-8,7	-1,2	7m-20m	2m-5m
Pergola auf Asphalt	-3,7	-0,3	-6,0	-0,8	2m-3m	2m-3m

Für die Empfehlung dieser Maßnahme in Leipzig wurden als erstes die Flächen betrachtet, die als *öffentliche Plätze und Parkplätze* im ALKIS, ATKIS und weiteren Datenquellen ausgewiesen sind. Diese Flächenkategorien werden auf die Bezugsgeometrie der Klimaanalyse übertragen und Flächen mit einer starken Wärmebelastung (PET > 35°C) ausgewählt. Diese ausgewählten Flächen sind der Maßnahme als öffentliche Plätzen und Parkplätze zugeordnet.

Für die *Straßenabschnitte* wurde eine Analyse des bereits vorhandenen Baumbestandes durchgeführt und Abschnitte herausgefiltert, die wenige Bäume bei gleichzeitiger starker Wärmebelastung aufweisen.

Stark versiegelte Parkplätze sind in Leipzig vielerorts anzutreffen, bspw. an der Arena, östlich des Hauptbahnhofes, südlich des Ringes am Wilhelm-Leuschner-Platz oder auch der Parkplatz am Völkerschlachtdenkmal (An der Tabaksmühle) sowie das BMW-, Messe- und Porsche-Areal, so dass ihre Begrünung und Verschattung auf thermisch belasteten Teilflächen empfohlen wird. Im Siedlungsraum sind u.a. Parkplätze in Blockinnenhöfen (auch Maßnahme M05, Abschnitt 6.5) oder als Bestandteil von großen Gewerbebauten von Bedeutung. Parkraum als Bestandteil öffentlicher Straßen und Plätze zählen ebenso hinzu (Abbildung 44 und Abbildung 46).

In Leipzig befinden sich die Straßen, die durch die Maßnahme eine Reduzierung der Hitzebelastung erfahren würden, über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Viele Plätze der Innenstadt und u.a. der Augustusplatz könnten davon profitieren.

6.11 M11 - Reduzierung der Mehrfachbelastung

Die über das Luftaustauschsystem einer Stadt bereitgestellten Luftvolumina sind im Regelfall frisch und sauber. Erst durch die Beimengungen aus dem Verkehr, den industriellen Abgasen und dem winterlichen Hausbrand kommt es zu einer Verunreinigung der Luft mit Schadstoffen wie CO, NOx, O_3, SO_2, VOC (Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Verbindungen), Ruß und Feinstaub. Dies kann zum Smog in der Stadt führen. Die Luftschadstoffe unterliegen dann der Transmission (Umwandlung/chemische Reaktion) in der Atmosphäre. Je nach Wetterlage kommt es zur Anreicherung, Verdünnung oder Ablagerung (Kuttler 2013). Wind kann diese Luftschadstoffe verdünnen, indem die Schadstoffe abtransportiert und damit weiter verteilt werden. Bei einer eher windstillen Wetterlage, wie der autochthonen Wetterlage verbleiben die Luftschadstoffe länger an Ort und Stelle aufgrund der Schwachwindsituation. Außerdem wirkt die in der Nacht entstandene Bodeninversion bei autochthonen Wetterlagen bis in die Morgenstunden, so dass erst nach Auflösung der Bodeninversion die Schadstoffe abtransportiert werden. Eine schlechte Luftqualität führt zu Belastungen der Atemwege der Menschen. Tritt dann gleichzeitig eine thermische Belastung auf, kommt es zu einer Mehrfachbelastung.

Auch Kaltluft kann mit Luftschadstoffen belastet sein. Jedoch stammen diese eher weniger aus dem Verkehr, da zwischen 2 und 4 Uhr morgens ein Verkehrsminimum und damit ein Minimum der Emissionen erreicht wird. Lufthygienische Verunreinigungen in der Nacht stammen eher von Industrieanlagen oder dem winterlichen Hausbrand. Daher konzentriert sich diese Maßnahme auf die Tagsituation und gleicht die Luftqualität der Straßen mit der thermischen Belastung ab.

Kraftfahrzeuge erzeugen durch die wenig effiziente Kraftstoffverbrennung nutzlose Abwärme (67% Abwärme, 33% Bewegungsenergie) (Allen et al. 2011; Sailor 2011), die in Leipzig vor allem in viel befahrenen Straßenabschnitten und stark frequentierten Industrie- und Gewerbegebieten zu einer zusätzlichen Aufheizung der Stadtatmosphäre beitragen kann. Insbesondere auf diesen Flächen besitzt die Maßnahme daher eine besondere Relevanz. Die höchsten Abwärmeabgaben sind dabei an die täglichen Hauptverkehrszeiten gekoppelt. Diese variieren dabei über den Tagesverlauf, Spitzen am Morgen und am späten Nachmittag sind zu beobachten (Rush hour), die Variation zwischen den Jahreszeiten in den Hauptverkehrszeiten ist nicht ersichtlich.

Untersuchungen aus London zeigen, dass der Effekt der Temperaturerhöhung durch KfZ der Größenordnung der Nettostrahlungsbilanz an einem Sommertag entspricht und somit in Großstädten einen erheblichen Beitrag zur Ausbildung der städtischen Wärmeinsel haben kann. Das primäre Ziel der Maßnahme ist daher die Minderung der Wärmebelastung durch eine nachhaltige Reduktion der anthropogenen Wärmeemissionen aus dem Individualverkehr und dem öffentlichen Personennahverkehr.

Eine Reduzierung der Mehrfachbelastung durch KfZ-Verkehr kann beispielsweise durch eine Förderung des Umweltverbundes, durch Verkehrsberuhigungen, Umleitung von Verkehrsströmen oder Tempolimits und einer zunehmenden Elektrifizierung des KfZ-Verkehrs erreicht werden. Eine Verkehrsvermeidung ist noch effektiver. Straßenbegleitgrün und Fassadenbegrünung können durch ihre Staubfilterfunktion die lufthygienische Situation in den Straßenräumen verbessern, sowie die thermische Belastung reduzieren ohne die Strömungsgeschwindigkeit nachteilig zu beeinflussen. Diese nicht abschließende Aufzählung macht deutlich, dass die Maßnahme vielfältige Synergieeffekte mit der Luftreinhaltung aufweist. Zentrale Umsetzungsinstrumente sind die Mobilitätsstrategie der Stadt Leipzig, der Nahverkehrsplan, der Stadtentwicklungsplan Verkehr und öffentlicher Raum, sowie der Luftreinhalteplan. Die öffentliche Hand ist daher zentrale Akteurin.

Darüber hinaus können gemäß BauGB im Bebauungsplan Flächen festgesetzt werden, in denen bestimmte luftverunreinigende Stoffe nicht oder nur beschränkt verwendet werden können. Diese als „Verbrennungsverbot“ für fossile Brennstoffe bekannte Festsetzung erfordert zwar eine städtebauliche Begründung, die durch die damit verbundene starke Luftverschmutzung aber gegeben ist (MVI 2012).

In der Maßnahmenkarte sind v.a. die Straßenabschnitte dargestellt, die durch eine hohe Frequentierung von Kraftfahrzeugen charakterisiert sind, also eine hohe durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) aufweisen und dementsprechend eine erhöhte Wärmeemission erfahren. Es ist allerdings zu beachten, dass die morgendliche Hauptverkehrszeit nicht mit dem Zeitpunkt der stärksten Ausprägung der Kaltluftbewegungen um 4 Uhr übereinstimmt und die nachmittägliche Zeit der Verkehrsspitze

nicht mit der maximalen PET um 14 Uhr zusammenfällt. Nichtsdestotrotz kann die Verschneidung der höchsten thermischen Belastung am Tag mit den DTV Werten (Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken) Straßenabschnitte identifizieren, die eine zusätzliche starke Erwärmung durch den KfZ Verkehr erfahren.

Die übermittelten DTV Werte belaufen sich auf bis zu über 50.000 Fahrzeuge pro Tag an einzelnen Straßenabschnitten. Die Fortschreibung des Luftreinhalteplans benennt in den Maßnahmen A1 bis A5 die konkrete Reduktion von Verkehrsmengen für bestimmte Straßenabschnitte wie bspw. die Jahnallee, Eutritzscher Straße oder Berliner Straße, um dort die Grenzwertüberschreitungen für den Jahresmittelwert von NO_2 und/oder PM_{10} zu reduzieren (Stadt Leipzig 2019, S. 69–73). Eine stark befahrene Straße wird daher für diese Untersuchung mit > 15.000 Fahrzeugen pro Tag definiert. Für die Ausweisung der betroffenen Straßenabschnitte wird eine Kombination aus stark befahrener Straße und dem erhöhten Handlungsbedarf auf der Grundlage der Bewertung des Luftqualitätsindexes durchgeführt. Der Luftqualtitätsindex wurde von der Stadt Leipzig übermittelt und stellt einen Langzeitluftqualitätsindex[6] dar. Die Maßnahme wird einerseits ab einem *erhöhten Handlungsbedarf* (LQI > 1,6) in Kombination mit einer stark befahrenen Straße empfohlen. Andererseits empfiehlt sich die Umsetzung dieser Maßnahme mit einem *erhöhten Handlungsbedarf* und angrenzenden Wohnblöcken, die eine *ungünstige* und *sehr ungünstige Situation* aufweisen. Somit macht die Maßnahme auf die Mehrfachbelastung durch Luftschadstoffe und Hitze aufmerksam.

Die Maßnahme wird vor allem für Teile des Innenstadtringes und Straßenabschnitte östlich und westlich des Hauptbahnhofes ausgewiesen. Aber auch in Plagwitz auf der Antonienstraße, der B87 in Lindenau oder der Eisenbahnstraße in der Neustadt würde die Maßnahme zu einer deutlichen Verbesserung der Hitzereduktion im unmittelbar angrenzenden Straßenraum und/oder Wohnblock führen.

[6] Der Langzeitluftqualitätsindex beinhaltet die Bewertung mehrerer Luftschadstoffe: PM10 und NO2. Dabei wurde ein Quotient aus dem straßenabschnittsbezogenen Modellwert jeder Größe mit den Grenzwerten (NO2: 40 µg/m³, PM10: 30µg/m³) gebildet und nach CDI 3787, Blatt 3 klassifiziert.

6.12 M12 - Begrünung von Gleistrassen

Straßenräume mit separaten Tramgleisen können durch Entsiegelung und Begrünung der Gleistrassen bioklimatisch aufgewertet werden (Abbildung 47). Die Verantwortlichkeit hierfür liegt bei der Öffentlichen Hand und den Leipziger Verkehrsbetrieben (LVB). Für die Gleisbegrünung eignet sich niedrige Vegetation wie Rasen oder Sedum. Die verschiedenen Ausführungsvarianten hängen auch von bautechnischen Aspekten ab. Ausführliche Informationen liefert das Handbuch Gleisbegrünung (Kappis 2014).

Während ein mit dunklem Schotter bedeckter Gleiskörper im Sommer Oberflächentemperaturen von mehr als 50°C aufweist, wärmt sich die Vegetation nur auf etwa 25-30°C auf. Die Lufttemperatur im näheren Umfeld wird durch die Transpirationskühlung der Begrünung gesenkt. Besonders effektiv sind großflächige Begrünungen auf langen Strecken (Schreiter und Kappis 2012).

Auch die lufthygienische Situation vor Ort verbessert sich dank der Gleisvegetation. Sie bietet ein Potenzial zur Deposition und Bindung von Feinstaub aus den Abriebprozessen der Bahnräder und aus dem benachbarten Verkehr. Bei hochliegenden Vegetationssystemen, bei denen die Schienen größtenteils eingebettet sind, wirkt die Begrünung lärmmindernd. Grüne Gleise verbessern deutlich die Ästhetik der Straßen. Die optische Aufwertung hat einen positiven Einfluss auf das psychische Wohlbefinden der StraßenbahnfahrerInnen und der BewohnerInnen (Schreiter und Kappis 2012).

Abbildung 47: Gutes Beispiel für die Maßnahme M12 „Begrünung von Gleistrassen“, hier die Karl-Liebknecht Straße in Leipzig, (Foto: Constanze Berbig).

In Leipzig sind die Gleistrassen oftmals auf der Straße verlegt und besitzen teilweise ein eigenes Gleisbett, wie die Abbildung 47 zeigt (hier sogar schon begrünt). Die Maßnahme ist für alle Straßenabschnitte mit Straßenbahngleisen im Bestand ausgewiesen, die eine hohe thermische Belastung am Tag vorweisen und noch nicht begrünt sind. Eine Eignungsprüfung hinsichtlich der Straßenraumaufteilung und möglicherweise notwendigen Befahrung der Gleise durch Kraftfahrzeuge konnte zum derzeitigen Zeitpunkt nicht erfolgen. Beim Neubau einer Trasse sollte immer die Möglichkeit einer eigenen Trasse mit begrüntem Gleiskörper geprüft werden. Trotz guter Beispiele besteht in Leipzig noch ein

großes Potential auf thermisch belasteten Straßenabschnitten (siehe nachfolgende Karte) Trassen zu begrünen.

An Stellen wo Versickerung aus wasserwirtschaftlicher Sicht gewünscht ist (keine zu hohen Grundwasserstände, versickerungsfähiger Boden), kann die Gleisbegrünung zur Reduktion des Regenwasserabflusses beitragen. Großflächige Gleisbegrünung bewirkt einen guten Wasserrückhalt selbst bei starken Niederschlägen. Im Durchschnitt werden in den Sommermonaten ca. 90% der Niederschlagsmenge im Gleissubstrat gehalten (Henze, H. J., Siemsen, M. 2003). Sind begrünte Gleise an das kommunale Abwassernetz angeschlossen, so fließen nach einer Regenwasserspitze erst später und viel kleinere Mengen an Abwasser in die Kanalisation, als im Falle nicht begrünter Gleise. Zusätzlich ist das Abwasser sauberer, da es durch das Begrünungssystem gefiltert wird (Kappis 2014).

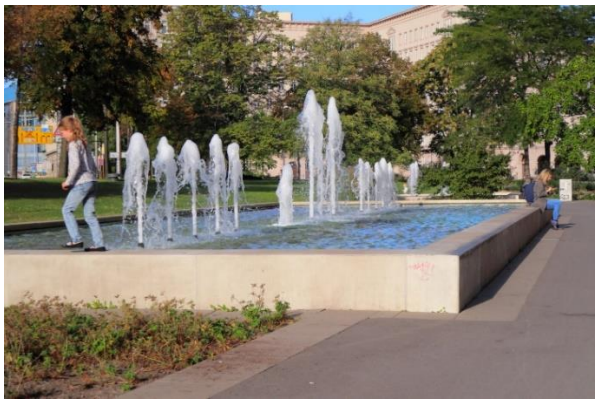
6.13 M13 - Bewegte Wasserflächen im öffentlichen Raum schaffen

Offene Wasserflächen weisen eine positive Wirkung auf die thermische Situation auf.

Dies gilt insbesondere für die Tagsituation. Hier findet Verdunstung statt, die Energie aus der umgebenden Luft benötigt und diese abkühlt („Verdunstungskühlung“). Je größer die Wasseroberfläche, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Bewegtes Wasser erzielt eine stärkere kühlende Wirkung als stehendes Gewässer, da die verdunstungsfähige Oberfläche bei der Bewegung vergrößert wird (Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018; MUNLV 2011). In Sommernächten verbessern Wasserflächen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität hingegen nicht den thermischen Komfort. Während langer Wärmeperioden können sie in den Nachtstunden sogar wärmer werden als die umgebende Luft und somit deren Abkühlung verringern (Kuttler 2013).

Leipzig hat bereits viel mit der Offenlegung der Fließgewässer oder Anlage von Kanälen in der Stadt getan, gute Beispiele sind die Verbindung zwischen dem Lindenauer Hafen und der Weißen Elster über den Karl-Heine-Kanal im Westen der Stadt und die teilweisen Offenlegungen des Pleiße-Mühlgrabens und Elster-Mühlgrabens. Diese verlaufen teilweise in zwar nach oben hin offenen aber ansonsten betonierten tiefen Rinnen (siehe Ranstädter Steinweg, Simsonplatz). Neben den zahlreichen Fließgewässern in Leipzig trägt auch die Anlage von bewegtem Wasser auf den öffentlichen Plätzen v.a. am Tage zur Erhöhung der Aufenthaltsqualität stark bei. Ausführungsbeispiele für die Maßnahme sind Brunnen, Wasserspielplätze, künstliche Wasserfälle oder Teiche. V. a. Springbrunnen und Wasserspiele sind zu berücksichtigen wie bspw. Abbildung 48 zeigt. Begehbare Wasserspielplätze kühlen nicht nur die Luft, sondern bieten auch aktive Abkühlung für Groß und Klein.

Ein Potential zur Umsetzung besteht vor allem auf thermisch belasteten Flächen des Öffentlichen Raumes, so dass die Öffentliche Hand (ggf. in private public partnerships) die entscheidende Akteurin zur Umsetzung der Maßnahme darstellt (Abbildung 48).



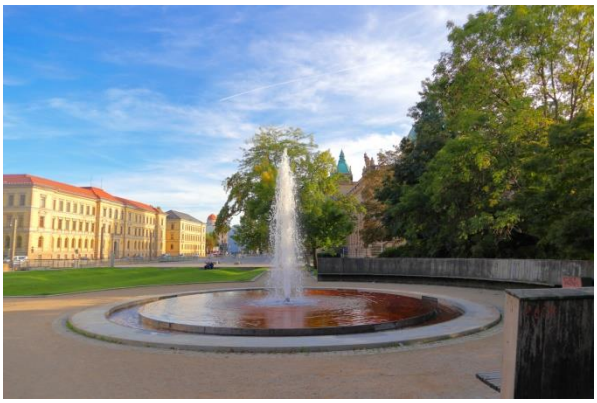


Abbildung 48: Gutes Beispiel für Maßnahme 13 „Bewegte Wasserflächen im öffentlichen Raum schaffen“, links Springbrunnenanlage vor dem Ringcafé und rechts am Bundesverwaltungsgericht (Fotos: Hannes Burkhardt)

Die Tabelle 10 stellt die Reduktion und Reichweite der Maßnahme für die Tag- und Nachtsituation dar. V.a. für die maximale PET Belastung am Tag kann eine Wirkung von bis zu -7,6 °C erreicht werden.

Tabelle 10: Wirkung und Reichweite der Maßnahme Anlage von bewegten Wasserflächen schaffen. Quelle: (Stadt Zürich)(Stadt Zürich)

Mögliche Maßnahmen und Ihre Wirkungen	Ø Verbesserung		Verbesserung der maximalen:		Wirkungsbereich in (m)	
	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts	PET am Tag	Lufttemperatur nachts
Wasserfläche statt Rasen	-5,6	-0,3	-7,6	-1,2	3m-6m	2m-4m

Die Karte stellt die öffentlichen Plätze in Leipzig mit einer starken Hitzebelastung am Tag über 35°C PET dar. Gleichzeitig sind vorhandene Brunnenstandorte und Trinkwasserbrunnen in der Karte vermerkt. Dabei werden die Brunnen unterschieden ob sie in Betrieb oder außer Betrieb sind. Die Maßnahme wird für öffentliche Plätze empfohlen, die keinen Brunnen auf der Fläche selbst oder in 50m Entfernung aufweisen und gleichzeitig eine starke Wärmebelastung von 35 °C PET aufweisen.

6.14 M14 - Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt in Grünflächen

Damit innerstädtische Grün- und Freiflächen ihr Potenzial an klimaökologischen Dienstleistungen sowohl für die Tag- als auch für die Nachtsituation umfänglich ausschöpfen können, sollten sie möglichst vielfältige Mikroklimate bereitstellen. Als Leitbild kann die Grünflächengestaltung nach dem „Savannentyp“ (Kuttler 2013, 271) dienen, die zu einem großen Anteil aus gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z. B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) besteht. Die Übergangsbereiche zur angrenzenden Bebauung sollten offen gestaltet sein. Die Grün- und Freiflächen tragen zur nächtlichen Kaltluftproduktion bei und gewährleisten deren Abfluss und damit Belüftung von angrenzenden Wohnblöcken. Weiterhin sind mikroklimatisch vielfältige Grün- und Freiflächen für den Aufenthalt am Tage für alle Ziel- und Risikogruppen optimiert (Abbildung 49).

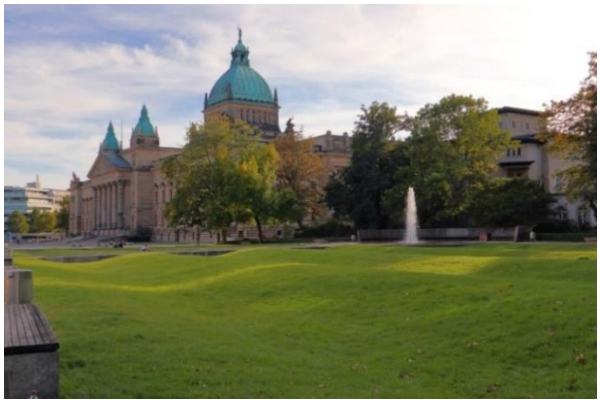


Abbildung 49: Gute Beispiele für die Maßnahme 14 „Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt in Grünflächen“, links Friedenspark und rechts Grünfläche am Bundesverwaltungsgericht in Leipzig (Fotos: Hannes Burkhardt)

6.15 M15 - Schutz bestehender großflächiger Parks

Großflächige Park- und Grünanlagen sind nicht nur aufgrund ihrer Bedeutung für den Kaltlufthaushalt besonders schützenswert (vgl. Kapitel 3), sondern auch, weil sie wichtige Erholungsflächen darstellen, die von den StadtbewohnerInnen inklusive der klimasensiblen Bevölkerungsgruppen am Tage gezielt aufgesucht werden (Abbildung 50). Angesichts der prognostizierten Zunahme an Sommertagen und Hitzeperioden ist zukünftig von einer stärkeren Nutzung und somit Inanspruchnahme der Grünflächen auszugehen (siehe Kapitel 2.2.2). Der Klimawandel führt gleichzeitig zu mehr sommerlichen Hitze- und Trockenstress in den Park- und Grünanlagen. Die großen Flächen bieten neben der Reduzierung der Hitzebelastung am Tag auch Schutz vor Lärmimmissionen und dienen dem Regenwasserrückhalt. Eine besondere Rolle nehmen in diesem Zusammenhang städtische Wälder ein (siehe auch M16 Kapitel 6.16).

Aufgrund der ansässigen Wohnbevölkerung sind die einschlägig bekannten Park- und Grünanlagen im unmittelbaren Bereich der Siedlungsflächen (Wohnblöcken) besonders schützenswert (Abbildung 50). Über den Landschaftsplan, den Flächennutzungsplan und den Lärmaktionsplan kann und wird der besonderen Schutzwürdigkeit dieser Flächen Rechnung getragen.

Abbildung 50: Empfehlung für Maßnahme 15 „Schutz bestehender großflächiger Parks / Grünflächen“, hier Lenné-Anlage hinter der Moritzbastei. (Foto: Hannes Burkhardt)

6.16 M16 - Schutz von Waldflächen

Wälder gehören zu den besonders schützenswerten Biotopen. Die Waldfunktionen reichen von der CO_2 Deposition über den Arten- und Biotopschutz sowie die Grundwasserneubildung und den Bodenschutz bis hin zur Quelle für nachhaltige Rohstoffe und Energie.

Auch wenn ihr nächtliches Kaltluftliefervermögen im Vergleich zum Freiland weniger stark ausgeprägt ist, sind Waldflächen dennoch elementarer Bestandteil des Luftaustauschsystems (vgl. Kapitel 3). Der Energieumsatz erfolgt zu einem großen Teil an den Grenzflächen zwischen dem weitgehend geschlossenen Kronendach und den darüber liegenden Luftschichten. Kaltluft entsteht also über dem Kronendach und sinkt dann aufgrund ihrer höheren Dichte und damit Schwere in den Stammraum ein. Tagsüber verschattet der Wald den Erdboden und die Erwärmung ist daher gegenüber dem Freiland verringert, was im Vergleich zu einem angenehmeren Bioklima führt. Kühlere Luft kann auch tagsüber aus den Wäldern in die unmittelbare Umgebung abfließen.

Der gleiche Effekt führt nachts dazu, dass die bodennahen Luftschichten sich nicht so schnell abkühlen. Hieraus resultieren im Vergleich zum Offenland geringere Kaltluftvolumina im Stammraum, deren Ausströmen durch die Kraut- und Strauchschicht zusätzlich behindert wird, wenn es nicht durch Hangneigungen von > 1° zu Kaltluftabflüssen kommt. Besonders wirksam sind daher stadtnahe Wälder an Nord- und Osthängen (Gross 1989, 1993). Neben diesen beiden thermischen Effekten, erfüllen Stadtwälder durch ihre große Oberfläche auch eine wichtige Filterfunktion für Luftschadstoffe (MVI 2012).

Der Leipziger Auwald wird durch den Schutzstatus des Landschaftsschutzgebietes. tw. Naturschutzgebietes, FFH (Flora-Fauna-Habitat) und SPA (Special Protection Area = Vogelschutzgebiete) gesichert. Damit ist v. a. der Erhalt der Waldfunktionen und die Verbesserung der Waldstruktur verbunden. Eine weitere Sicherung erfolgt über den Landschaftsplan. Aufgrund ihrer Relevanz für das Stadtklima und hinsichtlich ihrer Erholungsfunktion am Tage sind alle vorhandenen Waldgebiete schützenswert (Abbildung 51 und Karte der Maßnahme M16).

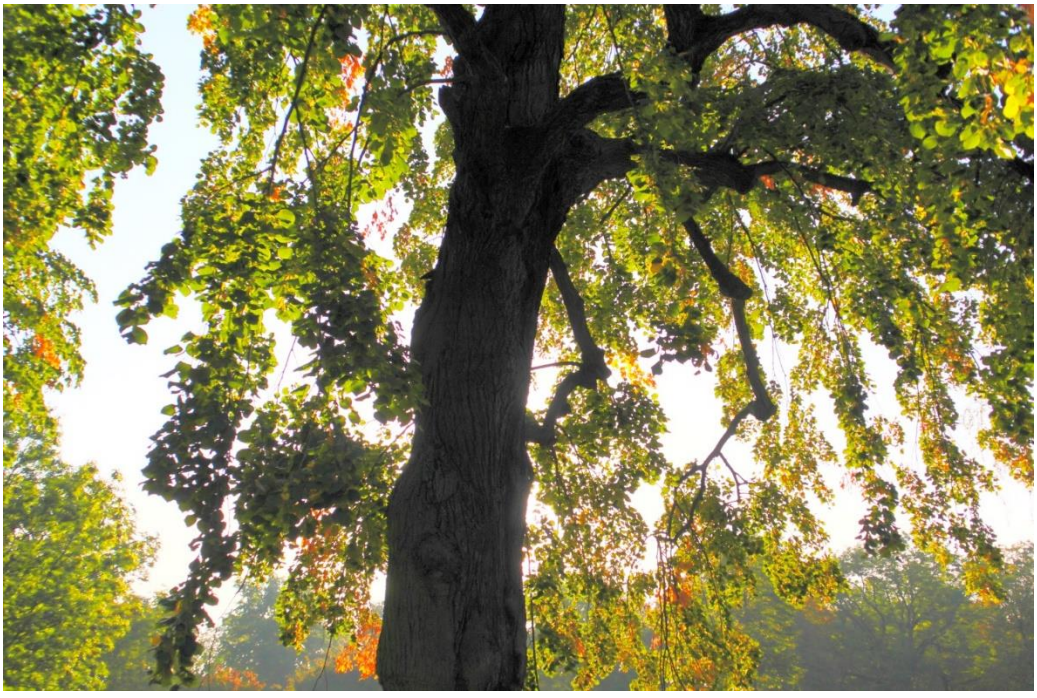


Abbildung 51: Empfehlung für Maßnahme 16 „Schutz von Waldflächen“, ohne Ortsangabe. (Foto: Dominika Leßmann)

6.17 M17 - Schutz von offenen Wasserflächen

Größere Fließ- und Standgewässer weisen für das Stadtklima grundsätzlich eine doppelte Wohlfahrtswirkung auf. Zum einen stellen sie rauigkeitsarme Ventilationsbahnen dar, über die vor allem bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft z. B. vom Umland in die Innenstadt transportiert wird. Die glatte Wasseroberfläche lässt auch die thermisch induzierten Kaltluftflüsse besser als über einer rauen Landschaft strömen, weshalb die Übergangsbereiche der Gewässer möglichst barrierefrei im klimaökologischen Sinne gestaltet werden sollten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist von der Wassertemperatur und dem Volumenstrom abhängig. Gewässer, die sich über einen oder mehrere Tage stark aufgewärmt haben, können den Kaltluftvolumenstrom während der Nacht verringern. Insbesondere tritt das bei schwachen Kaltluftvolumenströmen auf.

Zum anderen weisen offene Wasserflächen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität gegenüber den bodennahen Luftschichten einen sehr viel ausgeglicheneren Jahres- und Tagesverlauf auf. Während der Sommermonate und speziell während Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld dadurch tagsüber kühlend. Auch bei kleineren Gewässern, Wasserspielplätzen oder Brunnen in Parks und auf Stadtplätzen kommt dieser Effekt zum Tragen (siehe auch Maßnahme M13, Kapitel 6.13). Nachts kann ihre oberflächennahe Temperatur allerdings auch über der umgebenden Lufttemperatur liegen, weshalb sie in den Nachtstunden „den thermischen Komfort kaum verbessern“ (Kuttler 2013, S. 271) oder sogar die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel verstärken können. Die Wirkung von Gewässern ist daher durchaus ambivalent und im Einzelfall zu beurteilen.

Die für Leipzig wichtigen Luftleit- und Ventilationsbahnen folgen den Flusstälern von Pleiße und Parthe. Kleinere offene Wasserflächen befinden sich darüber hinaus auch in einigen Grün- und Parkanlagen. Die großen gefluteten Tagebaurestlöcher liegen im Süden von Leipzig, der Cospudener See liegt anteilig im Leipziger Stadtgebiet, genauso wie der Kulkwitzer See im Westen. Weitere größere Wasserflächen im Stadtgebiet sind die Kiesgruben in Kleinpösna im Osten und in Schönau im Westen, das Elsterbecken im Auwald und der Auensee in Möckern (siehe Karte Maßnahme M17 auf der vorhergehenden Seite).

Abbildung 52: Empfehlungen für Maßnahme 17 „Schutz von offenen Wasserflächen“. Quelle: Stadt Leipzig, https://www.leipzig.de/freizeit-kultur-und-tourismus/seen-fluesse-und-gewaesser/cospudener-see/

7 Literaturverzeichnis

Allen, L.; Lindberg, F.; Grimmond, C. S. B. (2011): Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. In: *Int. J. Climatol.* 31 (13), S. 1990–2005. DOI: 10.1002/joc.2210.

BBSR, B. B.R. (Hg.) (2019): KLIBAU –Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens. Endbericht (SWD –10.08.17.7-18.33). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2018/klibau/endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 12.05.2021.

Berliner Regenwasseragentur (2020): Gründach + Solar = Gewinn. Online verfügbar unter https://www.regenwasseragentur.berlin/gruendach-solar/, zuletzt geprüft am 18.05.2021.

Birkmann, J.; Sauter, H.; Sorg, L.; Laranjeira, K.; Göttsche, F.; Greiving, S. et al. (2020): Gemeinsamer Schlussbericht des ZURES-Projekts Zukunftsorientierte Vulnerabilitäts- und Risikoanalyse als Instrument zur Förderung der Resilienz von Städten und urbanen Infrastrukturen (ZURES) Verbundpartner. BMBF Abschlussbericht.

BUE: Mehr Gründächer für Hamburg. Broschüre. Hg. v. Behörde für Umwelt und Energie Hamburg. Online verfügbar unter https://www.hamburg.de/contentblob/4599638/baf6f2302bfa9162490113babe005269/data/d-broschuere.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) (Hg.) (2018): Hitze in Städten. Grundlage für eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung. Bern (UW-1812-D). Online verfügbar unter www.bafu.admin.ch/uw-1812-d, zuletzt geprüft am 23.10.2020.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels. Online verfügbar unter www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf, zuletzt geprüft am 15.01.2021.

Datenbasis: Deutscher Wetterdienst: Rasterdaten räumlich gemittelt. Online verfügbar unter ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/annual/.

DKRZ (2016): Globale Mitteltemperatur. Hg. v. DKRZ. Online verfügbar unter https://www.dkrz.de/kommunikation/klimasimulationen/de-cmip5-ipcc-ar5/ergebnisse/Mitteltemperatur, zuletzt aktualisiert am 2016, zuletzt geprüft am 02.07.2020.

DWD: Station Leipzig-Holzhausen. Jahr 2019. Online verfügbar unter ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/air_temperature/recent/stundenwerte_TU_02928_akt.zip, zuletzt geprüft am 08.05.2020.

DWD: Wetterlexikon. Klima. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html, zuletzt geprüft am 02.02.2021.

FLL (2018): Dachbegrünungsrichtlinien Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. Ausgabe 2018, 6. Ausgabe. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. Online verfügbar unter http://slubdd.de/katalog?TN_libero_mab216604275, zuletzt geprüft am 14.07.2020.

Franke, J. (2019): Klimaentwicklung in Sachsen – Fakten und Trends. Statuskolloquium Klima. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden, 05.12.2019. Online verfügbar unter https://www.klima.sachsen.de/download/1_Aktuelle_Klimaentwicklung_Franke.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2020.

GEO-NET (2019): Stadtklimaanalyse 2019. Unter Mitarbeit von J. Förster und C. Burmeister. Hg. v. Stadt Leipzig. GEO-NET Umweltconsulting GmbH. Leipzig.

Gross, Günter (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. In: *Beitr. Phys. Atmosph.* (62), S. 57–72.

Gross, Günter (1993): Air Flow Around and Through Individual Trees. In: D. Barsch, I. Douglas, F. Joly, M. Marcus, B. Messerli und Günter Groß (Hg.): Numerical Simulation of Canopy Flows, Bd. 12. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Series in Physical Environment), S. 34–91.

Hamburg: Dachbegrünung. Leitfaden zur Planung. Auf die Dächer - fertig -grün! Hamburger Gründachförderung. Online verfügbar unter https://www.hamburg.de/contentblob/10603292/c6eb1f159c491cfd8c7188f77b0dd277/data/d-leitfaden-dachbegruenung.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2021.

HeatResilientCity (2020): Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten. Wissenschaftliches Konzept zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes eines Gründerzeit-Mehrfamilienhauses der Erfurter Oststadt. Online verfügbar unter http://heatresilientcity.de/fileadmin/user_upload/heatresilientcity/files/Konzepte/Gebaeudekonzept_fuer_Mehrfamilienhaeuser_der_Gruenderzeit.pdf, zuletzt geprüft am 27.05-2021.

Henze, H. J., Siemsen, M. (2003): Die stadtökologische Bedeutung des Grünen Gleises. Hg. v. Überwachungsgemeinschaft Gleisbau e. V. Interdisziplin. Forschungsverbund Bahntechnik e. V.

Hübener, Heike; Spekat, Arne; Bülow, Katharina; Früh, Barbara; Keuler, Klaus; Menz, Christoph et al. (2017): ReKliEs-De Nutzerhandbuch. Online verfügbar unter http://reklies.hlnug.de/fileadmin/tmpl/reklies/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

IPCC (Hg.) (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

IPCC (2018): 1,5 °C globale Erwärmung - Der IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, (ISBN: 978-3-89100-051-9). Online verfügbar unter https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2020.

Jacob, Daniela; Petersen, Juliane; Eggert, Bastian; Alias, Antoinette; Christensen, Ole Bøssing; Bouwer, Laurens M. et al. (2014): Erratum to: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In: *Reg Environ Change* 14 (2), S. 579–581. DOI: 10.1007/s10113-014-0587-y.

Jakob Themeßl, Matthias; Gobiet, Andreas; Leuprecht, Armin (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. In: *Int. J. Climatol.* 31 (10), S. 1530–1544. DOI: 10.1002/joc.2168.

Jendritzky, Gerd (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Wilfried Endlicher und Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe (Hg.): Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke: Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut, S. 108–118. Online verfügbar unter https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/2633/108.pdf?sequence=1, zuletzt geprüft am 11.05.2020.

Kappis, Christel (Hg.) (2014): Handbuch Gleisbegrünung. Planung, Ausführung, Pflege. Hamburg: DVV Media Group. Online verfügbar unter http://www.gruengleisnetzwerk.de/images/downloads/wirkung.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2020.

Kaspar, Frank; Mächel, Hermann; Jacob, Daniela; Kottmeier, Christoph (2017): Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In: Susanne Schuck-Zöller, Daniela Jacob und Guy P. Brasseur (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–26. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_3.

Kowarik, Ingo; Bartz, Robert; Brenck, Miriam (Hg.) (2016): Ökosystemleistungen in der Stadt. Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen. Leipzig: Naturkapital Deutschland-TEEB DE. Online verfügbar unter https://www.ufz.de/export/data/global/190508_TEEB_DE_Stadtbericht_Langfassung.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2021.

Kruse, Elke; Rodríguez Castillejos, Zamna (2017): Überflutungs- und Hitzevorsorge in Hamburger Stadtquartieren. Wissensdokument. 1. Auflage. Hamburg: Tutech Verlag, TUTECH INNOVATION GmbH (Wissensdokument). Online verfügbar unter https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/461, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Kuttler, Wilhelm (2009): Klimatologie. Paderborn: Schöningh (Grundriss allgemeine Geographie, 3099).

Kuttler, Wilhelm (2011): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen Climate change in urban areas, Part 1, Effects. In: *Environ Sci Eur* 23 (1), S. 11. DOI: 10.1186/2190-4715-23-11.

Kuttler, Wilhelm (2013): Klimatologie. 2., aktualisierte und erg. Aufl. Paderborn: Schöningh (utb-studi-e-book, 3099). Online verfügbar unter http://www.utb-studi-e-book.de/9783838540597.

Linke, C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches. Bund Länder Fachgespräch "Interpretation regionaler Klimamodelldaten". Potsdam.

MUNLV (2011): Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/handbuch_stadtklima_kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2021.

MVI (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Hg. v. Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg. Online verfügbar unter https://www.staedtebauliche-klimafibel.de, zuletzt geprüft am 23.10.2020.

Pfoser, N.; Jenner, N.; Heusinger, J.; Weber, S. (2013): Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld. TU Darmstadt (Abschlussbericht August 2013). Online verfügbar unter https://www.irbnet.de/daten/rswb/13109006683.pdf, zuletzt geprüft am 03.03.2020.

Piani, C.; Haerter, J. O.; Coppola, E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. In: *Theor Appl Climatol* 99 (1-2), S. 187–192. DOI: 10.1007/s00704-009-0134-9.

Rodríguez Castillejos, Zamna; Kruse, Elke; Dickhaut, Wolfgang; Dietrich, Udo (Hg.) (2017): Mein Haus - in Zukunft klimaangepasst! Ein Leitfaden für Grundeigentümer, Bauherren und Planer. 1. Auflage. Hamburg: Tutech Verlag.

Roloff, A.; Bonn, S.; Gillner, S. (2008): Klimawandel und Baumartenwahl in der Stadt – Entscheidungsfindung mit der Klima-Arten-Matrix (KLAM). Online verfügbar unter https://62.96.236.95/sixcms/media.php/738/KLAM-Stadt%20Frankfurt%2009-2008.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2020.

Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) (2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Berlin. Online verfügbar unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html, zuletzt aktualisiert am 03.07.2020, zuletzt geprüft am 03.07.2020.

Sailor, David J. (2011): A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. In: *Int. J. Climatol.* 31 (2), S. 189–199. DOI: 10.1002/joc.2106.

Schreiter, H.; Kappis, Chr. (2012): Wirkung und Funktion Grüner Gleise. Hg. v. Grüngleisnetzwerk. Berlin. Online verfügbar unter http://www.gruengleisnetzwerk.de/images/downloads/wirkung.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2020.

Stadt Leipzig (Hg.) (2019): Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig Fortschreibung 2018. Amt für Umweltschutz. Leipzig. Online verfügbar unter https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.3_Dez3_Umwelt_Ordnung_Sport/LRP-2018_online.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2021.

Stadt Zürich (Hg.): Masterplan Stadtklima Zürich Grundlagen und Strategien für die Klimaanpassung - Hitze. unveröffentlicht. Zürich.

Stiftung DIE GRÜNE STADT (Hg.) (2010): Stadtklimatologie und Grün. Anregungen zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf. Online verfügbar unter www.die-gruene-stadt.de › stadtklimatologie, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

Umweltbundesamt (2016): Heizen, Raumtemperatur. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur, zuletzt aktualisiert am 23.10.2020.

VDI 3787, Blatt 5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft 2003.

8 Anhang

8.1 Leipzig im Klimawandel

8.1.1 Datengrundlage der Klimawandelergebnisse

Tabelle 11: Momentan verfügbare Modellläufe der EURO-CORDEX Initiative. 19 Modellkombinationen, 58 Modellläufe, davon 39 Zukunftsläufe, Stand 03/2019. Quelle: Eigene Darstellung.

	GCM	RCM	historical	rcp26	rcp45	rcp85
1	CanESM2	CCLM	✓	×	×	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	×	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	×	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	×	×
8	MIROC5	REMO2015	✓	×	×	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	×	×	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	×	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	×	×
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	×	×
15	MPI-ESM	CCLM	✓	×	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	×	×
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

8.1.2 Ergebnisse in Box-Whisker Plots

8.1.2.1 Erklärung der Box-Whisker Diagramme

Die Entwicklungen der Zukunft werden mithilfe von Box-Whisker Plots dargestellt. Die Kästen (Boxes) enthalten jeweils Daten aller verwendeten Klimamodelle für den jeweiligen 30-jährigen Zeitraum zwischen dem 25. bis 75. Perzentil und stellen damit die Hälfte der Gesamtdaten dar. Der schwarze dicke waagerechte Strich in der Box ist der Median, der die Daten genau in der Mitte teilt, würden sie nach der Größe geordnet. Er ist ein Lageparameter und nicht mit dem Mittelwert zu verwechseln. (siehe Abbildung 53).

Die Kreise oberhalb des Maximums stellen die Ausreißer in den Daten dar.

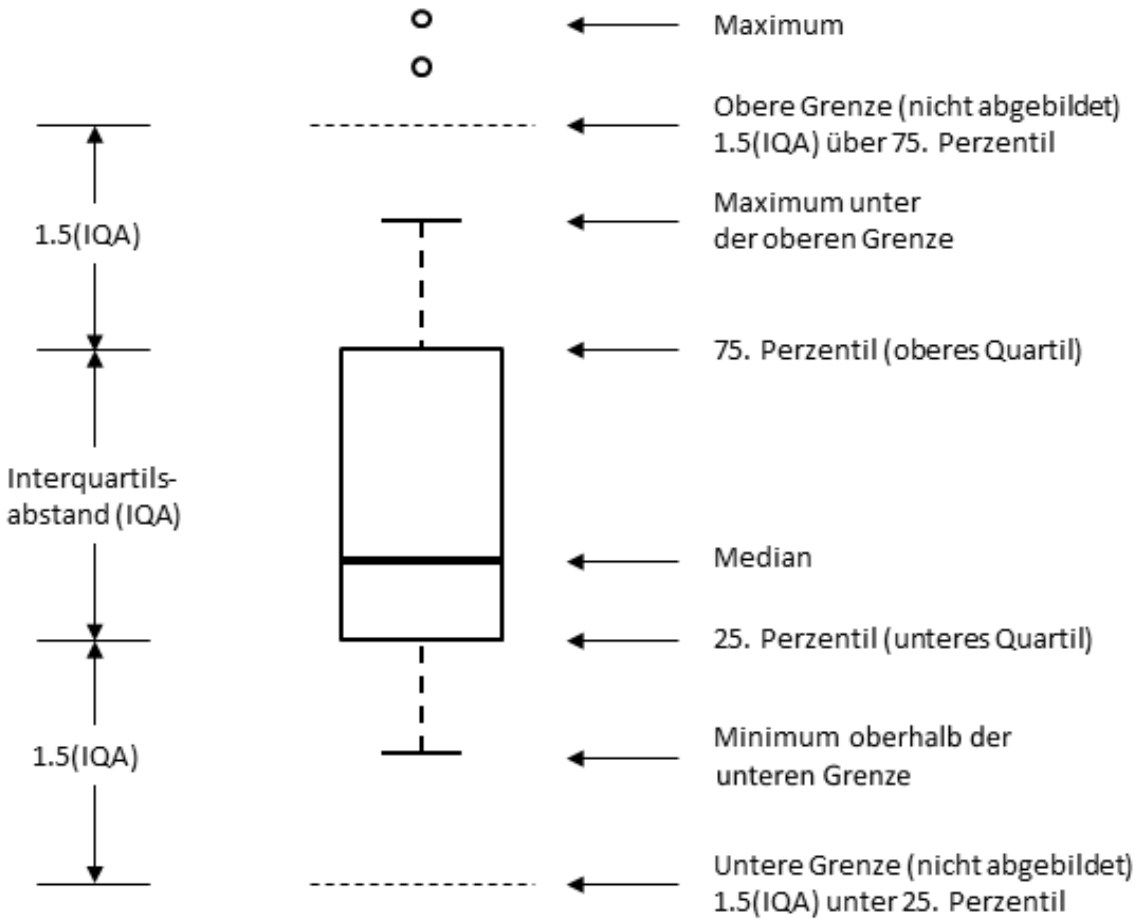
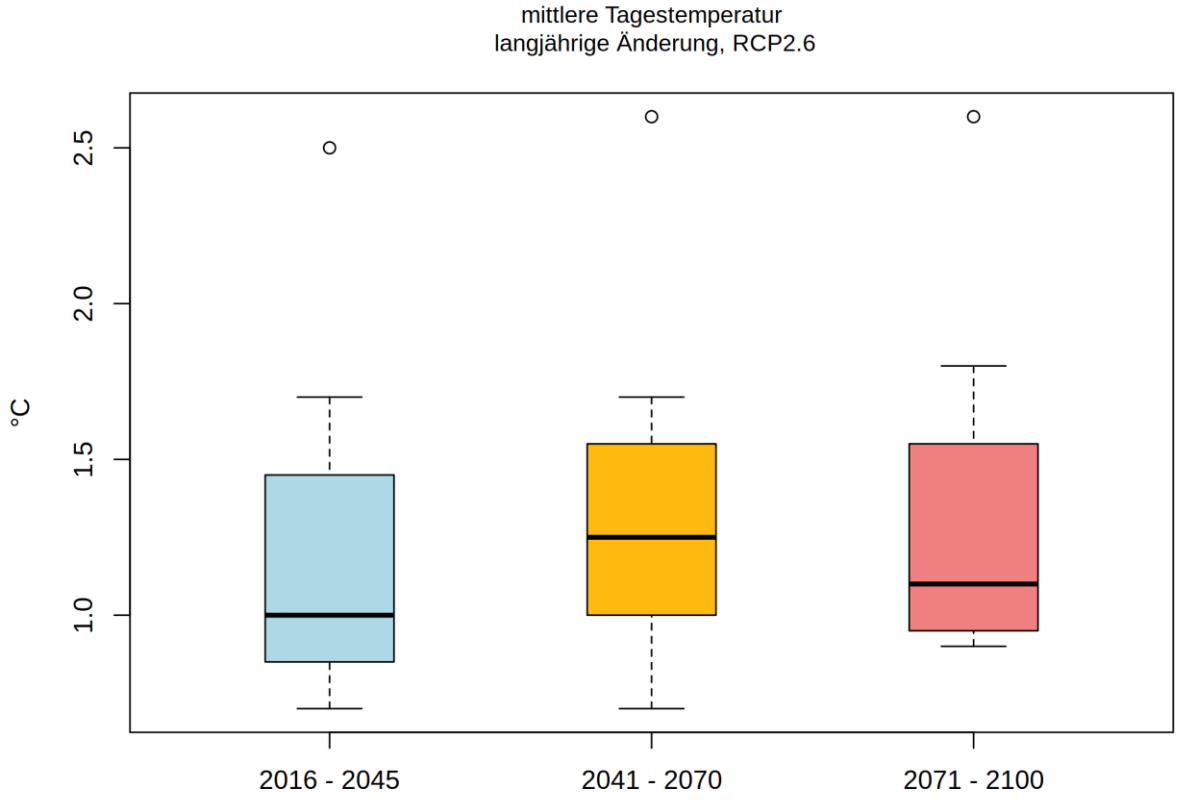


Abbildung 53: Box-Whisker Plots und ihre Bedeutung. Quelle: Eigene Darstellung.

8.1.2.2 Jahresmitteltemperatur



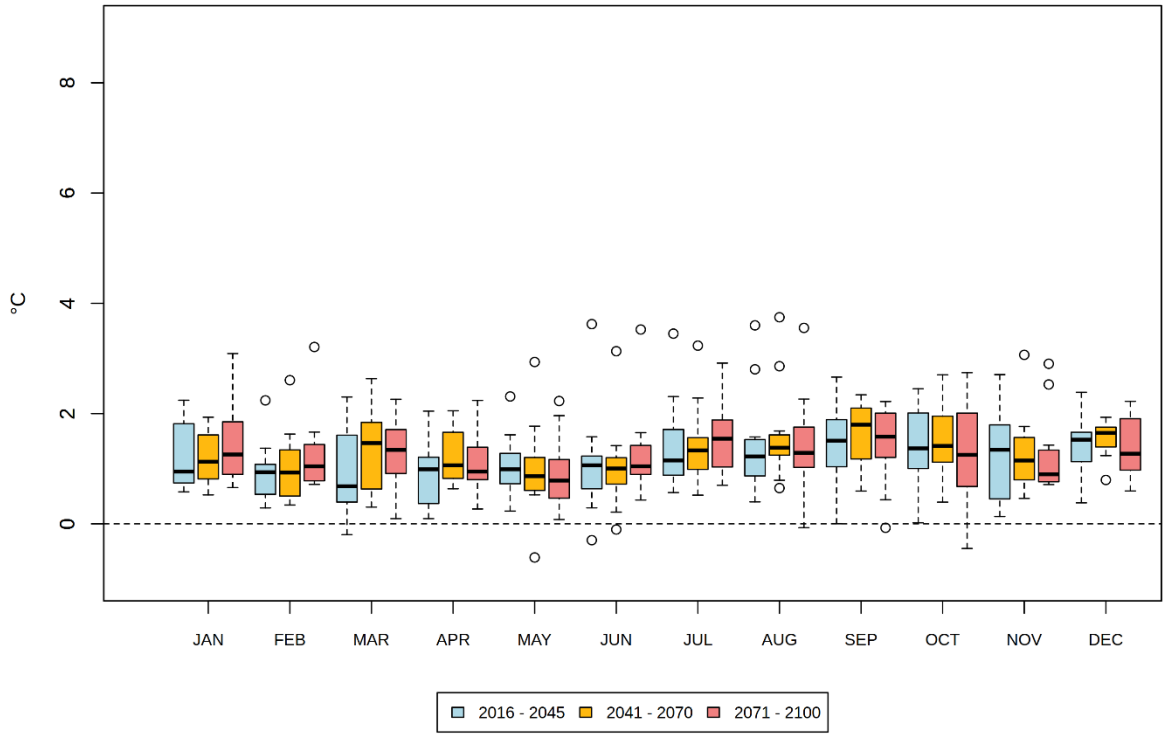


Abbildung 54: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für das RCP 2.6

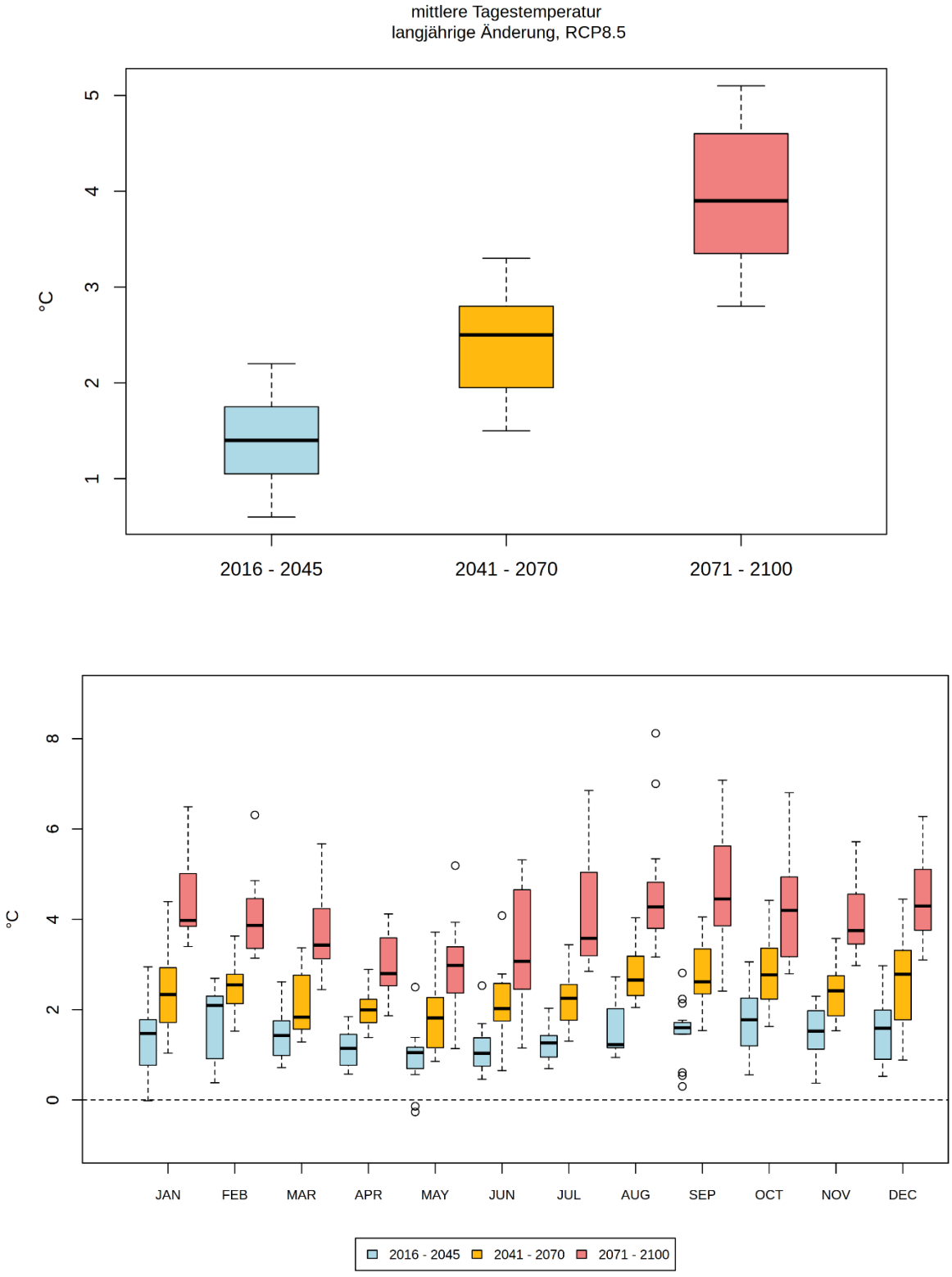
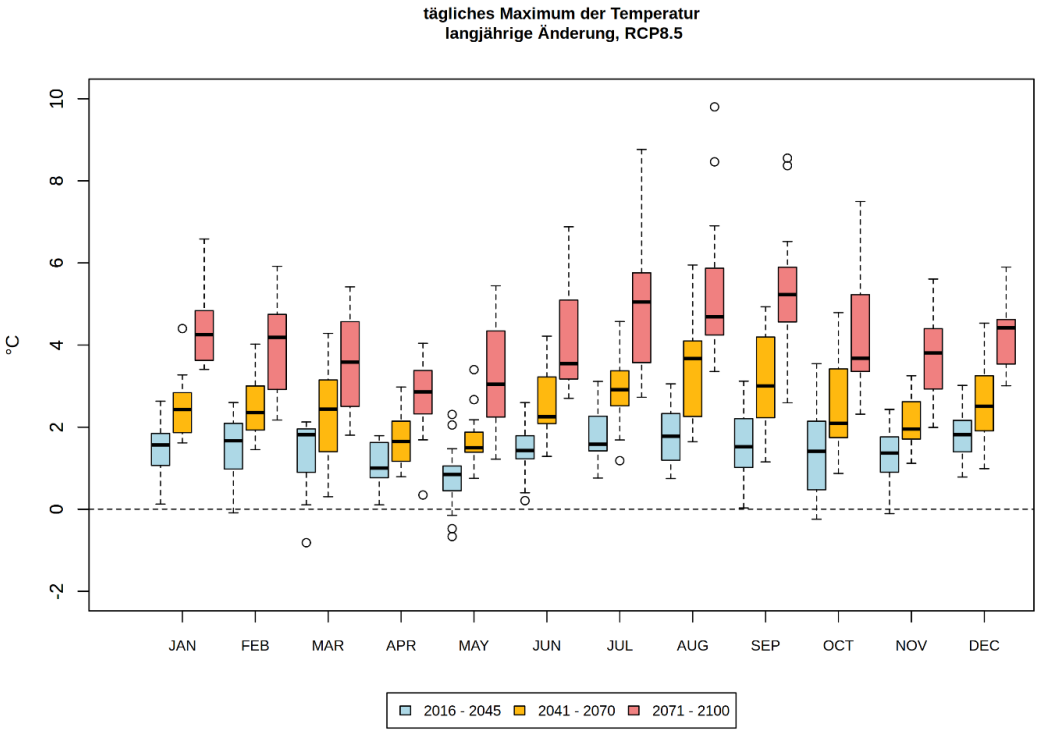


Abbildung 55: Langjährige Änderung der Jahresmitteltemperatur für das RCP 8.5

8.1.2.3 Maximum- und Minimumtemperatur



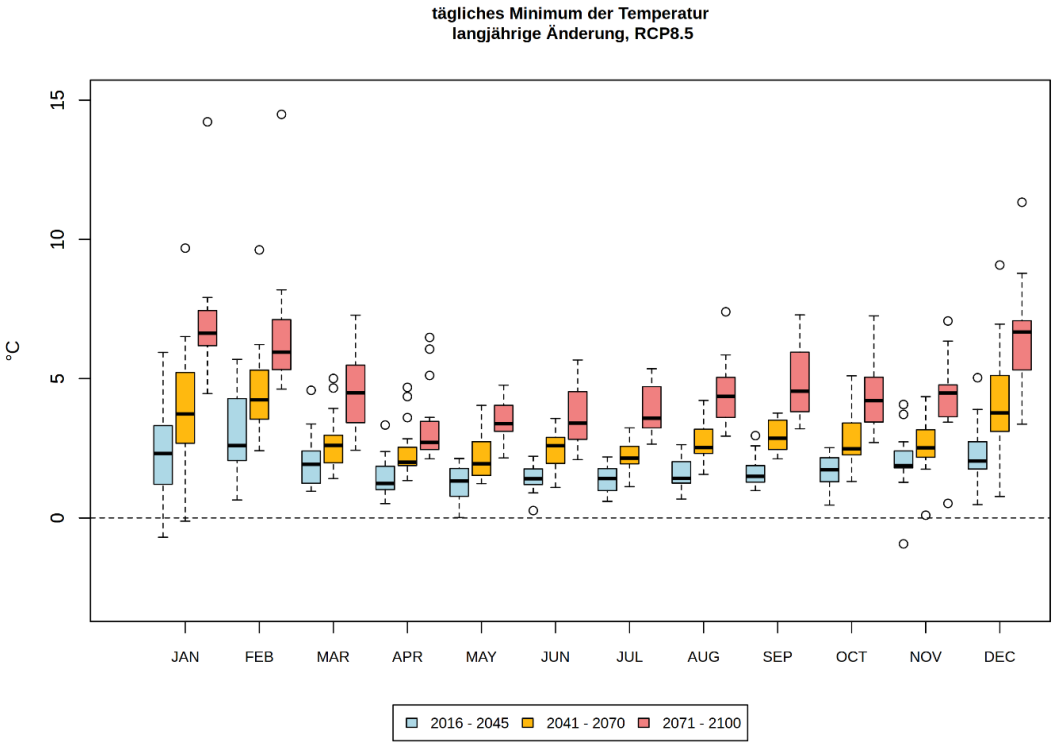
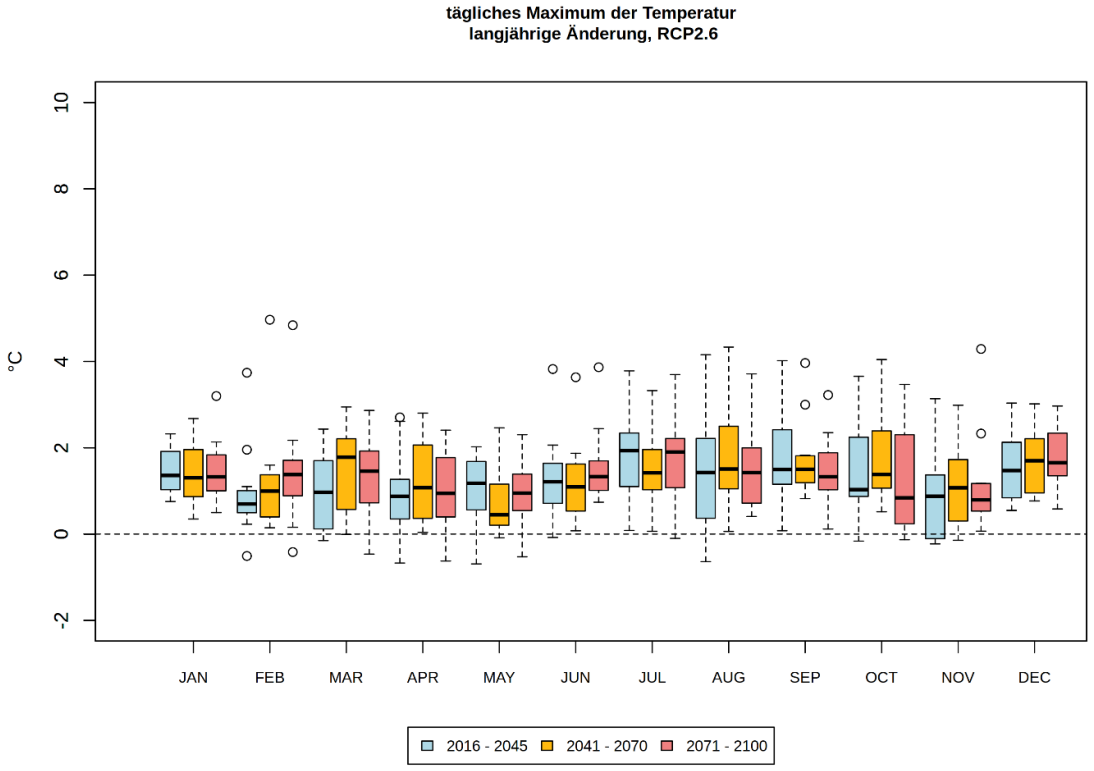


Abbildung 56: Langjährige Änderung der Maximum- und Minimumtemperatur für das RCP 8.5



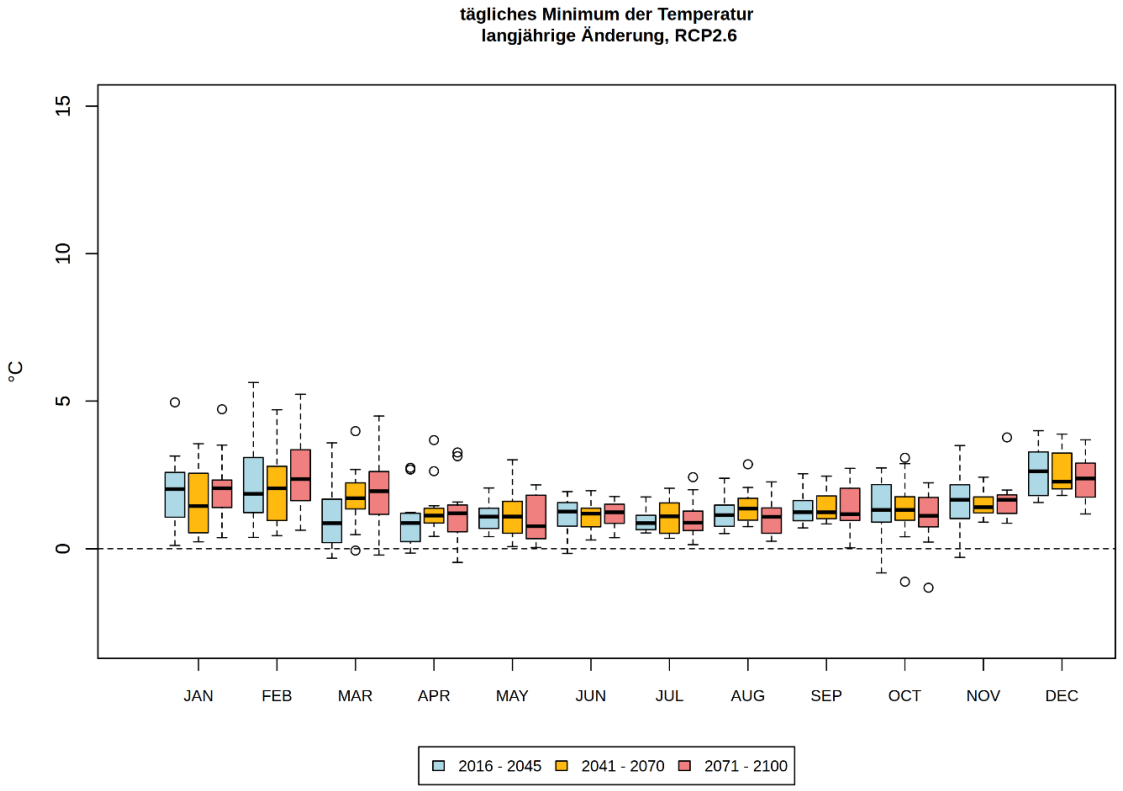
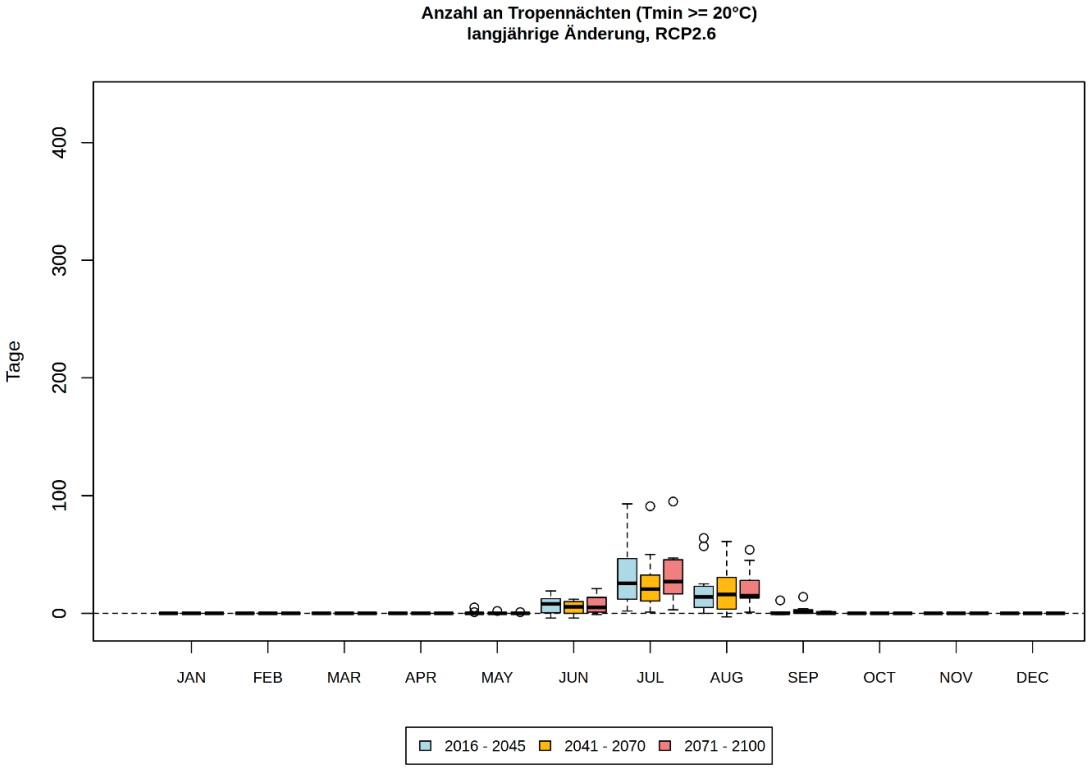


Abbildung 57: Langjährige monatliche Änderung der Maximum- und Minimumtemperaturen im RCP 2.6

8.1.2.4 Tropennächte



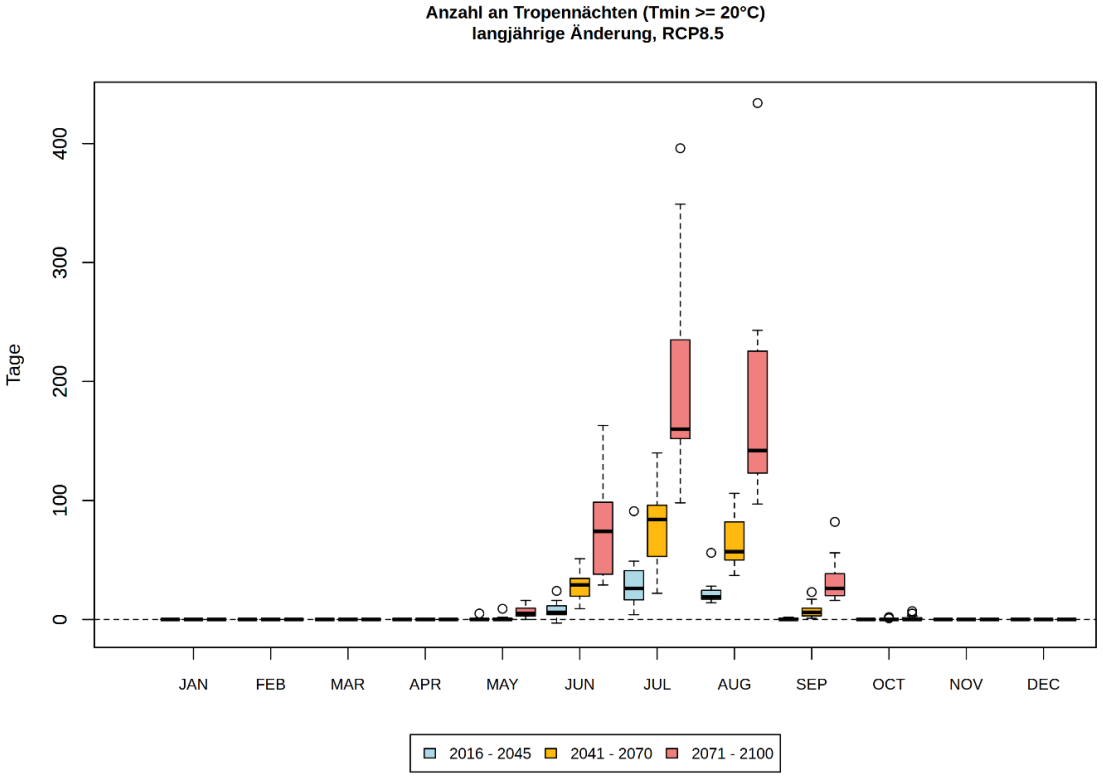
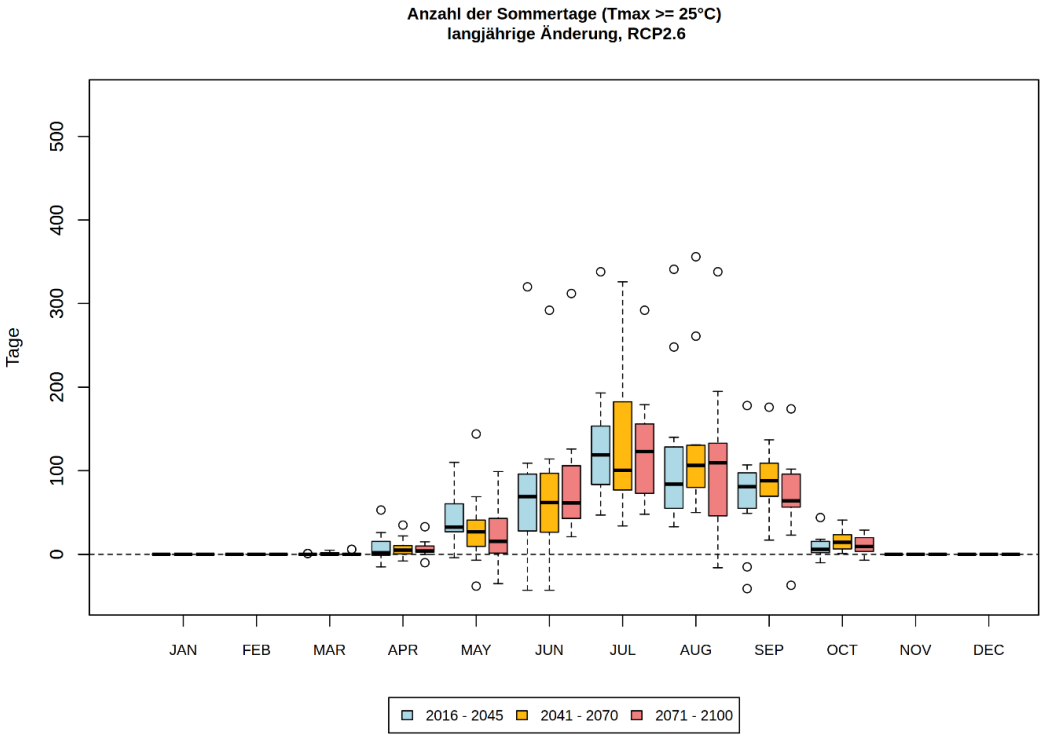


Abbildung 58: Anzahl an Tropennächten für die 30-jährigen Perioden für das RCP 2.6 und RCP 8.5. Hinweis: Hier ist die absolute Anzahl aller Tropennächte für 30 Jahre dargestellt. Im Fließtext unter Abschnitt 2.1.4 sind jährliche Werte genannt.

8.1.2.5 Sommertage



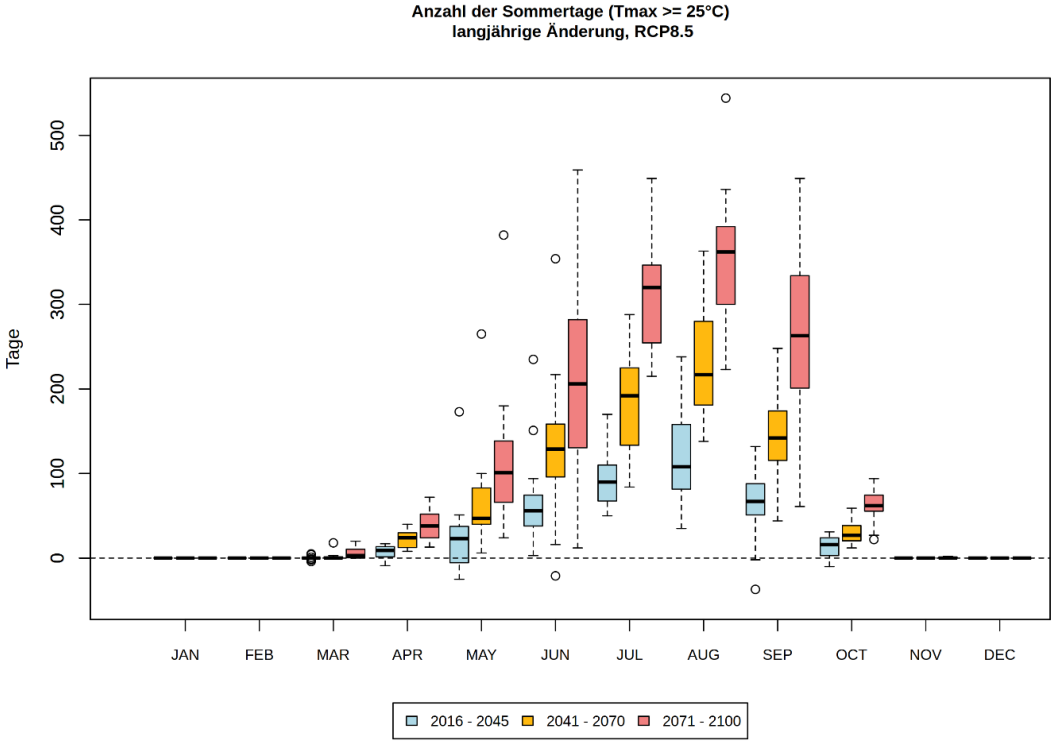
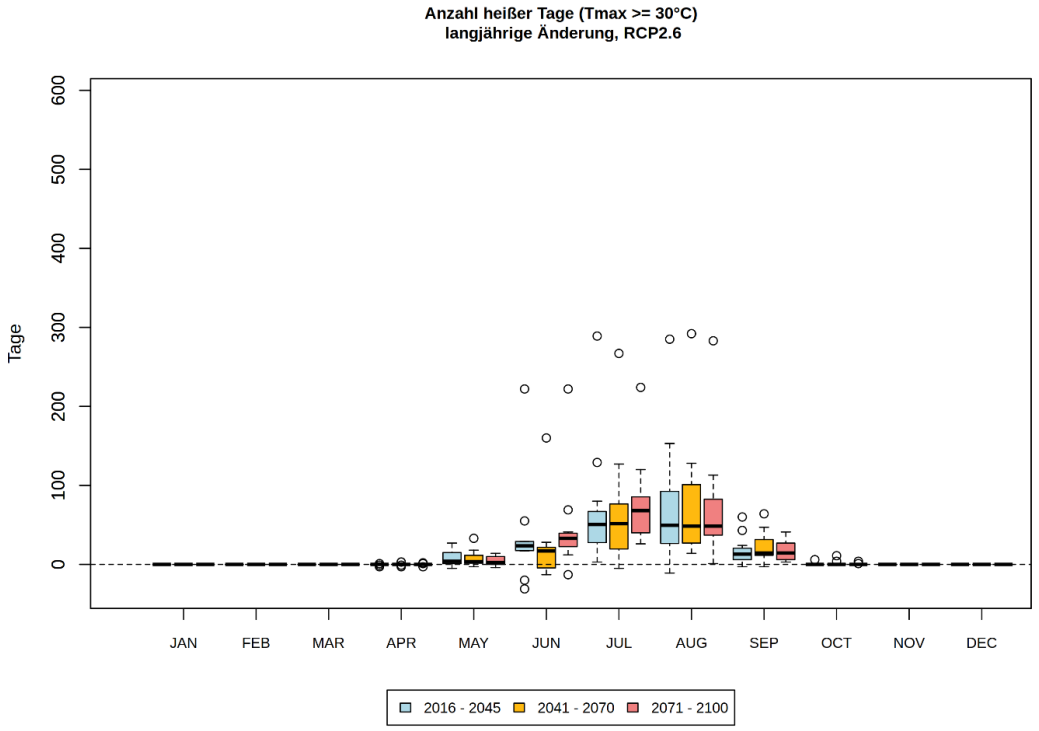


Abbildung 59: Langjährige Änderung der Anzahl der Sommertage für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5. Hinweis: Hier ist die absolute Anzahl aller Sommertage für 30 Jahre dargestellt. Im Fließtext unter Abschnitt 2.1.4 sind jährliche Werte genannt.

8.1.2.6 Heiße Tage



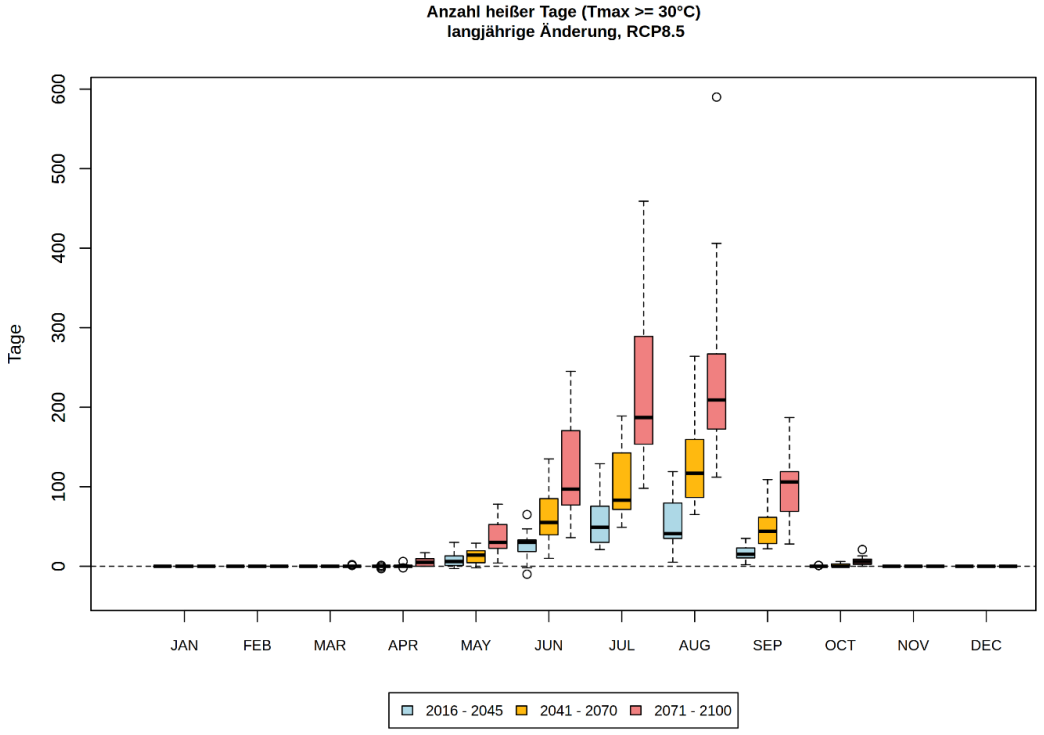
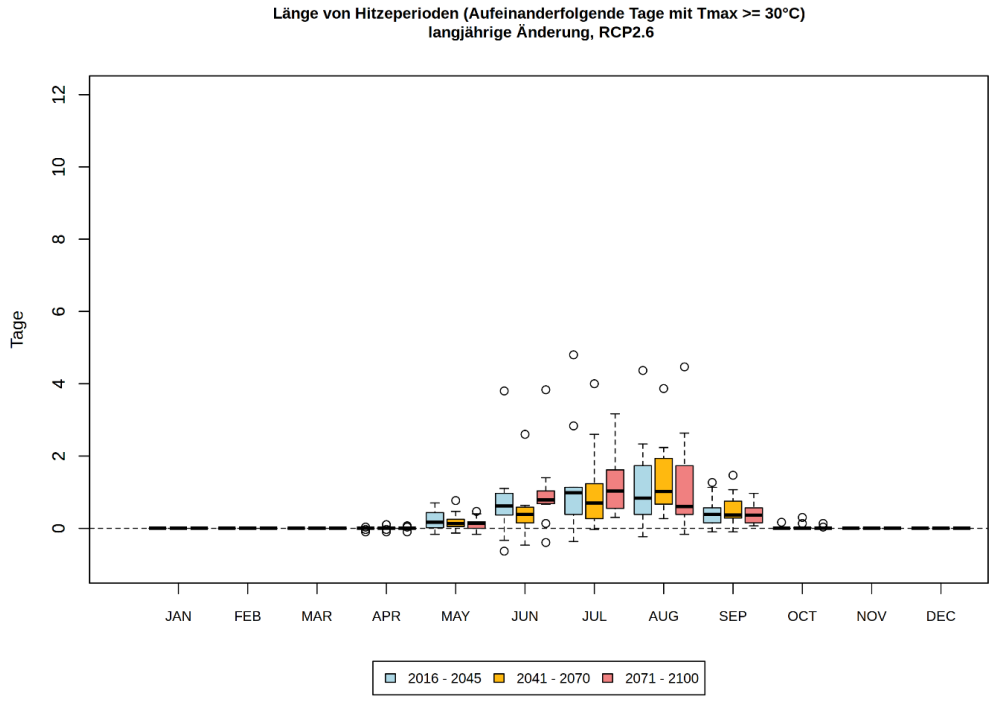


Abbildung 60: Langjährige Änderung der Anzahl heißer Tage für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5.
Hinweis: Hier ist die absolute Anzahl aller Heißen Tage für 30 Jahre dargestellt. Im Fließtext unter Abschnitt 2.1.4 sind jährliche Werte genannt.

8.1.2.7 Hitzeperioden



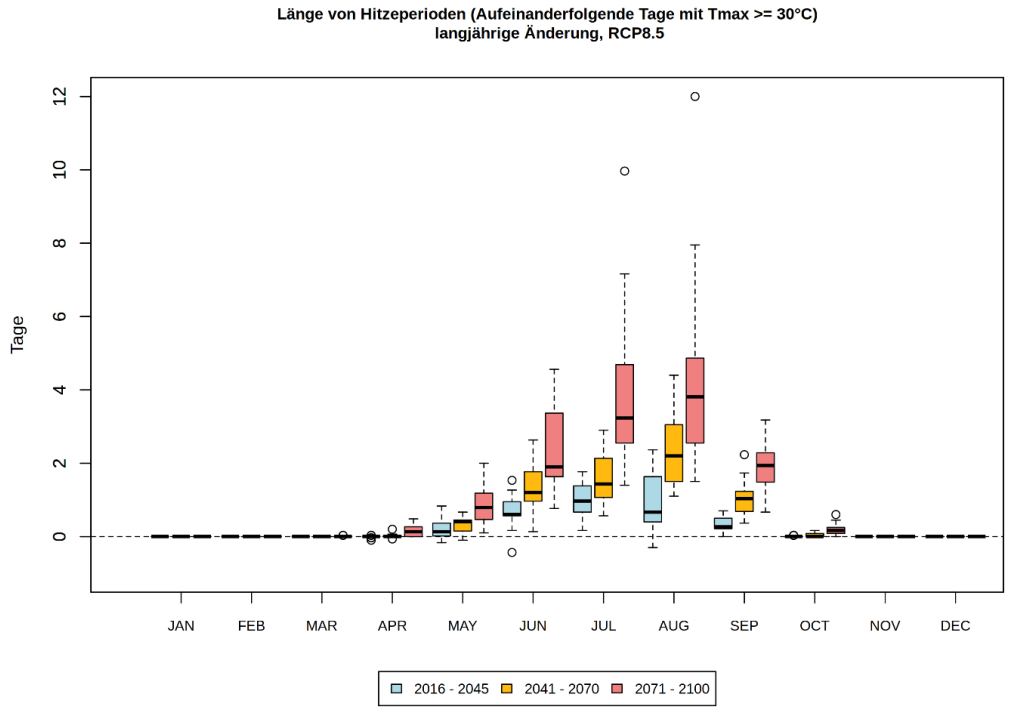
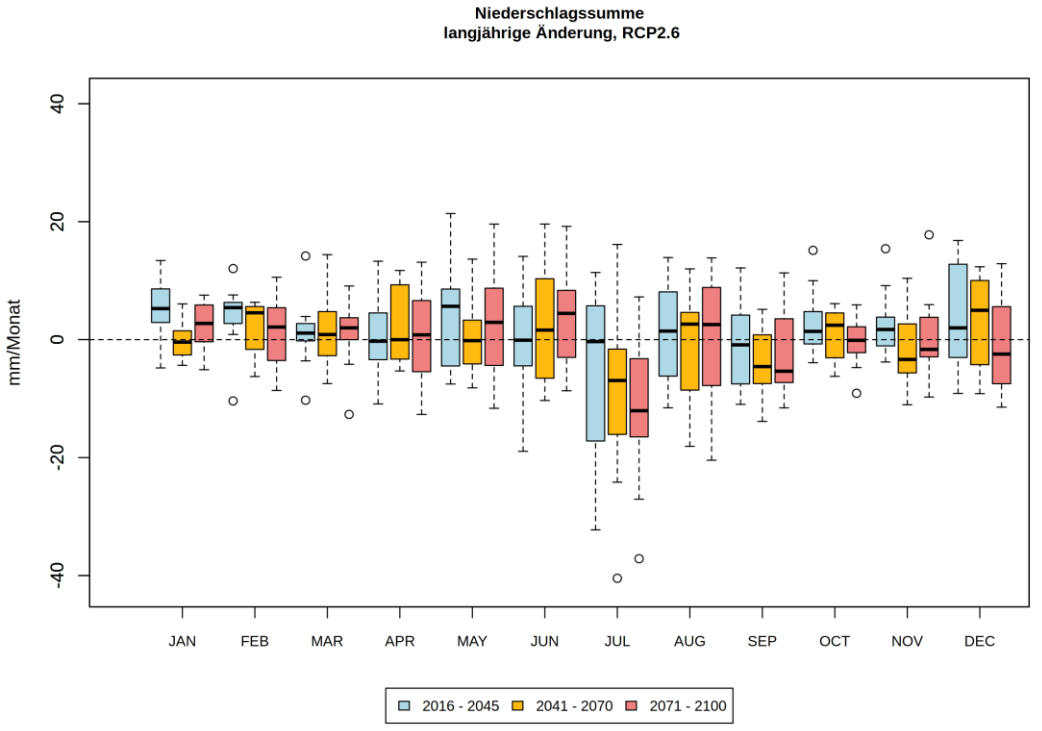


Abbildung 61: Langjährige Änderung der Länge von Hitzeperioden pro Jahr für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6

8.1.2.8 Jahresniederschlagssummen



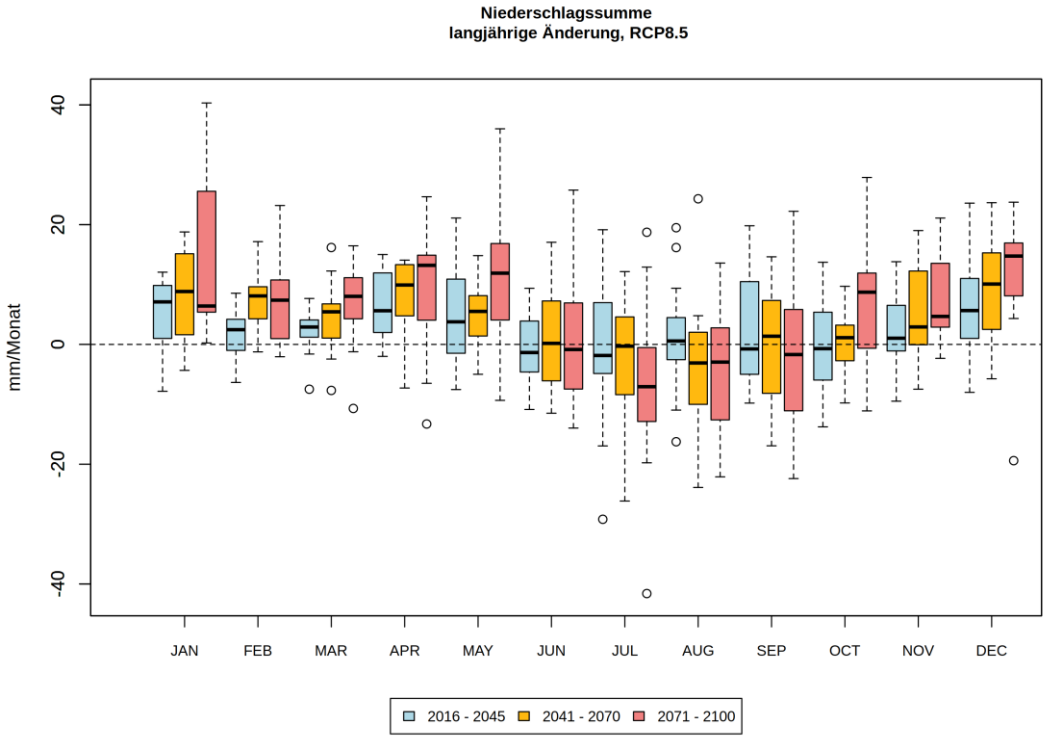
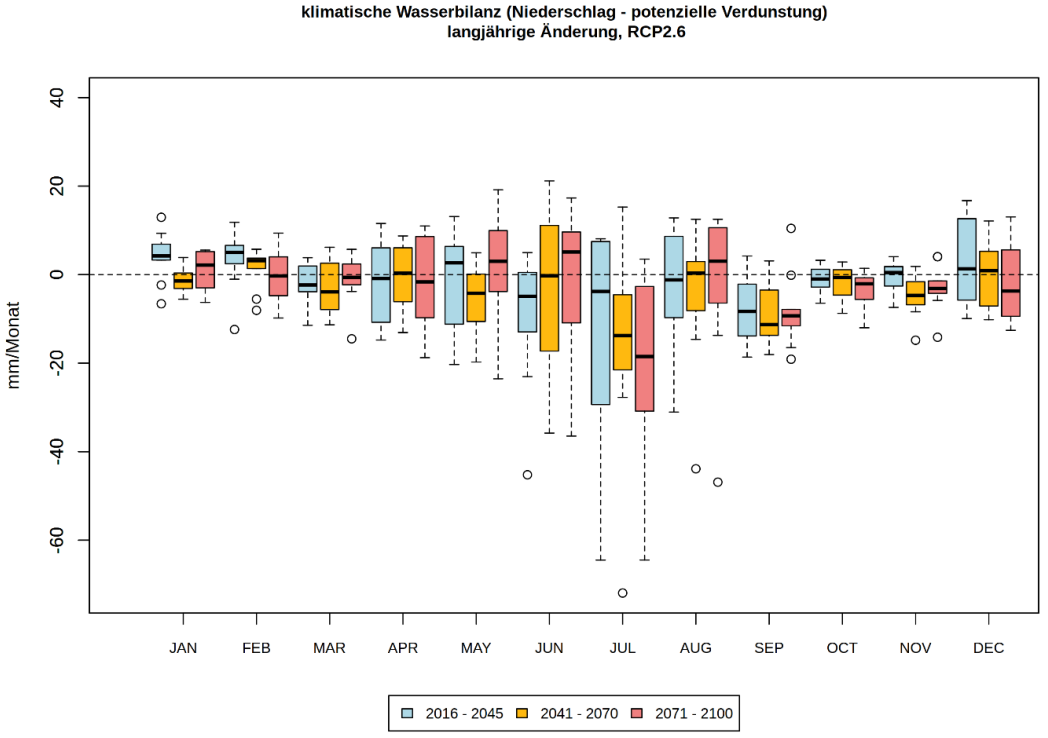


Abbildung 62: Änderung der langjährigen mittleren monatliche Niederschlagssummen für Leipzig für das RCP 2.6 und 8.5.

8.1.2.9 Klimatische Wasserbilanz



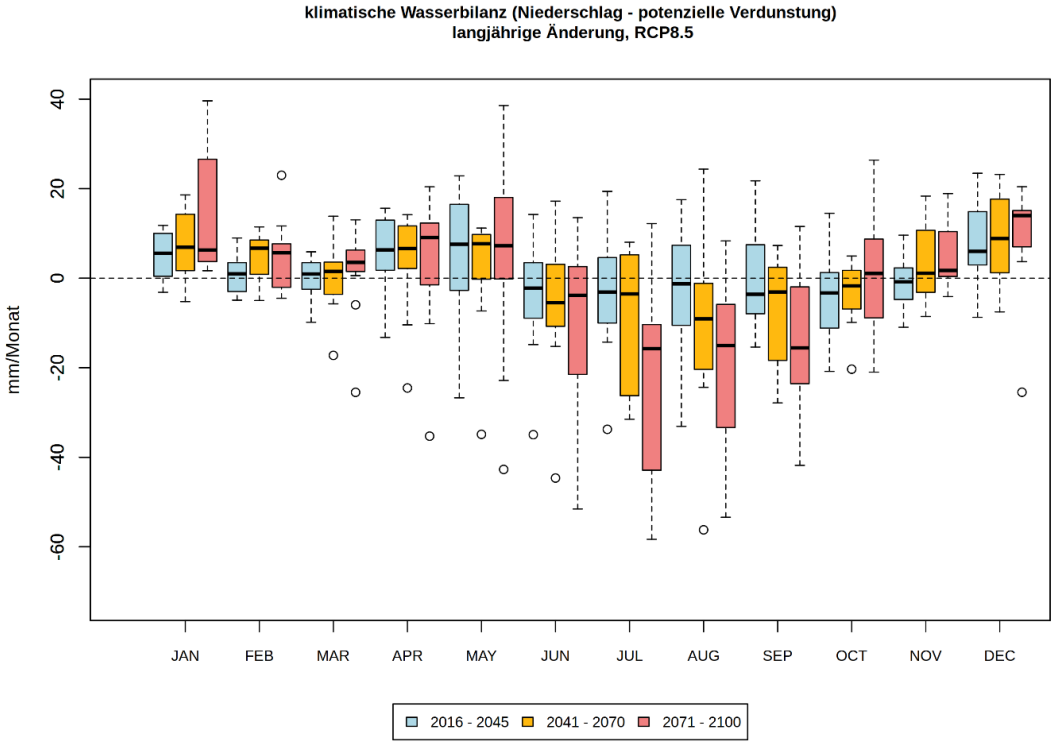
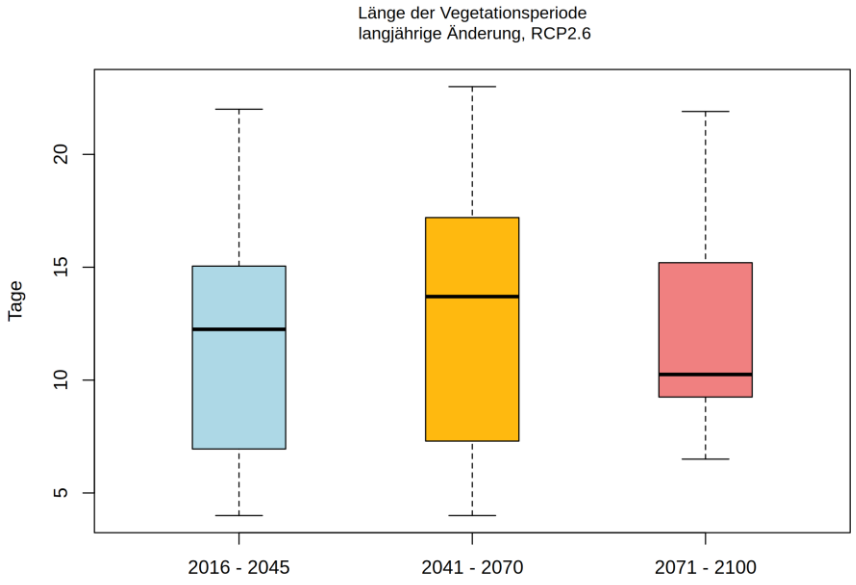


Abbildung 63: Langjährige Änderung der klimatischen Wasserbilanz für Leipzig für die 30-jährigen Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5

8.1.2.10 Vegetationsperiode



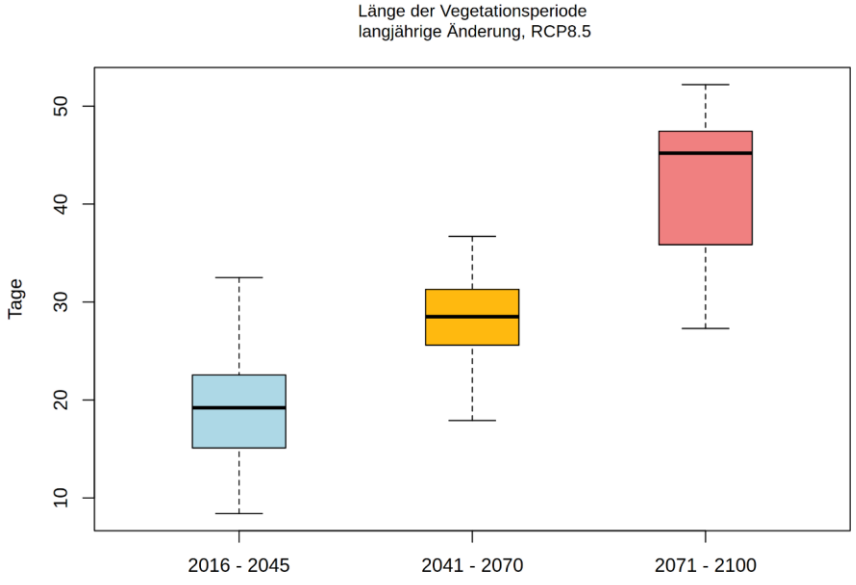


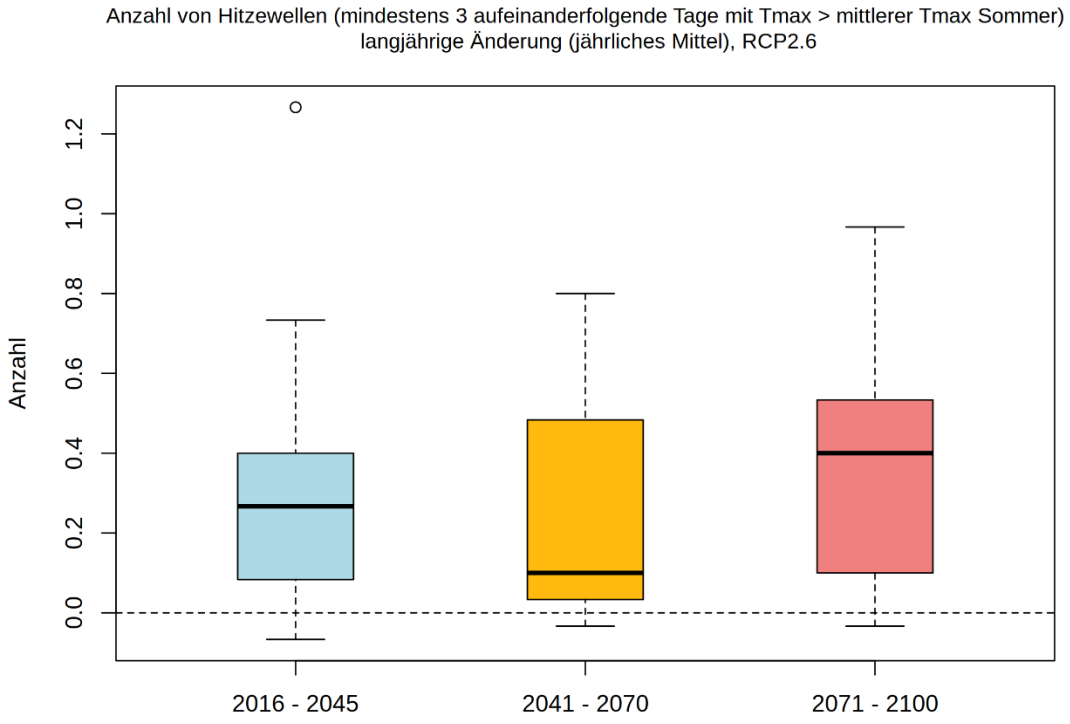
Abbildung 64: Langjährige Änderung der Länge der Vegetationsperiode für Leipzig für die 30-jährige Zukunftsperioden im RCP 2.6 und 8.5

8.1.2.11 Entwicklung der Kenngröße Hitzewellen

Eine Hitzewelle ist festgelegt auf mindestens 3 aufeinanderfolgende Tage mit einer Maximumtemperatur, die über dem langjährigen mittleren maximalen Sommertemperaturwert liegt. Die Kenngröße Hitzewelle gibt letztendlich die Anzahl des Auftretens der oben genannten Kriterien wieder. Zur Vollständigkeit werden hier die Graphiken hinterlegt, jedoch nicht ausgewertet.

Tabelle 12: Ergebnisse für langjährige Klimaänderungen für Hitzewellen in Leipzig mit Gegenüberstellung zu Messergebnissen aus der Referenzperiode. Dargestellt ist der Mittelwert der 30-jährigen Periode.

Parameter	Station	Referenz-periode 1971 - 2000	RCP Szenario	Änderungen gegenüber Referenzperiode		
				2021 - 2050	2041 – 2070	2071 - 2100
Hitzewelle [n/Jahr] (mindestens 3 aufeinanderfolgende Tage mit Tmax > langjähriger mittlerer Tmax Sommer)	2928 Leipzig-Holzhausen	0	2.6	0	0	0
			8.5	0	1	1



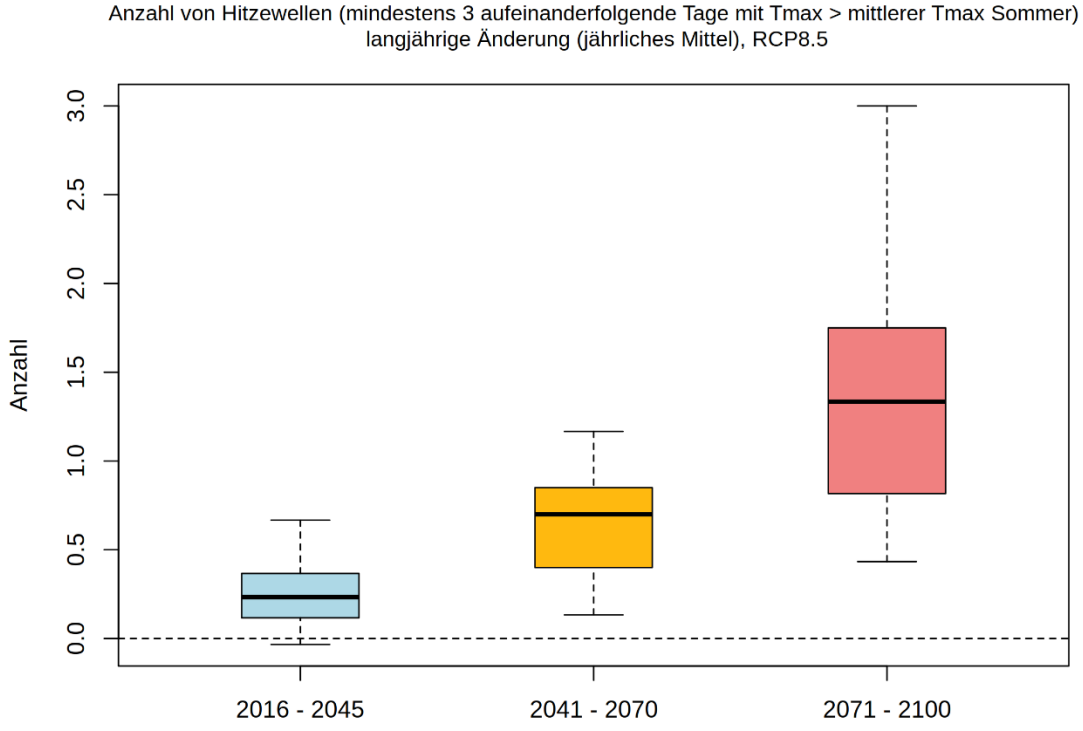
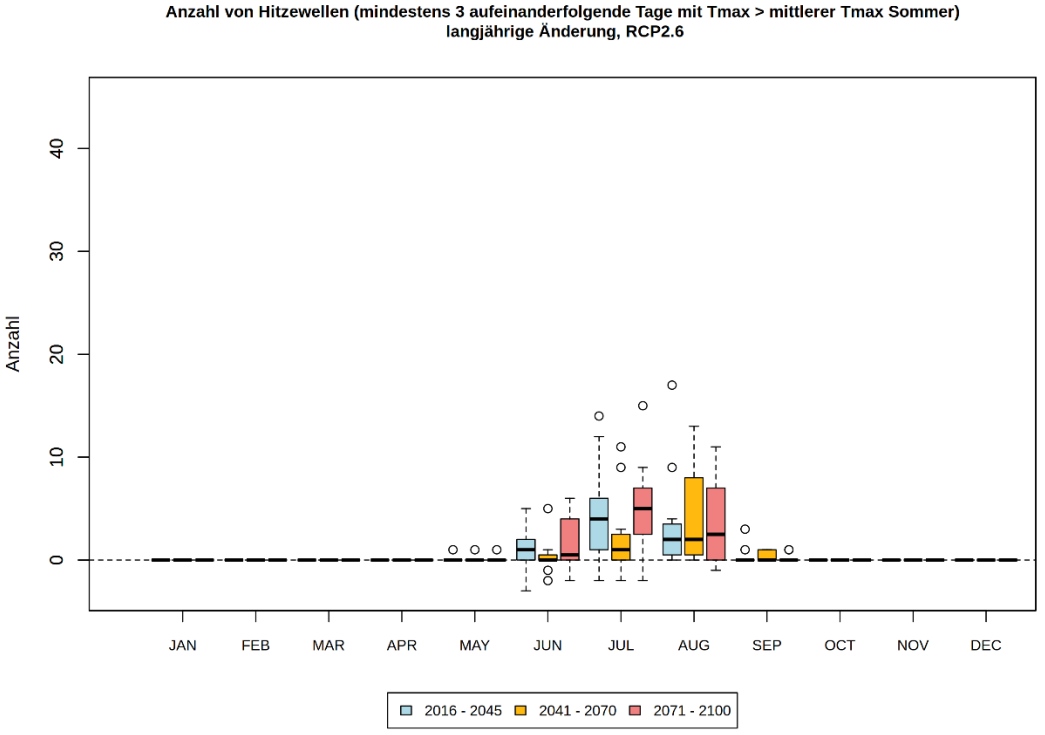


Abbildung 65: Auftretenshäufigkeit von Hitzewellen im RCP 2.6 und 8.5



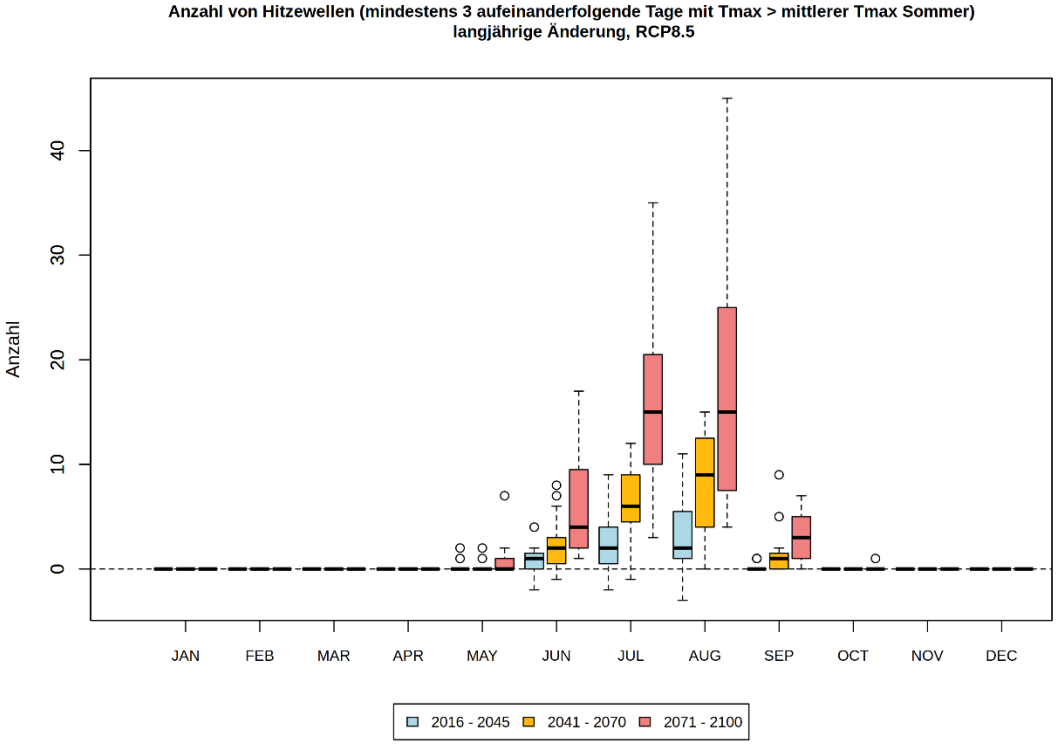


Abbildung 66: Monatliche Auftretenshäufigkeit von Hitzewellen in Leipzig für 30-jährige Zukunftsperioden für RCP 2.6 und 8.5.

8.2 Karte: Prozessraumanalyse der Kaltluftleitbahnen

8.3 Karte: Besonders schützenswerte Grün- und Freiflächen und klimatischer Sanierungsbereich

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 27.05.2021

Erstellt von: _____

Dipl. Geogr. Cornelia Burmeister

Geprüft von: _____

Dipl.-Geogr. Peter Trute