

## KLIMAGERECHTES FLÄCHENMANAGEMENT DER LANDESHAUPTSTADT ERFURT

Gesamtstädtische Klimaanalyse  
mit Bewertungskatalog,  
Planungsempfehlungen und  
Integration der zukünftigen  
baulichen sowie klimatischen  
Veränderungen.

## Klimagerechtes Flächenmanagement der Landeshauptstadt Erfurt

-Endbericht-

Auftraggeber: Landeshauptstadt Erfurt, Stadtverwaltung  
Umwelt- und Naturschutzamt  
Stauffenbergallee 18 in 99085 Erfurt



Auftragnehmer: Institut für Klima- und Energiekonzepte  
Schillerstraße 50 in 34253 Lohfelden



Bearbeiter: Prof. Dr. Lutz Katzschner Dipl.-Ing. Sebastian Kupski

Förderkennzeichen: 03K00318

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

*Bei allen Bezeichnungen, die auf Personen bezogen sind, meint die gewählte Formulierung beide Geschlechter, auch wenn aus Gründen der leichteren Lesbarkeit und Verständlichkeit die männliche Form gewählt wurde.*

*Die Erstellung des Gutachtens erfolgte nach Stand der Technik sowie nach bestem Wissen und Gewissen. Klimatische Analysen und Wetterbedingungen unterliegen einer entsprechenden Variabilität, das tatsächliche Eintreten kann naturgemäß nicht sicher prognostiziert werden.*

Lohfelden im März 2018

## VORWORT

Die Herausforderungen, welche der Klimawandel für die Kommunen in den nächsten Jahrzehnten hinsichtlich notwendiger Anpassungsmaßnahmen mit sich bringen wird, sind immens. Kommunen vor diesem Hintergrund resilient zu entwickeln und damit attraktiv für ihre Bewohner zu gestalten, sind wichtige Aufgaben für Verwaltung und Kommunalpolitik.

Erfurt hat durch seine topografische Lage in einem nach Norden geöffneten Talkessel seit vielen Jahrzehnten mit dem Phänomen häufiger Inversionswetterlagen zu kämpfen. Diese Situation führt im Sommer zu Überhitzungserscheinungen und im Winter zu einer erhöhten Schadstoffkonzentration im Stadtgebiet. Der Sicherung einer komfortablen Stadtdurchlüftung kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu.

Erfurt wächst. Ziel der Stadtentwicklung ist die Beibehaltung einer kompakten europäischen Stadt. Die Vorteile liegen in einer kostengünstigen effizienten Erschließung, in einem optimierten Nahverkehr, dem Miteinander von Leben, Wohnen und Arbeiten – kurz: in einer Stadt der kurzen Wege.

Die weitere bauliche Entwicklung ist Teil der kommunalen Selbstverwaltung. Ziel dieses Fachgutachtens ist es nicht, die Stadtentwicklung zu bremsen, sondern Wege für die Abwägung zwischen den Belangen des Stadtklimas und der Stadtentwicklung zu finden.

Bei der Weiterentwicklung der kompakten Stadt muss der Spagat zwischen der Sicherung einer ausreichenden Durchlüftung und der baulichen Entwicklung gelingen. Das vorliegende Fachgutachten gibt wichtige Hinweise für die weitere Stadtplanung. In den zukünftigen Planungsprozessen müssen die wichtigen Durchlüftungsbahnen in ihrer Funktion erhalten bleiben. In vielen dieser Planungen wird es notwendig sein, durch vertiefende Fachgutachten die bauliche Entwicklung und die stadtklimatischen Aspekte in Einklang zu bringen.

Kathrin Hoyer

Beigeordnete für Umwelt,  
Kultur und Sport

Alexander Hilge

Beigeordneter für Stadtentwicklung,  
Bau, Verkehr und Liegenschaften

## INHALT

<b>1. HINTERGRUND.....</b>	<b>11</b>
<b>2. EINLEITUNG.....</b>	<b>12</b>
2.1    AUFGABENSTELLUNG .....	12
2.2    ZIELE DER STADTKLIMAANALYSE.....	13
<b>3. METHODIK.....</b>	<b>16</b>
3.1    STADTKLIMAKARTEN .....	16
3.2    VERFAHRENSWEISE ZUR ERSTELLUNG VON KLIMAFUNKTIONSKARTEN.....	18
3.3    STADTKLIMATISCHER BEWERTUNGSINDEX .....	20
<b>4. LOKALE UND REGIONALE KLIMAVERHÄLTNISSE.....</b>	<b>22</b>
4.1    METEOROLOGISCHE VERHÄLTNISSE IM RAUM ERFURT .....	22
4.2    LUFTTEMPERATUR.....	23
4.3    NIEDERSCHLAG.....	25
4.4    WIND UND LUFTAUSTAUSCH .....	28
4.5    INVERSION .....	30
4.6    AUSWIRKUNGEN VERSCHIEDENER WETTERLAGEN AUF DAS STADTKLIMA UND DIE LUFTHYGIENE ERFURTS..	39
4.7    ZEITLICHER VERLAUF DER KLIMATISCHEN VERHÄLTNISSE .....	41
<b>5. ÜBERSICHT DER THEMENKARTEN .....</b>	<b>45</b>
5.1    GEBÄUDEVOLUMEN .....	50
5.2    SOLARE EINSTRAHLUNG .....	52
5.3    KALTLUFTMODELLIERUNG MIT KLAM_21 .....	56
5.4    BODENRAUIGKEIT .....	58
5.5    HANGNEIGUNG.....	60
<b>6. MESSUNGEN .....</b>	<b>62</b>
6.1 KONTINUIERLICHE, STATIONÄRE MESSUNGEN.....	62
6.1.1 Messpunkt Baumarkt Parkplatz (Dittelstedter Flur).....	64
6.1.2 Messpunkt südlich A71 bei Gispersleben.....	64
6.1.3 Messpunkt Stadtpark.....	64
6.2 MESSSTATIONEN DER TLUG (THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) .....	64
6.3 TEMPORÄRE, MOBILE MESSKAMPAGNE .....	64
6.3.1 Messroute Innenstadt.....	64
6.3.2 Messroute Nord.....	65
6.3.3 Messroute Süd .....	66
6.3.4 Vertikalsondierung (Drohnenaufstieg).....	67
6.4    AUSWERTUNG UND INTERPRETATION .....	68
6.5    THERMALAUFNAHME .....	73

<b>7.</b>	<b>KLIMAFUNKTIONSKARTE .....</b>	<b>76</b>
7.1	KLIMATOPE.....	76
7.2	KLIMAFUNKTIONSKARTE.....	90
7.3	BILANZIERUNG DER KLIMATOPE .....	92
<b>8.</b>	<b>ZUKUNFT .....</b>	<b>103</b>
8.1	KLIMAFUNKTIONSKARTE SZENARIO FLÄCHENNUTZUNGSPLAN.....	104
8.2	KLIMAFUNKTIONSKARTE SZENARIO KLIMAWANDEL .....	108
<b>9.</b>	<b>PLANUNGSHINWEISKARTE .....</b>	<b>111</b>
9.1	PLANUNGSERFORDERNISSE DER STADTKLIMARELEVANTEN TEILASPEKTE.....	112
9.1.1	<i>Thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte der Ist-Situation.....</i>	<i>113</i>
9.1.2	<i>Lokale Belüftung.....</i>	<i>114</i>
9.1.3	<i>Regionale Belüftung.....</i>	<i>115</i>
9.1.4	<i>Flächen ohne direkten Einfluss auf die Erfurter Kernstadt.....</i>	<i>116</i>
9.1.5	<i>Thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte (Szenario Klimawandel).....</i>	<i>117</i>
9.2	KLIMABEWERTUNGSKARTE .....	118
9.3	KLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISKARTE.....	120
<b>10.</b>	<b>KOMMUNIKATION UND CONTROLLING .....</b>	<b>128</b>
10.1	AKTEURSBETEILIGUNG UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT .....	128
10.2	CONTROLLING.....	129
<b>11.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>131</b>
<b>12.</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>136</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung einer Stadtklimakarte (Lohmeyer 2008). .	18
Abbildung 2: Schema "Thermischer Wirkungskomplex". Dargestellt sind die unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken. Durch planerische Eingriffe können diese Bedingungen beeinflusst werden.....	20
Abbildung 3: Tagesgang der Lufttemperatur (oben) und des PET (unten) für verschiedene Stadtbereiche (Müller et. al. 2011).....	21
Abbildung 4: Jahresgang der Lufttemperatur an der Messstation Gefahrenschutzzentrum 2002-2014. ....	23
Abbildung 5: Häufigkeit einzelner Schwellenwerte (Sommertag, Heißer Tag, Schwüler Tag, Tropennacht) nach Jahren der Messstation Gefahrenschutzzentrum.....	24
Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung von Trockentagen, Regentagen und Starkregentagen pro Monat für den Zeitraum 1981-2010 an der Station Flughafen Erfurt-Weimar.....	25
Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsklassen für den Zeitraum 1981-2010 an der Station Flughafen Erfurt-Weimar.....	26
Abbildung 8: Häufigkeit von Dürremonaten in der Vegetationsperiode (März bis Oktober) pro Jahr, Anteil der Monate (März bis Mai) ist gelb schraffiert (Datensatz der Station Erfurt-Weimar).....	27
Abbildung 9: Windrose an der Station Flughafen Erfurt-Weimar 1981-2010.....	28
Abbildung 10: Häufigkeit von Schwachwindsituationen an der Station Flughafen Erfurt-Weimar (1995-2014) und im Erfurter Becken (2005-2014, Messstation Globus). ....	29
Abbildung 11: Inversion und Dunstglocke über dem Erfurter Stadtgebiet (mit Blick nach Norden)..	30
Abbildung 12: Schematische Darstellung der vertikalen Erstreckung mit Durchmischung bei Inversionen im Erfurter Becken.....	31
Abbildung 13: Stündliche Feinstaubkonzentrationen (PM10; <10µm) an den Messstationen (Krämpferstr., Bergstr. und Hummelshain) bei innerstädtischer (oben) und überregionaler (unten) Inversion .....	32
Abbildung 14: Vertikale und horizontale Struktur des Stadtklimas. ....	33
Abbildung 15: Häufigkeit von Ausbreitungsklassen nach Klug-Manier (in %).....	34
Abbildung 16: Inversionshäufigkeiten (2002-2014) pro Jahr für innerstädtische Inversionen dargestellt als Frühinversion (rosa) und ganztägige Inversion (rot); Überschreitungstage pro Jahr des Feinstaub- Tagesgrenzwertes von 50 µg/m <sup>3</sup> für die Messstationen Krämpferstr. (hellgrau) und Bergstr. (dunkelgrau) .....	35
Abbildung 17: Inversionshäufigkeiten (1995-2014) pro Jahr für überregionale, großräumige Inversionen als Frühinversion (rosa) und ganztägige Inversion (rot);.....	35
Abbildung 18: Auswertung der Großwetterlage "Hochdruckbrücke Mitteleuropa" für das Sommerhalbjahr April-September im Zeitraum von 1881 bis 2015 (unten) und mittlere Luftdruckanomalie der Großwetterlage "Hochdruckbrücke Mitteleuropa" (oben) .....	37

Abbildung 19: Belüftungsrelevante Klimaräume und Klimafunktionen für das Erfurter Becken. ....	40
Abbildung 20: Vergleich der Lufttemperatur der Rekordsommer 2003, 2015 und dem langjährigen Mittel 1981-2010 (jeweils angegeben als Tagesmittelwerte für den Zeitraum 01.06. bis 30.08.).....	41
Abbildung 21: Gegenüberstellung der fünf wärmsten und kühlfsten Sommer seit 1951 (links) und Vergleich Sommer 2015 im Umland und in der Stadt (rechts).....	42
Abbildung 22: Mittlere Tagesmaximumtemperatur im Sommer seit 1951 (links) und Vergleich der Tagesmaximumtemperatur im Sommer 2015 im Umland und in der Stadt (rechts).....	43
Abbildung 23: Heiße Tage im Sommer seit 1951 (links) und Vergleich der Anzahl Heiße Tage im Sommer 2015 im Umland und in der Stadt (rechts). ....	43
Abbildung 24: Vergleich der Tropennächte im Sommer 2015 im Umland und in der Stadt. ....	44
Abbildung 25: Schematische Darstellung der angewandten Methode. ....	46
Abbildung 26: Blockmodell Erfurt (Ausschnitt, Blick auf Altstadt und Gründerzeitring aus südlicher Richtung).....	50
Abbildung 27: Themenkarte „Gebäudevolumen“.....	51
Abbildung 28: Solare Einstrahlung (Einstrahlleistung in $W/m^2$ ) mit geringen Werten (blau; z.B. verschattete Flächen) und hohen Werten (rot), Ausschnitt Innenstadtbereich und Bahnhof (1 Meter Auflösung); .....	53
Abbildung 29: Themenkarte „Solare Einstrahlung“.....	55
Abbildung 30: Kaltfluthöhe berechnet mit dem Kaltluftmodell des Deutschen Wetterdienstes KLAM_21. ....	57
Abbildung 31: Vertikales Windprofil über dem offenen Land, Vorstadt/Stadtrand und Innenstadtbereich (nach Robel et al., 1978). ....	58
Abbildung 32: Themenkarte „Bodenrauigkeit“.....	59
Abbildung 33: Themenkarte „Hangneigung“.....	61
Abbildung 34: Lage der temporären und kontinuierlichen Messorte im Erfurter Stadtgebiet.....	63
Abbildung 35: Mobiler umweltmeteorologischer Klimamesswagen MUK.....	65
Abbildung 36: Mobile umweltmeteorologische Messstation.....	65
Abbildung 37: Höhenlagen der Profilmessung. ....	66
Abbildung 38: Standorte der Messroute Süd (v.l.): Flughafen (Airport Hotel), Hauptbahnhof (Willy-Brandt-Platz), Am Wiesenhügel (Straßenbahn Wendeschleife) .....	66
Abbildung 39: Drohnenaufstieg, Verlängerung Ruhrstraße Erfurt.....	67
Abbildung 40: Tagesgang der Lufttemperatur an unterschiedlichen Messpunkten in Erfurt "Südlich A71" (blau), "Stadtpark" (grün), "Baumarkt" (grau), TLUG Krämpferstraße (gelb) und TLUG Bergstraße (orange) während einer heißen Periode 01.07. bis 04.07.2015.....	69

Abbildung 41: Darstellung der Messergebnisse mit angedeuteter schematischer Interpretation (Tagsituation).....	71
Abbildung 42: Darstellung der Messergebnisse mit angedeuteter schematischer Interpretation (Nachtsituation).....	72
Abbildung 43: Landoberflächentemperaturen am 19.07.2015 um 12:09 Uhr Ortszeit.....	75
Abbildung 44: Gewässerklimatop am Beispiel Nordstrand: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	77
Abbildung 45: Freilandklimatop am Beispiel der Felder zwischen Salomonsborn und Marbach: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	78
Abbildung 46: Waldklimatop am Beispiel Willroder Forst: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	79
Abbildung 47: Klimatop innerstädtischer Grünflächen am Beispiel der Nördlichen Geraaue: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	80
Abbildung 48: Vorstadtklimatop am Beispiel der Ringelbergsiedlung: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	81
Abbildung 49: Stadtrandklimatop am Beispiel Gispersleben: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	82
Abbildung 50: Stadtklimatop am Beispiel Gründerzeitring: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	83
Abbildung 51: Innenstadtklimatop am Beispiel Bahnhofsviertel/Altstadt: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	84
Abbildung 52: Gewerbe-/Industrieklimatop am Beispiel Güterverkehrszentrum: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	85
Abbildung 53: Gleisanlagenklimatop am Beispiel Gleisanlagen nördlich der Weimarischen Straße: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2).....	86
Abbildung 54: Kaltluftbahn/-abflussrichtung am Beispiel westlich des Willroder Forstes (Blick aus West): Luftbild (links) und Ausschnitt aus der dynamischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2); farbliche Kartengrundlagen: Digitales Oberflächenmodell (rechts).....	87
Abbildung 55: Luftleitbahn am Beispiel der südlichen Erfurter Seen (Sulzer See und Stotternheimer See): Luftbild (links) und Ausschnitt aus der dynamischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2); farbliche Kartengrundlage: Digitales Oberflächenmodell (rechts).....	88



Abbildung 56: Durchlüftungsbahn am Beispiel der Geraaue, der Magdeburger Allee und Gleisanlagen (der Strecke Erfurt – Nordhausen): Luftbild (links) und DGM-Ausschnitt aus der dynamischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2); farbliche Kartengrundlage: Digitales Oberflächenmodell (rechts).....	89
Abbildung 57: Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt Erfurt. ....	90
Abbildung 58: Legende der Klimafunktionskarte.....	91
Abbildung 59: Beispiellegende der Flächenbilanzierung Landeshauptstadt Erfurt .....	92
Abbildung 60: Übersicht der Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt.....	93
Abbildung 61: Einstufung der Stadtteile nach den Kriterien Überwärmungsgrad, Exposition und Anfälligkeit .....	96
Abbildung 62: Bewertungsschema für die Stadtteile .....	97
Abbildung 63: Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt Erfurt - Szenario Flächennutzungsplan. ....	105
Abbildung 64: Differenzkarte Klimafunktionskarte Ist-Situation zur Klimafunktionskarte Szenario Flächennutzungsplan.....	107
Abbildung 65: Klimaszenarien und prognostizierter globaler Temperaturverlauf (IPCC 2007).....	108
Abbildung 66: Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt Erfurt - Szenario Klimawandel.....	109
Abbildung 67: Thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte der Ist-Situation .....	113
Abbildung 68: Lokale Belüftung.....	114
Abbildung 69: Regionale Belüftung.....	115
Abbildung 70: Flächen ohne direkten Einfluss auf die Erfurter Kernstadt .....	116
Abbildung 71: Thermische Klassifizierung der Klimafunktionskarte (Szenario Klimawandel) .....	117
Abbildung 72: Klimabewertungskarte der Landeshauptstadt Erfurt.....	118
Abbildung 73: Klimatische Planungshinweiskarte der Landeshauptstadt Erfurt.....	125
Abbildung 74: Zusammengefasste Planungsempfehlungen der Planungshinweiskarte im Maßstab 1 : 10 000 .....	126
Abbildung 75: Zusammengefasste Planungsempfehlungen der Planungshinweiskarte im Maßstab 1 : 10 000 .....	127

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Steuerungsinstrumente für die Planung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und entsprechende Fachbeiträge.....	14
Tabelle 2: Bereiche von Hitzestress in Abhängigkeit des Bewertungsindex PET (Katzschner et al., 2010).....	21
Tabelle 3: Schwellenwerte der Lufttemperatur zur Charakterisierung des Klimas.....	24
Tabelle 4: Übersicht der Stabilitätsklassen nach Klug-Manier (TA Luft).....	34
Tabelle 5: Tabellarische Übersicht zu den jährlichen Inversionshäufigkeiten (1995-2014) analog zu den Abbildungen 16 und 17.....	38
Tabelle 6: Digitale Eingangsdaten.....	45
Tabelle 7: Flächenbilanzierung der Klimatope bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt.....	94
Tabelle 8: Bevölkerungsstatistik und Überwärmungsgrad bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt (Teil 1 - städtische Gebiete und Plattenbau).....	98
Tabelle 9: Bevölkerungsstatistik und Überwärmungsgrad bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt (Teil 2a – dörfliche Gebiete).....	99
Tabelle 10: Bevölkerungsstatistik und Überwärmungsgrad bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt (Teil 2b – dörfliche Gebiete).....	100

## 1. Hintergrund

Der fortschreitende Klimawandel ist mit nicht mehr abwendbaren Folgen verbunden (z.B. Zunahme von Hitzeperioden). Die Reduktion von Treibhausgasen (Klimaschutz) kann diese Folgen nur noch auf lange Sicht begrenzen. Um den zahlreichen Auswirkungen des Klimawandels (z.B. erhöhte Hitzebelastungen) Rechnung zu tragen, ist eine Anpassung an die Klimafolgen erforderlich. Wirksame Anpassungsmaßnahmen sind insbesondere für Städte zu entwickeln, da sich der Klimawandel hier stärker auswirkt als auf dem freien Land. Mehr als Dreiviertel der Erfurter wohnen in städtisch geprägten Ortsteilen in der Kernstadt. Die lokalklimatischen Bedingungen in der Kernstadt unterscheiden sich erheblich vom Umland und den dörflich geprägten Ortsteilen. Das Erfurter Stadtklima ist z.B. geprägt durch geringere Windgeschwindigkeiten und höhere Temperaturen (Wärmeinsel). Auch die Emissionslast ist aufgrund der dichteren Nutzung (Verkehr, Heizbedarf) höher.

Die rechtliche Grundlage der Notwendigkeit stadtklimatischer Erhebungen im Planungsprozess, auch vor dem Hintergrund des projizierten globalen Klimawandels, stellt neben dem Raumordnungsrecht insbesondere das Baugesetzbuch (BauGB) dar. Gemäß BauGB § 1 Absatz 5 Satz 2 sollen Bauleitpläne u. a. dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern sowie den Klimaschutz und die **Klimaanpassung**, insbesondere auch in der **Stadtentwicklung**, zu fördern. Gemäß BauGB § 1 Absatz 6 Ziffer 7 sind bei der Aufstellung von Bauleitplänen u. a. insbesondere die Schutzgüter „Luft“ und „Klima“ zu berücksichtigen. Entsprechend sind Fachinformationen aus Stadtklimakarten und den daraus abgeleiteten Planungshinweisen in der Bauleitplanung anzuwenden.

Die erste gesamtstädtische Klimaanalyse wurde im Jahr 1993 durchgeführt. Seitdem hat sich Vieles an der städtischen Struktur (durch Bautätigkeiten, Flächenumnutzung sowie Rückbaumaßnahmen) geändert, so dass eine Neubewertung unter Berücksichtigung des Stadtklimas notwendig wurde. Der Stadtrat hatte dazu das Umwelt- und Naturschutzamt beauftragt, die gesamtstädtische Untersuchung durchzuführen, um eine Planungsgrundlage für die Stadtplanung zu erarbeiten und somit eine resiliente Stadtentwicklung zu fördern. Dazu wurden mit Beschluss vom 22.10.2014 (Drucksache 1604/14) die finanziellen Mittel anteilig bereitgestellt. Gefördert wurde das Projekt "Klimagerechtes Flächenmanagement für die Landeshauptstadt Erfurt" im Rahmen eines Klimaschutz - Teilkonzeptes der Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen der Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Das Institut für Klima- und Energiekonzepte (INKEK, Schillerstrasse 50, 34253 Lohfelden) wurde beauftragt, diese Klimaanalyse für die Landeshauptstadt Erfurt durchzuführen.

## 2. Einleitung

### 2.1 Aufgabenstellung

Die angewandte Stadtklimatologie befasst sich seit geraumer Zeit mit Analysemethoden, die direkte Grundlagen für eine Vielzahl planerischer Fragestellungen hervorbringen. Das **Stadtklima** setzt sich dabei aus zwei Komponenten zusammen, da es sowohl durch thermische als auch lufthygienische Aspekte geprägt wird. Starken Einfluss nimmt dabei der Mensch, da durch den Eingriff und die Veränderung der Umwelt die klimatischen Bedingungen verändert werden. Ausgehend von einem hohen Versiegelungsgrad der Oberflächen, dem teilweise sehr geringen Vegetationsanteil, der Wärmespeicherfähigkeit der verwendeten Materialien sowie dem eingeschränkten Luftaustausch aufgrund der hohen Bodenrauigkeit stellt der städtische Raum im Vergleich zum Umland eine andere Ausgangslage dar.

Die Landeshauptstadt Erfurt ist wie andere Großstädte und Ballungsräume mit diesen klimatischen Veränderungen, hervorgerufen durch das Stadtklima, konfrontiert. Die topografische Lage der Stadt im Erfurter Becken (eingebettet im Thüringer Becken) schränkt die Belüftung deutlich ein. Bei speziellen Wetterlagen (z.B. Inversionswetterlagen) sind die Immissionswerte teilweise sehr hoch, sodass Anlass besteht, das Belüftungssystem sehr genau zu untersuchen.

Zur Analyse und Bewertung der lufthygienischen und thermischen Situation in Erfurt sind Untersuchungen zu folgenden Schwerpunkten notwendig:

- Ausprägung der städtischen Wärmeinsel
- Bedingungen für den Luftaustausch (z.B. Wind- und Inversionsstatistik)
- Darstellung der Frisch- und Kaltluftversorgung
- Betrachtung zukünftiger, baulicher Veränderungen
- Berücksichtigung zukünftiger, klimatischer Änderungen

Aufgabe ist es ein Klimaanpassungskonzept zu entwickeln, welches das lokale und regionale Klima, die Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels und der Flächennutzungsänderungen (Bebauungssituation) behandelt. Daraus werden Planungshinweise und Anpassungsmaßnahmen für Erfurt abgeleitet.

Abschließend steht der Stadt ein Klimaanpassungskonzept zur Verfügung, in dem planungsrelevante Aufgaben, Maßnahmen und Empfehlungen für eine **klimabewusste Entwicklung** bereitstehen.

## 2.2 Ziele der Stadtklimaanalyse

Über 75% aller Erfurter wohnen in städtisch geprägten Ortsteilen. Der Klimawandel wird sich in Ballungsräumen und innerstädtischen Gebieten verstärkt auswirken. Die Zunahme an austauscharmen Strahlungswetterlagen vermehrt den Hitzestress vor allem innerhalb windschwacher Stadträume. Somit sind der Wärmeinseleffekt und die Belüftung zu beachten, wie sich diese auf die Lufthygiene und den thermischen Komfort auswirken. Die Hitzewellen im Sommer 2003, im Juli 2006 und jüngst im Juli/August 2015 sind dafür eindrucksvolle Beispiele.

Damit **Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in Städten** zukünftig gesichert sind, muss die Stadtplanung schon heute städtebauliche Planungen so optimieren, dass die thermischen Belastungen unter extremen Hitzebedingungen sowohl im Freien als auch in den Innenräumen auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Praxistaugliche Planungsleitfäden werden auf unterschiedlichen Ebenen z.B. von Bundesländern (z.B. "Handbuch Stadtklima" in MUNLV NRW 2010), vom Bund (z.B. KlimaMORO in BMVBS/BBSR 2013) und der Forschung (KlimZUG BMBF-Projekt KLIMES in Katzschner, 2010) entwickelt. Diese Konzepte beinhalten, auf welche Weise in bestehenden städtischen Strukturen der Hitzestress für Menschen minimiert werden kann, sodass ihr thermischer Komfort in einem nicht erheblichen Ausmaß beeinträchtigt ist.

Richtlinien werden vor dem Hintergrund einer stadtplanerischen Anwendung erstellt, um mit **einheitlicher Untersuchungsmethodik** zur Ergebnisdarstellung und zur Bewertung des Stadtklimas zu kommen. Bei der Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene im Bereich der Stadtplanung ist es von größter Bedeutung, nicht nur auf die Darstellung der großräumigen mittleren klimatischen Verhältnisse einzugehen, sondern die differenzierte Betrachtung der einzelnen innerstädtischen Kleinklimate einschließlich ihrer gegenseitigen Wechselwirkungen zu bewerten. Das Mesoklima wird dem Stadtentwicklungsplan (z.B. ISEK) und dem Flächennutzungsplan (FNP) im Maßstab 1:25.000 bis 1:10.000 zugeordnet, während die Bauleitplanung im Maßstab von 1:2.000 im mikroklimatischen Bereich bearbeitet werden muss (vgl. Tab. 1).

**Klimaanalysen** und Stadtklimakarten werden deshalb **vor dem Hintergrund der Stadtentwicklungsprozesse** gesehen, wie sie sich in wachsenden oder auch schrumpfenden Städten darstellen. Damit verbunden ist die Tendenz, innerstädtisches Wohnen attraktiver zu machen und die verdichtete Stadt gegenüber der Ausbreitung des Stadtraumes vorzuziehen – dabei jedoch Ausgleichs- und Belüftungsstrukturen zu erhalten und ggf. zu schaffen. Stadtplanungsziele und Planungsebenen sind mit den klimatischen Bewertungsmethoden in ihrer räumlichen, zeitlichen und quantitativen Beschreibung und Festlegung zusammenzuführen. Überall dort, wo dies bereits geschehen ist, wie in den Regionalplänen als Flächen für schützenswerte Klimafunktionen oder in den Stadtentwicklungs- und Flächennutzungsplänen als Überwärmungsbereiche, Frischluftversorgung und Luftleitbahnen, sollen die Funktionen mit Planungsmaßgaben belegt werden (vgl. aktueller FNP-Bioplan Nr. 15 Umwelt-Klima).

Tabelle 1: Steuerungsinstrumente für die Planung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und entsprechende Fachbeiträge.

Instrumente und Pläne		Maßstab, räumliche Auflösung der Karten	Fachbeiträge Klimaanalyse (Lufthygiene und Human-Biometeorologie)
Raumordnungs- planung	Regionalplan	1 : 50.000 bis 1 : 100.000, ≥ 100 m	Mesoklima Klimaanalysekarten: flächendeckende Immissionsschutzkarten, thermische Belastungsräume (Überwärmungsräume), Luftleitbahnen, Kaltluftentstehungsflächen Planungshinweiskarte
Bauleitplanung	Vorbereitende Bauleitplanung: Flächennutzungsplan	1 : 5.000 bis 1 : 25.000, 25 m bis 100 m	Mesoklima Klimaanalysekarten: gebietsbezogene Immissionskarten, Luftaustausch, thermische Belastungsräume (Überwärmungsräume), Luftleitbahnen, Kaltluftentstehungsflächen Planungshinweiskarte
	Verbindliche Bauleitplanung: Bebauungsplan, Baugenehmigungs- verfahren	≤ 1 : 1.000, 2 m bis 10 m	Mikroklima Klimaanalysekarten: lokale Immissionsberechnungen an Hot Spots, Nachbarschaftsbetrachtungen, Luftaustausch, human- biometeorologische Eignungsuntersuchungen an Hot Spots Planungshinweiskarte

Stadtklimatologie erstreckt sich über die Bereiche Stadtplanung und Architektur, Gebäude- und Bauleitplanung sowie Quartiers- und Stadtentwicklungsplanung. Sie unterstützen den Anwender bei der Bewertung der thermischen und lufthygienischen Situation und der Auswirkung von Flächenumwandlung, Verdichtungen, Konversionsmaßnahmen, Stadtrückbau und Einzelgebäuden. Die Berücksichtigung des Klimas in der Stadtplanung erfordert eine detaillierte Kenntnis der Wechselwirkungsprozesse zwischen den städtischen Faktoren und der Atmosphäre. Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit von der Stadtplanungsebene als Karten in unterschiedlicher, räumlicher Auflösung dargestellt. Festlegungen von Untersuchungsmethoden und die Bewertung der Ergebnisse für den thermischen und lufthygienischen Wirkungskomplex sind abhängig von der Planungsebene und den verfügbaren Daten. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat sich zur Aufgabe gestellt, **Richtlinien** zu normieren und **Verfahren zur Erstellung von Klimakarten** einheitlich zu regeln, um sie vergleichbar mit anderen Städten zu machen.

Hierzu existieren einschlägige VDI Richtlinien:

„Planungsrelevante Stadtklimatologie“, RL 3785 Blatt 1, „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“, RL 3787 Blatt 1, in denen folgende

stadtklimatisch relevanten Fragestellungen dargestellt werden, wie sie auch in den EU Guidelines zum 5. Rahmenprogramm entwickelt wurden:

- räumliche Ausprägung und Häufigkeit des Luftmassenaustauschs (Be- und Entlüftung) und deren Eintrittshäufigkeit;
- räumlich zeitliche Ausprägung der thermischen und lufthygienischen Aspekte des Stadtklimas bzw. Auftreten von thermischen Belastungen (Besonnungs-, Verschattungsverhältnisse);
- räumliche Darstellung und Bewertung der Ausgleichs- und Belastungsräume;
- energetische Optimierung durch Standortbestimmung aus der Stadtklimaanalyse mit Überwärmungsräumen, Kaltluftgebieten und Baudichte.

Die Aufgabe einer planungsbezogenen Stadtklimatologie ist die Verbesserung der lufthygienischen und thermischen Bedingungen (Katzschner 2004):

- Abbau von Wärmeinseln (Klimasanierung in der Wärmeinsel als Indiz für den thermischen Komfort), Freiraumplanung;
- Optimierung der städtischen Belüftung (Luftaustausch, Luftleitbahnen), Stadtplanung und Stadtentwicklung für die Lufthygiene und den thermischen Komfort;
- Vermeidung von Luftstagnation bei Inversionswetterlagen, Vermeidung von Barrieren für den Luftaustausch;
- Erhaltung und Förderung von Frischluft- oder Kaltluftentstehungsgebieten für den Luftaustausch und somit zur Verbesserung bzw. Beibehaltung der lufthygienischen Situation.

Auf Grundlage dieser Erhebungen können räumliche Festlegungen in einer verbindlichen Planung erfolgen. Festlegungen können sein: das Freihalten von Kalt- bzw. Frischluftentstehungsflächen (Hanglagen) und von Luftleitbahnen, Gebäudeausrichtung, Höhe und Bebauungsdichte.

Solche Aussagen können im **Integrierten Stadtentwicklungskonzept** (ISEK) berücksichtigt werden oder aber in Festlegungen gemäß Baugesetzbuch (BauGB) § 1a in der **Bauleitplanung** erfolgen. Darüber hinaus sind aufgrund der Stadtklimaanalysen im Flächennutzungsplan Darstellungen freizuhalten Flächen möglich. Ebenso kann überprüft werden, ob Festsetzungen in der Regionalplanung erfolgt oder notwendig sind. Klimabelange werden dort in die Planung der regionalen Grünzüge impliziert.

Planerisch gesetzliche Instrumente sind im „Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung“ (UVPG) und in der „strategischen Umweltprüfung“ (SUP) zu finden. Die Belange des Klimas können mithilfe von Stadtklimakarten (vgl. Kap. 3) auf die beschriebenen Eigenschaften qualitativ bewertet und in die Planungswerke (z.B. Flächennutzungsplan, Landschaftsplan) eingebaut werden.

## 3. Methodik

### 3.1 Stadtklimakarten

#### Klimafunktionskarte (KFK)

Eine Klimafunktionskarte stellt das Ergebnis eines klimaökologischen Gutachtens dar, welches für eine bestimmte geografische Verortung angefertigt wird. Hauptsächlich werden diese Gutachten für Ballungsräume und größere Städte erstellt. Für Erfurt wurde zur Erstellung der Klimafunktionskarte ein modellbasiertes, rechnergestütztes Verfahren eingesetzt. Die Vorgehensweise zur Generierung einer Klimafunktionskarte wird in VDI Richtlinien (insbesondere VDI RL 3787 Blatt 1) festgelegt. Die Anwendung der VDI Richtlinien macht eine Vergleichbarkeit zwischen Städten möglich.

Grundlage ist stets die Analyse der Ist-Situation, also eine möglichst **präzise Abbildung der realen Klimafunktionen im Untersuchungsraum**. Diese modellbasierte Analyse der Ist-Situation kann messtechnisch validiert werden. Die Analyse des planungsrechtlichen bzw. zukünftig erreichbaren Zustandes erfolgt in einem späterem Schritt (vgl. Kapitel 8). Für eine komplexe Abbildung der Ist-Situation ist eine entsprechende Datenbasis Grundvoraussetzung.

Aus klimaökologischen Gesichtspunkten sind Faktoren, wie Höheninformationen und Fließgewässer ein erster Anhaltspunkt, um die natürlichen Bedingungen abzubilden. Analog hierzu spielen natürlich die anthropogenen Einflüsse eine entscheidende Rolle. Gerade in den Städten hat die vom Menschen verursachte Veränderung der Erdoberfläche den größten und in den meisten Fällen auch negativsten Einfluss. Deshalb werden ebenso Daten bezüglich der Flächennutzung und Gebäudeinformationen benötigt. Je detaillierter die Eingangsdaten vorliegen, umso präziser und kleinteiliger können die computergestützten Analysen ausfallen.

Neben diesen Geoinformationen ist das Wissen um klimarelevante Parameter von Bedeutung. Besonders die Belüftung eines verdichteten Stadtgebietes, der eine positive Wirkung nachweisbar ist, hängt von der Lage in Bezug auf das regionale Windzirkulationssystem ab. Aber auch lokale und kleinräumige Windzirkulationen entwickeln sich durch physikalische Prozesse und können im Rahmen einer Klimafunktionskarte berechnet werden. Weitere Klimaparameter lassen sich durch die geografische Lage des Untersuchungsraumes ableiten.



Für die Klimafunktionskarte werden in der Stadt Erfurt die klimatisch funktionalen Zusammenhänge analysiert, um Grundlagen für die räumliche Interpretation zur Klimawirkung von Vegetation, Baudichten bzw. Bauhöhen zu erreichen. In der generierten Klimafunktionskarte können die klimatischen Wechselwirkungen der Klimatope (d. h. Gebiete ähnlicher mikroklimatischer Ausprägung; vgl. Kap. 3.3 und 7.1) sowie lokale und regionale dynamische Prozesse (z.B. Luftleitbahnen, Kalt- und Frischluftabflüsse) abgelesen werden. Auf diese Weise werden flächenbezogene Aussagen ermöglicht.

Besonders gut prägen sich lokalklimatische Besonderheiten in einer Stadt aus, wenn spezielle, meteorologische Rahmenbedingungen (**autochthone Wetterlage**) vorherrschen. Die autochthonen Wetterlagen, bei denen das Stadtklima beurteilt wird, stellen sich wie folgt dar:

*Für das Erkennen von lokalklimatischen Einzelheiten geeignete Wetterlagen sind von hohem Luftdruck geprägt, bei denen nur geringe Windgeschwindigkeiten auftreten und nur geringe oder keine Bewölkung vorhanden ist. Die geringe Windgeschwindigkeit verhindert die Zufuhr von neuen Luftmassen: innerhalb einer einheitlichen Luftmasse erreichen die lokalklimatischen Eigenheiten ihre größten Gegensätze. Geringe oder fehlende Bewölkung bewirkt einen sehr ausgeprägten Tagesgang nahezu aller Klimaelemente, z. B. Temperatur, Feuchte und Wind.*

Unter diesen Rahmenbedingungen bilden sich bioklimatische und lufthygienische Gunst- und Belastungsräume kleinräumig differenziert aus. Durch die hohen Temperaturunterschiede zwischen kühlen Freiflächen im Umland und wärmeren Bereichen in der Kernstadt ist auch die Ausbildung eigenbürtiger Lokalwindssysteme (z.B. Kaltluftströmungen) für diese Wetterlage charakteristisch.

### Planungshinweiskarte (PHK)

Um die Integration der Ergebnisse in die Planungsprozesse reibungslos zu gestalten, wird aufbauend auf die Klimafunktionskarte (KFK) eine Planungshinweiskarte (PHK) abgeleitet, in der die analysierten und vielschichtigen Ergebnisse zusammengefasst werden. Durch die vereinfachte Darstellung ist es möglich, schnell und eindeutig eine Einschätzung der klimatischen Bedeutung einer Fläche zu erhalten. Auf Basis eines Katalogs mit Planungsempfehlungen können fundierte und lokal abgestimmte Maßnahmen direkt den Flächen zugeordnet werden.

Die Vorgehensweise erfolgt nach der VDI RL 3787 Blatt 1 (Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Sept 2015):

„In der vorliegenden Richtlinie wird beschrieben, wie stadtklimatische Sachverhalte in Karten dargestellt, bewertet und über daraus abgeleitete Hinweiskarten für die Planung nutzbar gemacht werden können.

Bei den in dieser Richtlinie beschriebenen Klimaanalyse- und Lufthygienekarten handelt es sich um thematische Fachkarten, deren Inhalte entscheidend für die praktische Raumanalyse und sachgerechte Durchführung von Planungsprozessen sind.

Diese Karten stellen eine wichtige **Grundlage für die klimagerechte Flächennutzungs- und Bauleitplanung** auf kommunaler und regionaler Ebene dar und gewinnen im Zuge des Klimawandels und der Umweltgerechtigkeit zunehmend an Bedeutung.

Hinsichtlich der dargelegten Aspekte zur Human-Biometeorologie wird auf die Richtlinien VDI 3785 Blatt 1 (Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima) und VDI 3787 Blatt 2 (Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima) verwiesen, die wichtige, im Rahmen von Bewertungen der Wärmebelastung zu berücksichtigenden Faktoren ausführlich beschreiben und zudem die Grundlage dieser Richtlinie darstellen.“

### 3.2 Verfahrensweise zur Erstellung von Klimafunktionskarten

Bei der Verknüpfung verschiedenster Sachinformationen ist die Gewichtung bzw. die Einflussnahme der einzelnen Faktoren von großer Bedeutung. Da diese Faktoren aus klimatischen Gründen von Untersuchungsraum zu Untersuchungsraum unterschiedlich sind, besteht derzeit noch kein automatisiertes System zur Erstellung einer Klimafunktionskarte (Lohmeyer, 2008).

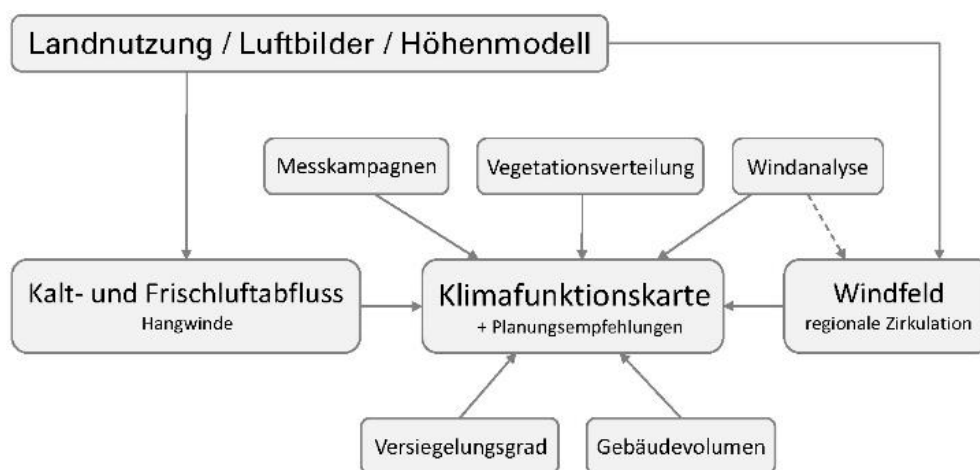


Abbildung 1: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung einer Stadtklimakarte (Lohmeyer 2008).

Klimatische Rahmenbedingungen sind sehr heterogen, was durch die geografische Lage, der absoluten Höhe über dem Meeresspiegel des Untersuchungsgebietes oder durch eine kontinentale bzw. maritime Beeinflussung verursacht wird. Neben diesen übergeordneten Faktoren gibt es eine Vielzahl kleinräumiger Einflüsse. Auf einer

kleineren Skala können unterschiedliche Effekte, wie Binnenseen oder Tallagen, die örtlichen klimatischen Verhältnisse stark prägen. Somit ist eine vorgeschaltete klimatische Einschätzung unumgänglich, wobei entsprechend ein größerer Ausschnitt als der abgegrenzte Untersuchungsraum zu betrachten ist.

Nach der Gruppierung von Geoinformationen in Form von Themenkarten (z.B. Landnutzung, Hangneigung; vgl. Kap. 5) in die beiden klimatischen Komponenten Dynamik und Thermik, die beide unterschiedlichen Einfluss auf die jeweiligen Ebenen des Stadtklimas haben, wird durch geeignete Funktionen und anschließende Generalisierungen das Produkt in Form der Klimafunktionskarte aggregiert.

Die **dynamische Komponente** beinhaltet die Luftbewegungen und damit die Frischluft- und Kaltluftabflüsse, die physikalisch bedingt, auch ohne Antrieb der regionalen Strömungsbedingung entstehen und der Hauptwindrichtung, die bei entsprechenden Wetterlagen die Zirkulation bestimmt. Eine zusätzliche, entscheidende Themenkarte der Dynamik ist die Einflussnahme der Hangwinde. Diese Strömungen entstehen durch das Berg-Tal-Windsystem, das tagesperiodisch auftritt und gerade bei einem ausgeprägten Relief an Mächtigkeit gewinnen kann (Häckel, 1985). Die entsprechende Themenkarte wurde auf Grundlage des Digitalen Geländemodells (DGM) und der Strömungsmessdaten angefertigt. Weitere Kriterien wie Rauigkeitslängen der Erdoberfläche wurden ebenfalls in diese Rechenschritte integriert, um das Belüftungssystem realgetreu darzustellen und die tatsächlichen Wirkungsgrade mit Hilfe der Messdaten zu kalibrieren.

Das klimatische Wechselspiel beinhaltet neben der Belüftungssituation die thermischen Eigenschaften der Erdoberfläche. Da diese **thermische Komponente** die Basis darstellt und dementsprechend flächendeckend kartiert sein muss, wurde als Grundlage die aktuelle Realnutzungskartierung verwendet, um eine Kategorisierung vornehmen zu können. Dieser detaillierte Eingangsdatensatz wird mit weiteren Themenkarten ergänzt, wobei der Oberflächenversiegelungsgrad Aufschluss über die Wärmespeicherkapazität gibt und Freiflächen mit niedriger Oberflächenrauigkeit Kaltluftentstehungsflächen darstellen. In diesem Zusammenhang ist die Albedo (Rückstrahlvermögen) der Oberfläche eine zentrale Größe, da unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsverhalten maßgeblich den Wärmehaushalt der städtischen Grenzschicht bestimmen (Oke, 2006). In diesem Themenfeld ist der Effekt der Wärmeinsel in der Stadt besonders gut erkennbar, denn durch die Erwärmung der künstlichen Baumaterialien, gekoppelt mit der hohen Wärmespeicherleistung und der langsamen Abkühlrate, werden gerade in den Nachtstunden höhere Lufttemperaturen als im unbebauten Umland verursacht (Hupfer & Kuttler, 1998; Baumüller et. al, 1995). Für die Ausweisung von Flächen thermisch ähnlicher Bedingungen in Form von Klimatopen wird ein stadtklimatischer Bewertungsindex (Kap. 3.3) herangezogen.

### 3.3 Stadtklimatischer Bewertungsindex

Innerhalb einer Kommune bestehen in verschiedenen Räumen (z.B. Freiland, Wald, Vorstadt, Innenstadt) ungleiche Klimabedingungen (z.B. strahlungsexponierte Lage, thermischer Tagesgang, Windfeldstörungen). Sind diese mikroklimatischen Bedingungen ähnlich ausgeprägt, lassen sich diese zu räumlichen Einheiten, den **Klimatopen** zusammenfassen. Grundlage der analysierten Klimatope bzw. deren Abgrenzungen in der Klimafunktionskarte (siehe Kapitel 7.1), bildet der **stadtklimatische Bewertungsindex**, die sogenannte „physiologisch äquivalente Temperatur“ (PET) (Höppe, 1999). Die Berechnung des PET erfolgt nach VDI RL 3787 Blatt 2.

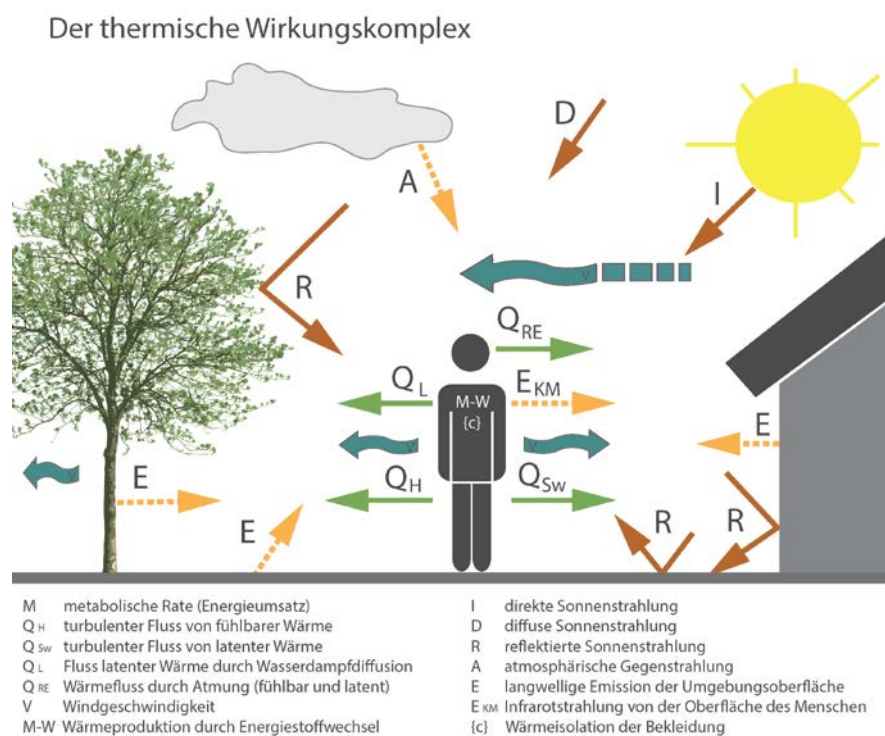


Abbildung 2: Schema "Thermischer Wirkungskomplex". Dargestellt sind die unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken. Durch planerische Eingriffe können diese Bedingungen beeinflusst werden.

Die biometeorologische Kenngröße PET beschreibt unter Berücksichtigung der thermophysiological Zusammenhänge das thermische Empfinden des Menschen (Brandenburg und Matzarakis, 2007) und ist somit eine **physikalische Kenngröße für das Wohlbefinden**, das vom thermischen Wirkungskomplex abhängig ist (Abb. 2). Dabei liegt das Behaglichkeitsniveau bei einem PET-Wert von 24°C. Neutralität herrscht dann, wenn so viel Wärme vom menschlichen Körper aufgenommen wird, wie selbstständig wieder abgegeben werden kann. Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, werden die PET-Werte (angegeben in °C) in Abhängigkeit des Stressniveaus auf den Menschen in die Kategorien der Tabelle 2 eingeordnet. In Abbildung 3 werden exemplarisch die Tagesgänge der Lufttemperatur und der zugehörigen PET-Werte für verschiedene Stadtgebiete/Klimatope gegenübergestellt.

Tabelle 2: Bereiche von Hitzestress in Abhängigkeit des Bewertungsindex PET (Katzschner et al., 2010).

PET (°C)	subjektives Empfinden	Stressniveau
> 42	sehr heiß	extremer Hitzestress
35 - 41	heiß	starker Hitzestress
29 - 34	sehr warm	moderater Hitzestress
25 - 28	warm	schwacher Hitzestress
18 - 24	neutral	kein thermischer Stress
13 - 17	kühl	schwacher Kältestress
< 13	kalt	Kältestress

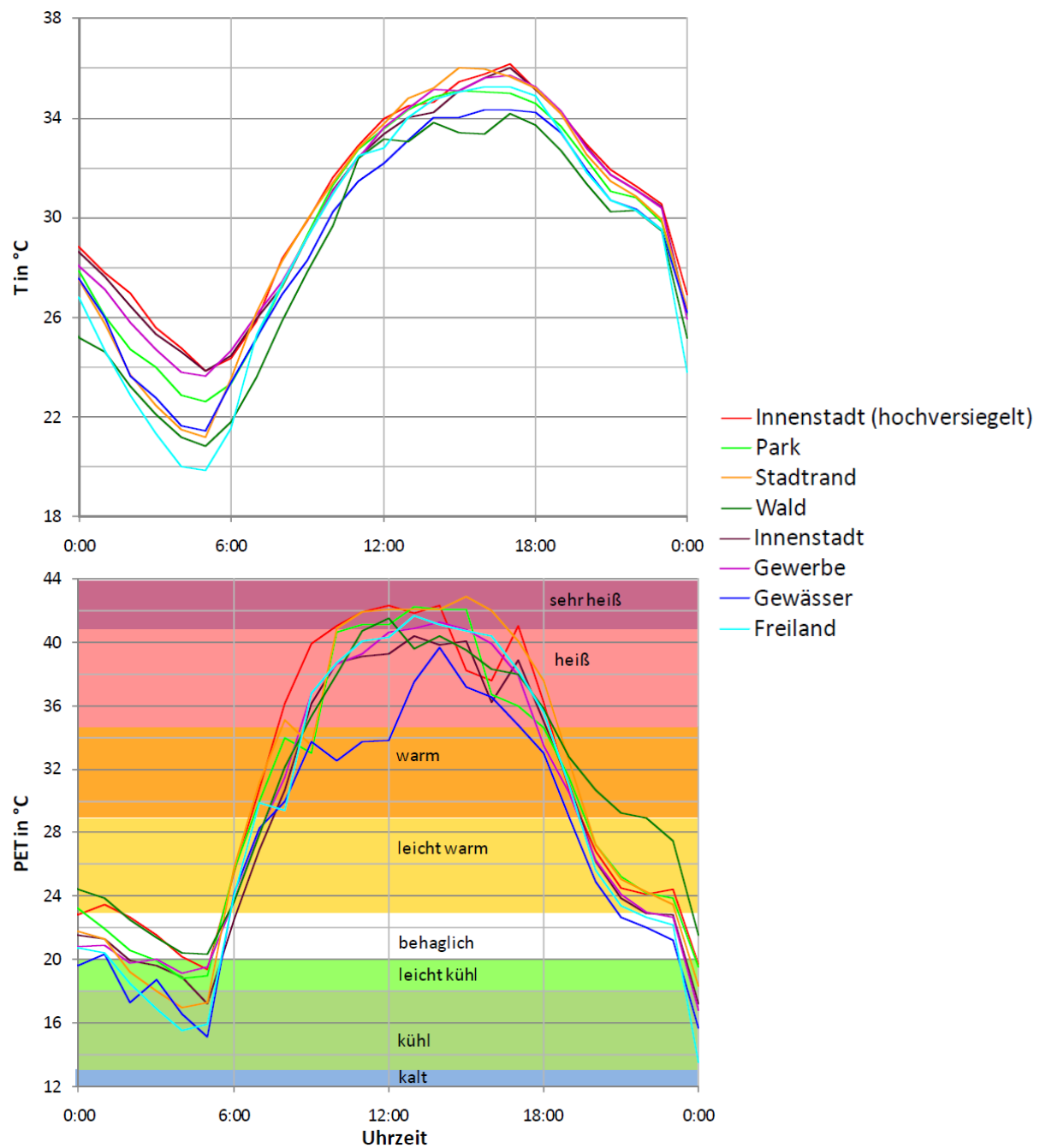


Abbildung 3: Tagesgang der Lufttemperatur (oben) und des PET (unten) für verschiedene Stadtbereiche (Müller et. al. 2011)

## 4. Lokale und regionale Klimaverhältnisse

Zur Diskussion um die Bedeutung einer Klimaanalyse sind die lokalen und regionalen Klimaverhältnisse wichtig. Von planerischer Bedeutung sind die

- **thermischen Verhältnisse** (Wärmeinsel Stadt)  
und die
- **dynamischen Verhältnisse** (Belüftungssituation im Sinne der horizontalen und vertikalen Durchmischung)

zu beachten. Daraus ergibt sich im Zusammenhang mit der Klimafunktionskarte die planerische Bewertung (Planungshinweiskarte) von einzelnen Flächen.

### 4.1 Meteorologische Verhältnisse im Raum Erfurt

Erfurt liegt in einer nach Norden offenen Mulde im Leebereich des Thüringer Waldes. Die Erfurter Mulde wird im Süden vom Steiger, Drosselberg und Haarberg und im Westen von den Fahner Höhen begrenzt. Nach Osten steigt das Gelände flacher zum Ringel-, Katzen- und Schwabenberg.

Die mittleren meteorologischen Verhältnisse sind somit in Tallagen, Hanglagen und Kuppenlagen zu unterscheiden, was die thermischen und dynamischen Bedingungen charakterisiert. Vor allem die städtischen Messwerte unterscheiden sich durch die niedrige Höhenlage von der Klimastation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Erfurt-Weimar.

Im langjährigen Jahresmittel (1981-2010) verzeichnet die Station Flughafen Erfurt-Weimar eine Lufttemperatur von ca. 8,5 °C, während die Stadtstationen mit ca. 10,5°C um durchschnittlich 2°C höhere Werte ausweisen. Dies erklärt sich aus der Eigenschaft der städtischen **Wärmeinsel**. Die Sonnenscheindauer von durchschnittlich 1.600 Stunden im Jahr ist ebenso beachtenswert, da sich hierüber die Wärmespeicherung der Stadt definiert.

Der Austausch frischer, kühler, unbelasteter Luft ist für das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung von entscheidender Bedeutung. Gegenüber dem Umland wird der Wind durch die Stadtstrukturen stark beeinflusst. Die Erfurter Muldenlage schränkt durch die windgeschützte Lage die Belüftungsbedingungen zusätzlich stark ein. Der **horizontale Luftaustausch** wird dadurch deutlich reduziert. Eine weitere Besonderheit des Erfurter Beckens ist die Förderung von Inversionen innerhalb der Mulde, die den **vertikalen Luftaustausch** verhindern.

## 4.2 Lufttemperatur

Die Auswertung der gemessenen Lufttemperaturen erfolgt unter Berücksichtigung der VDI RL 3786, Blatt 3 Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen – Lufttemperatur. Von der Messstation Gefahrenschutzzentrum sind dazu exemplarisch die Lufttemperaturen der letzten Jahre (2002-2014) entnommen, die den Jahresgang (Abb. 4) zeigen.

Zur Charakterisierung der durchschnittlichen Verhältnisse werden zunächst die Monatsmittel der Lufttemperatur ermittelt. Zur Erfassung der Schwankungsbreite der Lufttemperaturen werden darüber hinaus für jeden Monat die tiefsten und die höchsten registrierten Lufttemperaturen ermittelt. Mittelt man die monatsbezogenen Ergebnisse über die Jahre des jeweiligen Messzeitraums, so ergeben sich die dargestellten **mittleren Jahresgänge der Lufttemperatur** (grüne Kurve) und die Jahresgänge der über den Messzeitraum gemittelten monatlichen Lufttemperaturminima (violette Kurve) und –maxima (rote Kurve). Die Jahresgänge der über den Messzeitraum gemittelten täglichen Lufttemperaturminima (blaue Kurve) und –maxima (gelbe Kurve) spiegeln die durchschnittliche Maximum- und Minimumtemperaturen pro Tag je Monat wider.

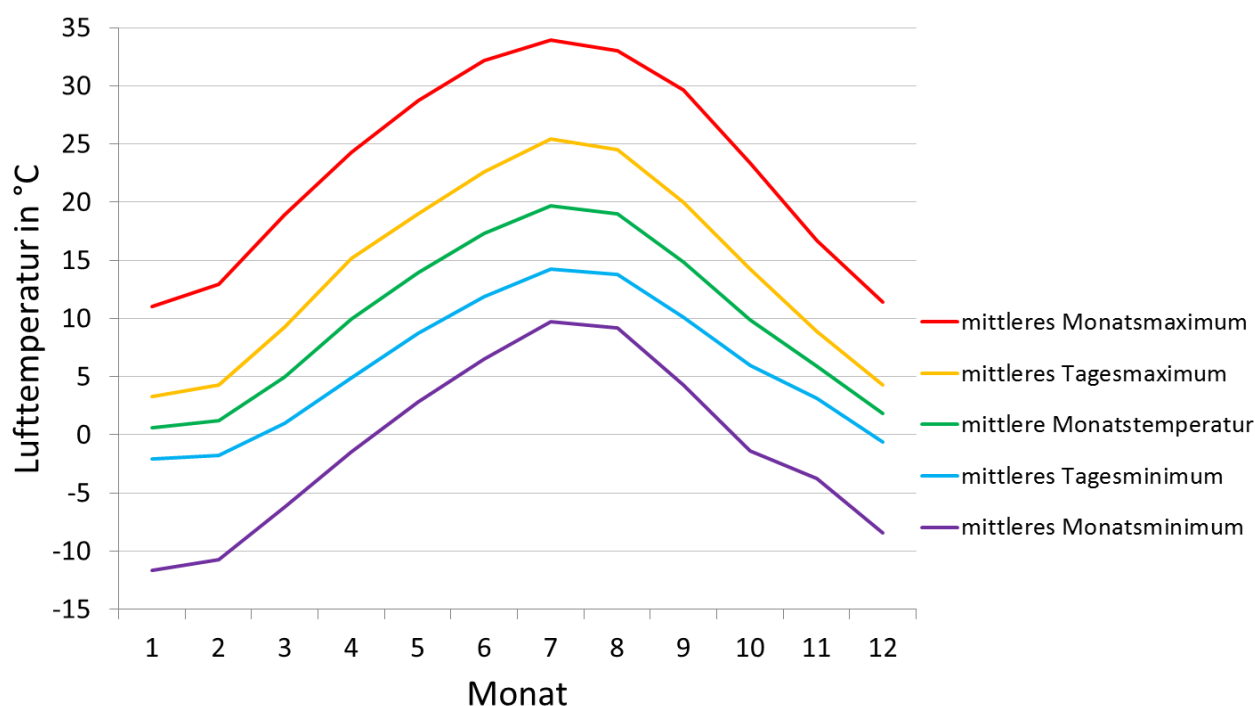


Abbildung 4: Jahresgang der Lufttemperatur an der Messstation Gefahrenschutzzentrum 2002-2014.

In Abbildung 5 werden für die Messstation Gefahrenschutzzentrum die thermisch ungünstigen Situationen der Sommermonate anhand von Kenngrößen der Lufttemperatur dargestellt. Hier sei auf die Schwellenwerte der **Tropennächte**, **Sommertage** und **heißen Tage** verwiesen (Tabelle 3). Heiße Tage treten jährlich auf, während die Tropennächte bisher nur periodisch vorkommen. Mit fortschreitendem Klimawandel ist in Zukunft mit einem zunehmenden Auftreten zu rechnen.

Tabelle 3: Schwellenwerte der Lufttemperatur zur Charakterisierung des Klimas.

<b>Heißer Tag</b>	Tag mit einem Höchstwert der Lufttemperatur (Tmax) von mindestens 30°C
<b>Sommertag</b>	Tag mit einem Höchstwert der Lufttemperatur (Tmax) von mindestens 25°C
<b>Tropennacht</b>	Nacht mit einem Tiefstwert der Lufttemperatur (Tmin) von mindestens 20°C
<b>Schwüler Tag</b>	Tag mit einem Höchstwert des Wasserdampfgehalts der Luft von mindestens 13,5g/m <sup>3</sup>

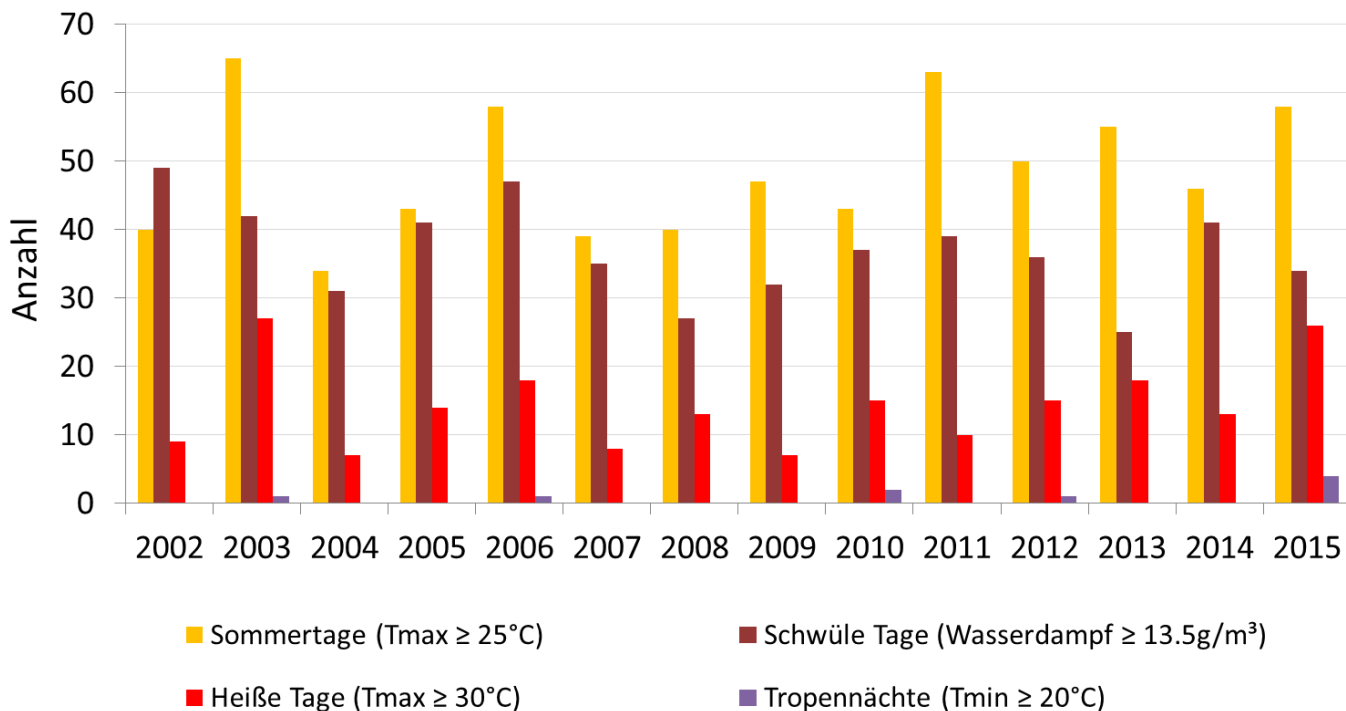


Abbildung 5: Häufigkeit einzelner Schwellenwerte (Sommertag, Heißer Tag, Schwüler Tag, Tropennacht) nach Jahren der Messstation Gefahrenschutzzentrum.

Thermische Belastungen für den Menschen sind eine komplexe Größe (Abb. 2) und nicht mit den gemessenen Lufttemperaturen gleichzusetzen. Hier werden andere Schwellenwerte, die thermophysiological (als PET-Wert) abgeleitet sind, definiert. Diese sind in Tabelle 2 (Kapitel 3.3) dargestellt.

Nicht an allen Sommertagen müssen **thermophysiologicalen Belastungen** auftreten, jedoch ausnahmslos an heißen Tagen. Bei nicht ausreichender nächtlicher Abkühlung (Tropennacht) sinkt die Regenerationsfähigkeit des Körpers erheblich.



### 4.3 Niederschlag

Niederschlag beim Stadtklima und im Klimawandel ist im Lichte des Starkregens und im Auftreten von Trockenperioden zu betrachten. Folgende Auswertungen beziehen sich auf die Niederschlagsdaten der Station Flughafen Erfurt-Weimar. In der Abbildung 6 sind für den Zeitraum von 1981-2010 jeweils der Jahresgang und die Eintrittshäufigkeiten für **Trockentage** (kein Niederschlag), **Regentage** (mindestens 1 mm) und **Starkregentage** (mindestens 10 mm) zu erkennen. Durchschnittlich treten ca. 16 Trockentage und 8 Regentage pro Monat auf. Unter den 8 Regentagen tritt im Mittel 1 Starkregentag pro Monat auf, wobei die Starkregentage vornehmlich von Mai bis Juli auftreten und im Winterhalbjahr wesentlich seltener vorkommen.

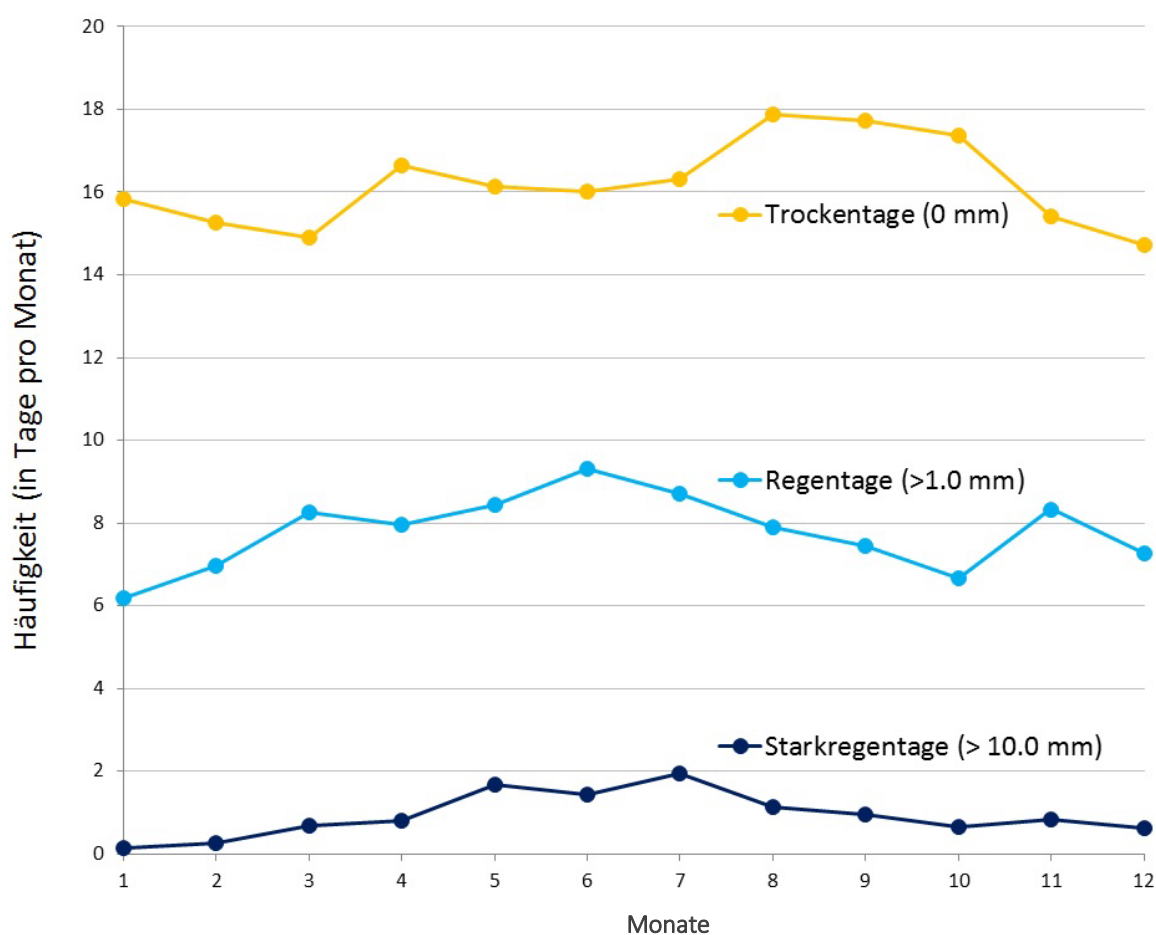


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung von Trockentagen, Regentagen und Starkregentagen pro Monat für den Zeitraum 1981-2010 an der Station Flughafen Erfurt-Weimar.

In Abbildung 7 werden die Tageswerte des Niederschlags klassifiziert und nach Auftrittshäufigkeit pro Jahr ausgewertet. An ca. 197 Tagen im Jahr tritt kein Niederschlag auf. Marginale Niederschläge (0,1 bis 1 mm) treten an 73 Tagen im Jahr auf. Zusammengezählt sind das ca. **270 Tage im Jahr**, die als **niederschlagsarm** zu bewerten sind. Sehr hohe Tagesniederschläge (mindestens 20 mm) treten mit etwa 3 Tagen im Jahr relativ selten auf.

Starkregenereignisse in dieser Kategorie (stark bis sehr stark) können je nach Lage und Größe des Niederschlagsgebiets zu hohen Abflussspitzen in den Flüssen führen. Die Kenntnis der mittleren und extremen Niederschlagsvorgänge in einem Stadtgebiet ist u.a. Bedingung für die wirtschaftliche Anlage von Regensammelbecken bzw. Regenrückhaltebecken und für die Kanalnetzberechnung.

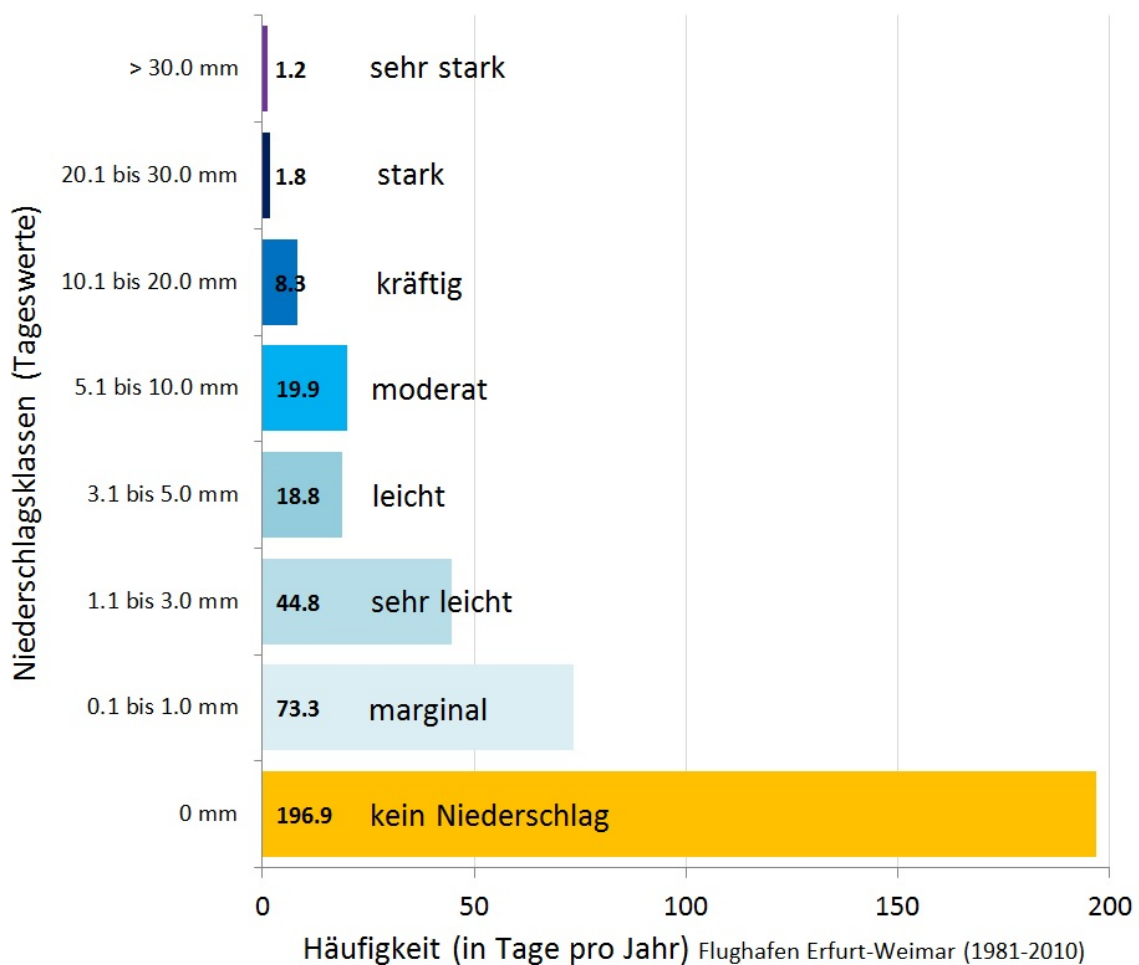


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsklassen für den Zeitraum 1981-2010 an der Station Flughafen Erfurt-Weimar.

Grünflächen und allgemein Vegetation wirken auf das Stadtklima positiv, wenn eine **ausreichende Wasserverfügbarkeit** gegeben ist, so dass Verdunstungsvorgänge eine abkühlende Wirkung gewährleisten. Kommt es (wie in den letzten Jahren) zu lang anhaltenden Trockenperioden, reduziert sich sukzessiv die abkühlende Wirkung auf nicht bewässerten Flächen. Die auf das Stadtklima positive Ausgleichswirkung dieser Grünflächen verringert sich während Trockenperioden deutlich.

In Abbildung 8 sind für die Vegetationsperiode von März bis Oktober die Häufigkeiten von Dürremonaten für den Zeitraum von 1951-2015 dargestellt. Ein Dürremonat ist nach der Definition von Gibbs & Maher (1967) gegeben, wenn die Monatsniederschlagssumme niedriger ist als das langjährige 10%-Quantil.

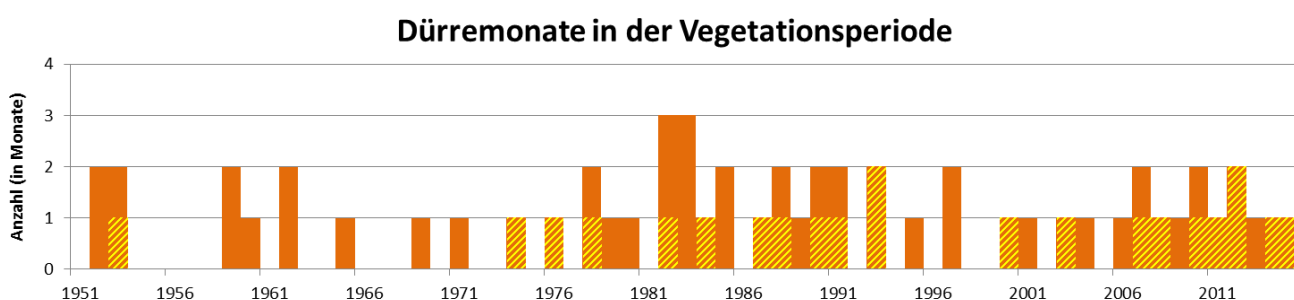


Abbildung 8: Häufigkeit von Dürremonaten in der Vegetationsperiode (März bis Oktober) pro Jahr, Anteil der Monate (März bis Mai) ist gelb schraffiert (Datensatz der Station Erfurt-Weimar)

Im Zeitraum von 1951 bis 2015 traten Dürremonate pro Vegetationsperiode unterschiedlich häufig auf. In vielen Jahren traten keine Dürremonate auf. Ab den 1980er Jahren traten Dürremonate häufiger auf als im Zeitraum davor. Dürremonate kamen nun häufiger auch zu Beginn der Vegetationsperiode (März bis Mai, gelbe Schraffur) vor. In den letzten 10 Jahren trat kontinuierlich **mindestens ein Dürremonat je Vegetationsperiode** auf und mehrheitlich in den Frühlingsmonaten von März bis Mai.

#### 4.4 Wind und Luftaustausch

Die statistische Auswertung der Windgeschwindigkeiten und -richtungen liefert ein Maß für den Horizontaltransport und die Verdünnung von Luftschadstoffen. Die Windrose in Abbildung 9 zeigt die langfristigen Windverhältnisse von 1981 bis 2010 an der Station am Flughafen Erfurt-Weimar. Die Verteilung der Windrichtung ist dabei repräsentativ, die mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 3,8 m/s. Die Hauptwindrichtung ist Südwest, gefolgt von West und Süd. Ein Nebenmaximum ist die Windrichtung Nordost.

#### Häufigkeit der Windgeschwindigkeit und -richtung (Windrose)

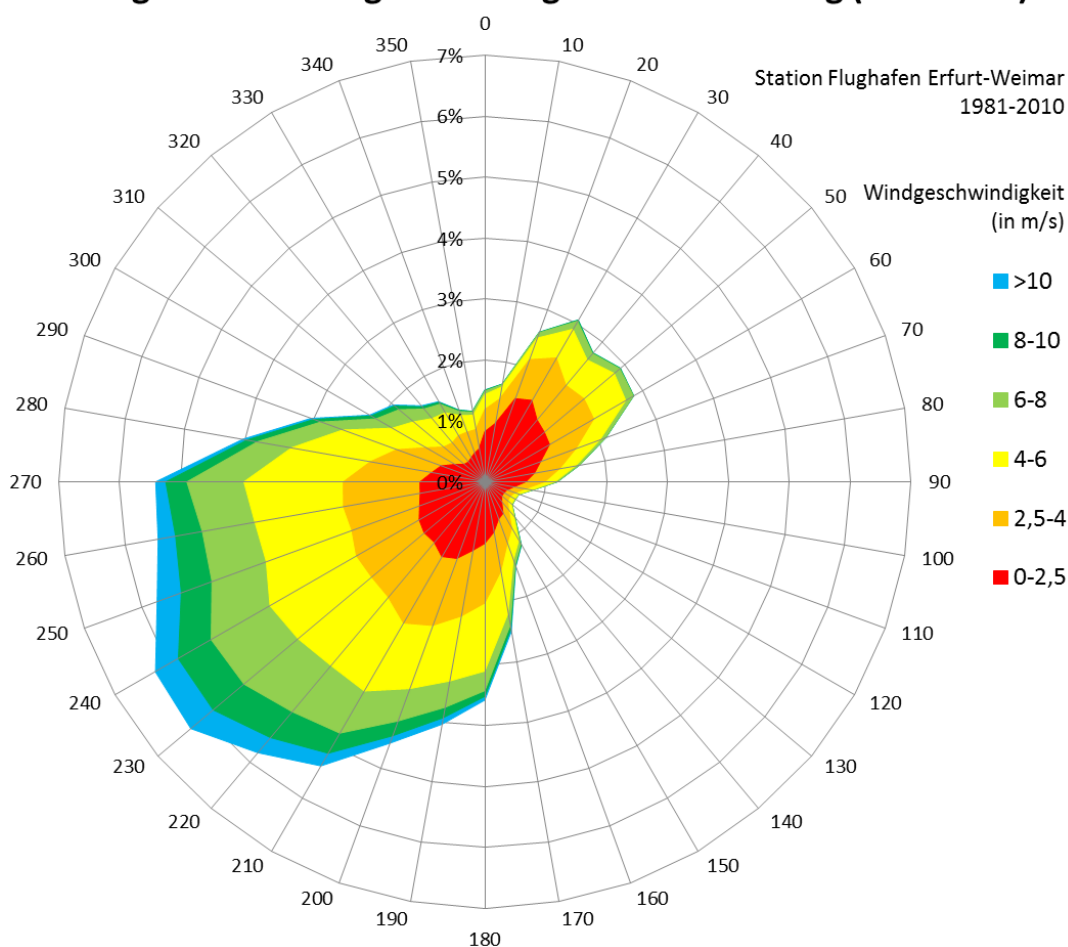


Abbildung 9: Windrose an der Station Flughafen Erfurt-Weimar 1981-2010.

In Abbildung 10 wird das Auftreten von windschwachen/-stillen Situationen (mit einer mittleren stündlichen Windgeschwindigkeit kleiner 1,5 m/s nach VDI RL 3786 Bl. 2) für die Station Flughafen Erfurt-Weimar im Zeitraum von 1995-2014 bzw. für das Erfurter Becken 2005-2014 dargestellt. Im Mittel treten diese Situationen an 9% aller Stunden im Jahr an der Station Flughafen Erfurt-Weimar auf und an 31% aller Stunden im Erfurter Becken. Damit treten **im Erfurter Becken Schwachwinde bzw. Windstillen mehr als dreimal so häufig** auf.

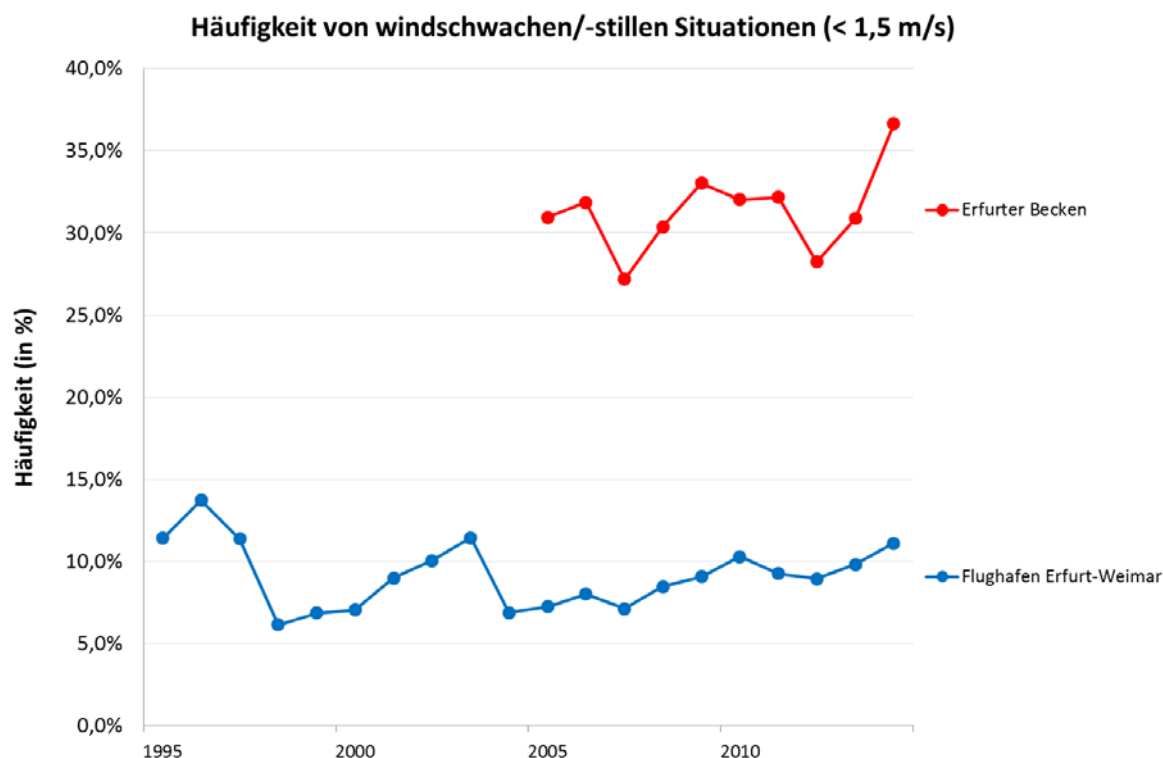


Abbildung 10: Häufigkeit von Schwachwindsituationen an der Station Flughafen Erfurt-Weimar (1995-2014) und im Erfurter Becken (2005-2014, Messstation Globus).

Ein besonderes Merkmal der Stadt ist die **Veränderung der Windverhältnisse** sowohl hinsichtlich der Windrichtung als auch bezüglich der Windgeschwindigkeit. Bebauung übt einen starken Einfluss auf das Windfeld aus. Im Gegensatz zum Umland ist die Luftströmung in der Stadt einem höheren Reibungswiderstand ausgesetzt (Barrierewirkung). Die Windgeschwindigkeit wird meist reduziert. Mit zunehmender Baudichte ist mit einer **Störung der Luftströmung zum Stadtkern** zu rechnen. So wirken die Breite der Straßen, der Kurvenverlauf, die Ausrichtung zur Windrichtung, die Dichte und Art der Bebauung auf das Windfeld ein. Die Erfurter Innenstadt wird dabei nur in den breiten Straßenräumen und über Vegetationsflächen belüftet. Charakteristisch ist die Belüftungssituation bei den verschiedenen Hauptrichtungen (Südwest und Nordost). In der Klimafunktionskarte (vgl. Kapitel 7) können die lokalen und regionalen Belüftungsstrukturen dann räumlich aufgelöst interpretiert werden.

Bei austauscharmen Wetterlagen wirken die lokalen Hangabwinde (Frisch- und Kaltluftabfluss) und eingeschränkt die regionale Belüftung. Spezielle Messungen in den Abflussbahnen können vor allem nachts die Richtungen der Anströmung mit Frisch- und Kaltlufteinfluss nachweisen. In diesen Lagen sind Häufigkeitsspitzen durch Kaltluftbewegungen zu erkennen. Die räumliche Analyse der städtischen Windmessungen aus früheren Gutachten bestätigt dies (Klimaanalyse Erfurt 1993). Eine zusätzliche Windzirkulation, die durch die Überwärmung des Stadtgebietes induziert wird, ist in Erfurt nicht zu beobachten.

## 4.5 Inversion

Der Begriff Inversion bezieht sich auf den vertikalen Temperaturverlauf in der Atmosphäre. Im Normalfall herrscht eine Temperaturabnahme mit der Höhe, bei Inversion besteht eine Temperaturzunahme mit der Höhe. Dadurch entsteht eine **Sperrschicht in der Atmosphäre**. Unterhalb dieser kann die (städtische) Luft aufgrund der Dichte- und Temperaturunterschiede nicht weiter aufsteigen, so dass sich Luftschadstoffe als sogenannte Dunstglocke anreichern (Abb. 11). Windschwache Situationen verstärken diesen Effekt. Belastete Luft wird nicht abtransportiert und unbelastete Frischluft wird nicht zugeführt. Lang anhaltende Inversionen führen mehrheitlich zu Grenzwertüberschreitungen von Luftschadstoffen.



Abbildung 11: Inversion und Dunstglocke über dem Erfurter Stadtgebiet (mit Blick nach Norden)

Im Gegensatz zu vielen anderen Städten ist die inversionsfördernde, windarme Tallage der Stadt Erfurt eine zusätzliche, ungünstige Randbedingung für eine vermehrte Anreicherung von Luftschadstoffen (**innerstädtische Inversion**). Innerstädtische Inversionen sind räumlich auf die Tallage begrenzt.

Inversionen treten jedoch auch im Zusammenhang mit austauscharmen, stabilen Großwetterlagen auf (**überregionale Inversion**). Überregionale Inversionen sind gekennzeichnet durch eine großräumige Ausdehnung (z.B. Thüringer Becken bis Deutschland weite Phänomene).

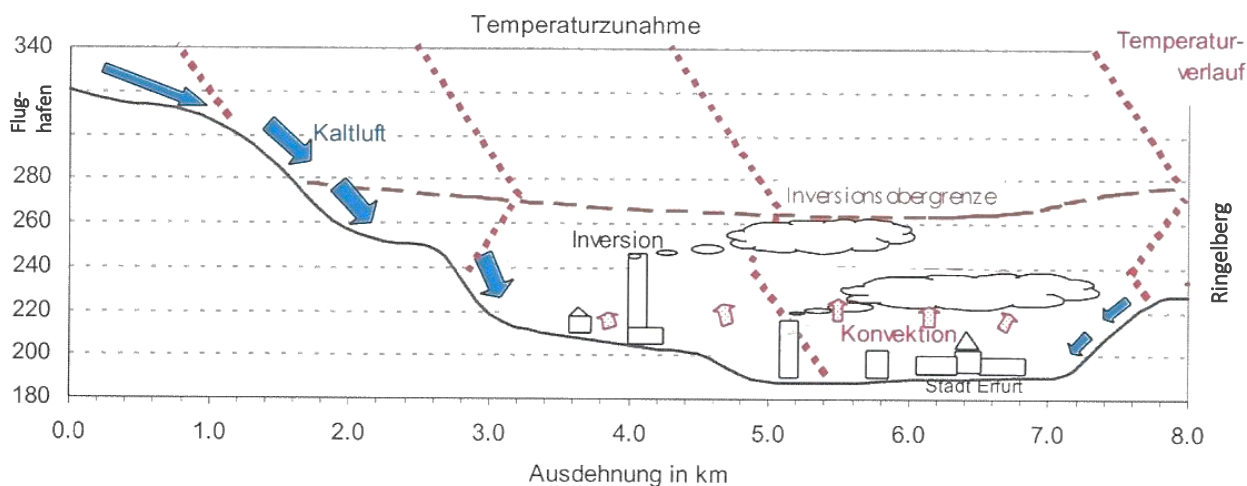


Abbildung 12: Schematische Darstellung der vertikalen Erstreckung mit Durchmischung bei Inversionen im Erfurter Becken.

Die innerstädtische Inversion wird meist durch eine ausstrahlungsbedingte, bodennahe Abkühlung der untersten Atmosphäre verursacht. Bei innerstädtischen Inversionen liegt die Sperrschicht in einer Höhe von wenigen Dekametern im Erfurter Becken. Die Höhe der Inversionsobergrenze (Abbildung 12) ist je nach Ausprägung der Inversion differenziert. Bei überregionalen Inversionen liegt die Höhe der Obergrenze bei einem Vielfachen der innerstädtischen Inversion.

Für eine innerstädtische und eine überregionale Inversion sind exemplarisch in Abbildung 13 die stündlichen Feinstaubkonzentrationen zweier Stadtstationen (Bergstr. – Umgebungstyp: verkehrsnah, Krämpferstr. – Umgebungstyp: städtisch) und einer 50 km entfernten Umlandstation im Thüringer Becken (Hummelshain – Umgebungstyp: ländlich/Wald) für jeweils 4-tägige Zeiträume dargestellt. In beiden Fällen steigen die Feinstaubkonzentrationen der Stadtstationen mit zunehmender Andauer der Inversion an. In Hummelshain steigen die Feinstaubkonzentrationen ausschließlich bei der überregionalen Inversion an. Bei der überregionalen Inversion sind die gemessenen Konzentrationen bei allen Stationen wesentlich höher als bei der innerstädtischen Inversion.

Auch zeitlich begrenzte Inversionen z.B. in der ersten Tageshälfte können zu hohen Immissionswerten führen, da die Frischluftzufuhr, die strahlungsbedingt erfolgt, unterbunden wird und in den Morgenstunden die höchste Emissionslast (z.B. durch Pendlerverkehr, Anheizen) besteht. Dies gilt auch im Sommer für die Wärmebelastung bzw. Kaltluftversorgung.

Während sich bodennahe Inversionen im Laufe des Tages (bei ausreichender Sonneneinstrahlung und Erwärmung) auflösen können, kommt es bei großräumigen, überregionalen Inversionslagen oft zu länger andauernden Perioden.

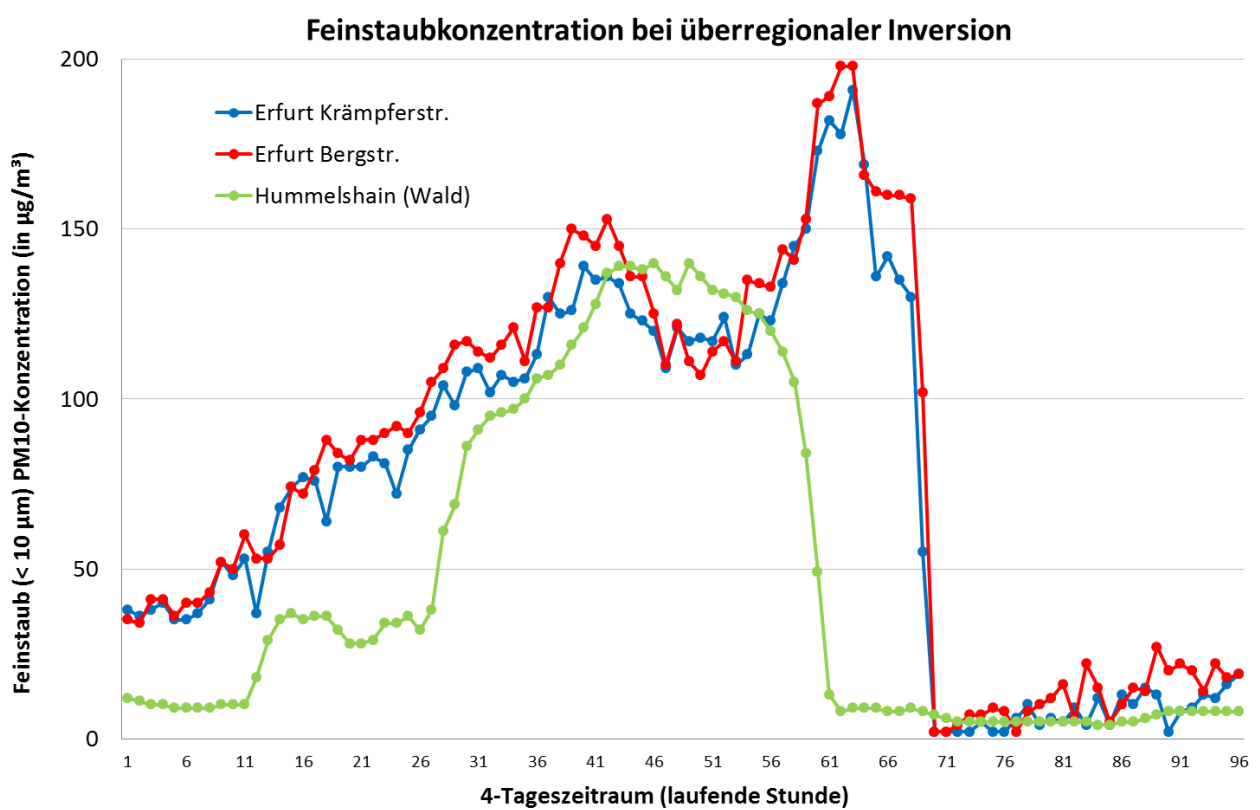
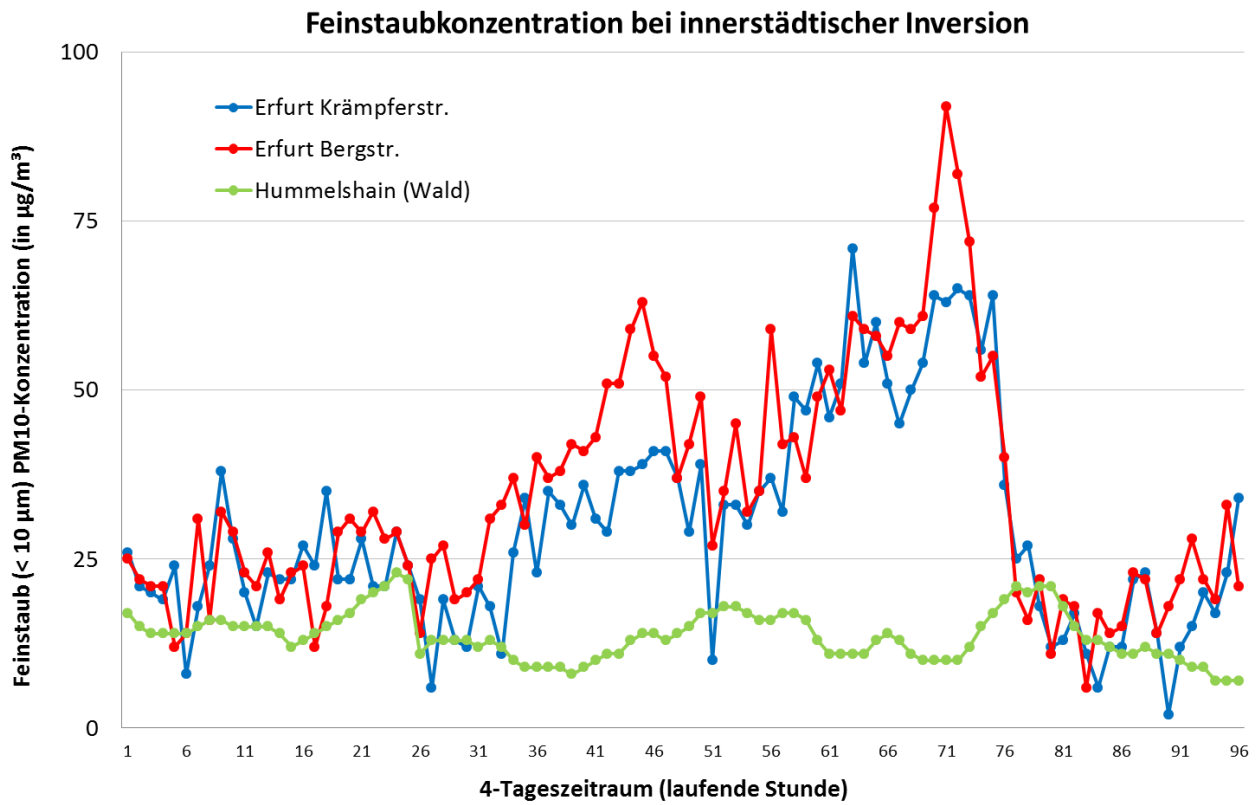


Abbildung 13: Stündliche Feinstaubkonzentrationen (PM10;  $<10\mu\text{m}$ ) an den Messstationen (Krämpferstr., Bergstr. und Hummelshain) bei innerstädtischer (oben) und überregionaler (unten) Inversion



Im Erfurter Becken ist die Stadtatmosphäre durch eine besondere vertikale und horizontale Struktur gekennzeichnet (Abb. 14). Bei Inversionen ist vor allem der vertikale Austausch der **atmosphärischen Grenzschicht** als unterste Schicht der Atmosphäre und der **städtischen Grenzschicht** stark eingeschränkt. Extra zu beachten ist die Situation innerhalb der Schicht von der Oberfläche bis zum mittleren Dachniveau, die sogenannte **städtische Hindernisschicht**.

Innerhalb der städtischen Hindernisschicht finden Bewertungen und Messungen für lufthygienische und thermische Aspekte statt. Bei Inversionen ist die Luftschicht innerhalb dieser bodennahen Schicht gefangen, der Luftaustausch ist dadurch behindert. Hohe Luftschadstoffbelastungen im Winter und hohe Wärmebelastungen im Sommer sind die Resultate.

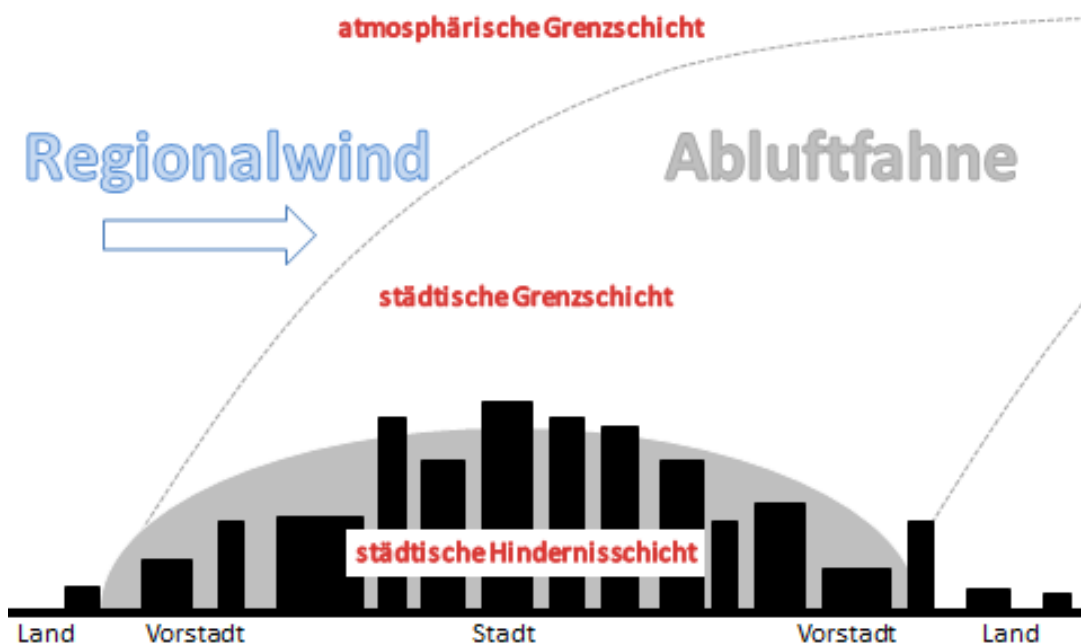


Abbildung 14: Vertikale und horizontale Struktur des Stadtklimas.

Für Erfurt liegen Untersuchungen zum Auftreten von Inversionen vor, die sich u.a. im Luftreinhalteplan wiederfinden. Das Auftreten von Inversionen ist demnach ganzjährig von besonderer Bedeutung. Die Bildung von innerstädtischen Inversionen hängt von der aktuellen Wetterlage und einer durch die Tallage bedingten Verstärkung im Bodenbereich ab. Innerstädtische (aber auch überregionale) Inversionen bilden sich häufiger bei stabil geprägten Wetterlagen aus (vgl. Stabilitätsklasse I und II in Tabelle 4). Diese erreichen in Erfurt eine hohe Auftrittswahrscheinlichkeit (vgl. Statistik des Deutschen Wetterdienstes in Abb. 15).

Tabelle 4: Übersicht der Stabilitätsklassen nach Klug-Manier (TA Luft)

Klasse	Temperaturschichtung	Austauschverhältnisse	Überwiegende Art der Turbulenz
I	sehr stabil	extrem gering	-
II	stabil	gering	mechanisch
III/1	stabil bis neutral	mittel	mechanisch
III/2	neutral bis labil	mittel	konvektiv/ mechanisch
IV	labil	gut	konvektiv
V	sehr labil	sehr gut	konvektiv

Klasse	Flughafen Erfurt-Weimar	Erfurt Stadt
I	17,1	21,2
II	19,7	22,0
III/1	40,1	29,4
III/2	12,6	15,2
IV	7,3	8,1
V	3,2	4,0

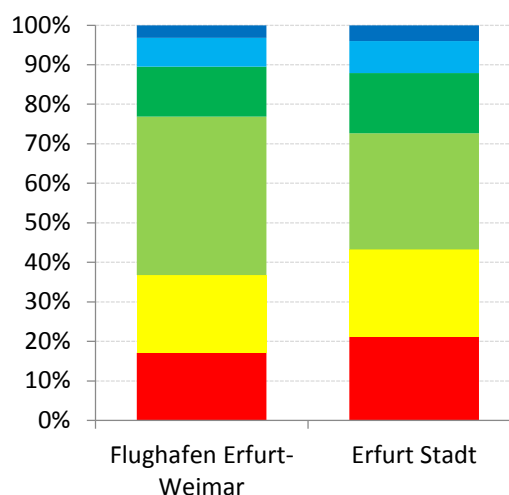


Abbildung 15: Häufigkeit von Ausbreitungsklassen nach Klug-Manier (in %)

Aufgrund des hohen Anteils von (extrem) geringen Austauschverhältnissen in Erfurt Stadt von 43% (stabile Schichtungen der Klasse I und II zusammengezogen) ist es wichtig die Häufigkeiten von einzelnen Inversionsereignissen zu analysieren, die sowohl lufthygienisch vor allem in den Wintermonaten, als auch für Wärmebelastung im Sommer bedeutsam sind.

Hierzu wurde die Häufigkeiten der innerstädtischen und der überregionalen Inversionen berechnet.

Innerstädtische Inversionen wurden berechnet anhand der Temperaturdifferenz zwischen den Werten der Station Flughafen Erfurt-Weimar (Geländehöhe von 314 m) und der Station Gefahrenschutzzentrum (207 m) im Erfurter Becken. Treten an der Station Flughafen Erfurt-Weimar (unter Berücksichtigung der feuchtadiabatischen Abkühlung von -0,65°C pro 100 m Höhe) gleiche oder höhere Temperaturen auf, liegt eine stabile Schichtung der Atmosphäre vor, die das Vorhandensein einer innerstädtischen Inversion kennzeichnet.



Abbildung 16: Inversionshäufigkeiten (2002-2014) pro Jahr für innerstädtische Inversionen dargestellt als Frühinversion (rosa) und gantztägige Inversion (rot); Überschreitungstage pro Jahr des Feinstaub-Tagesgrenzwertes von 50 µg/m³ für die Messstationen Krämpferstr. (hellgrau) und Bergstr. (dunkelgrau)

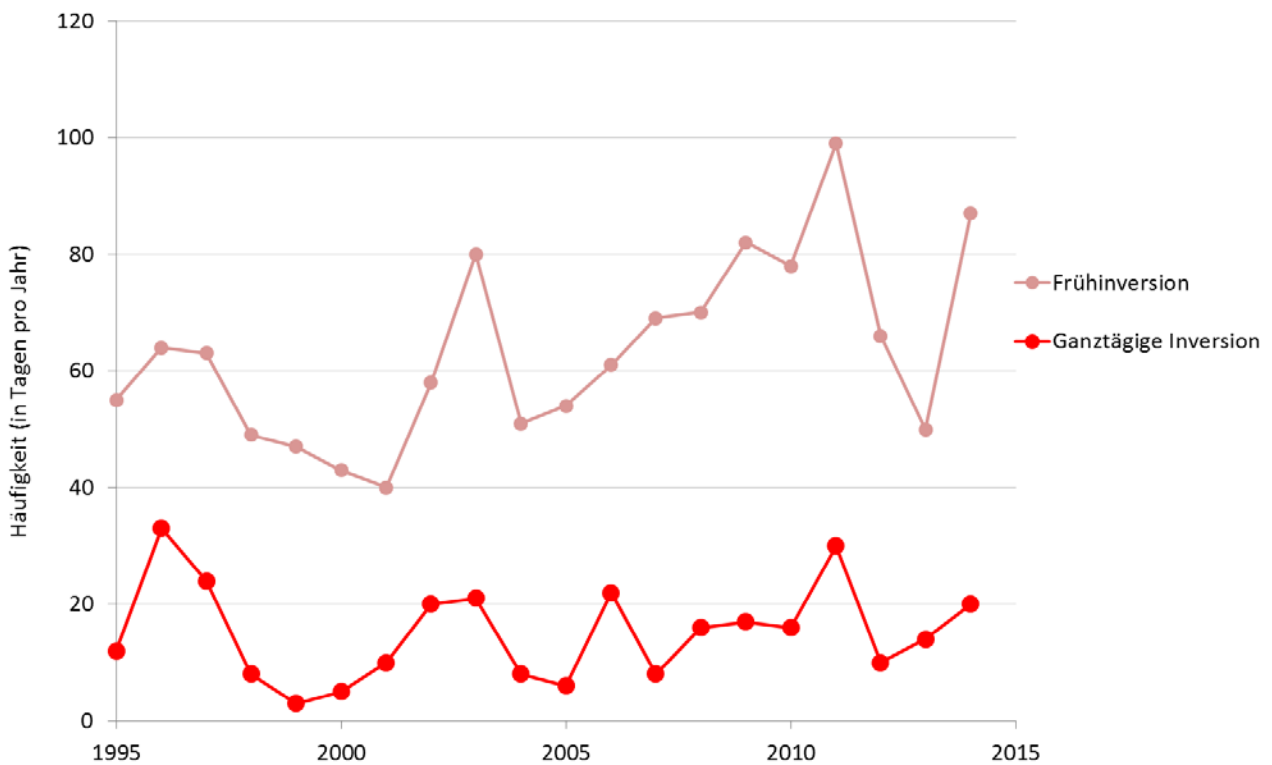


Abbildung 17: Inversionshäufigkeiten (1995-2014) pro Jahr für überregionale, großräumige Inversionen als Frühinversion (rosa) und gantztägige Inversion (rot);

Innerstädtische Inversionen treten in der ersten Tageshälfte (Frühinversion) durchschnittlich an rund **79 Tagen im Jahr** auf und sind in den letzten 13 Jahren durch hohe Variabilität von Jahr zu Jahr und keinen signifikanten Trend gekennzeichnet (Abbildung 16). Maximal wurden bis zu 101 Tage im Jahr ermittelt. Sehr mächtige Inversionen lösen sich tagsüber nicht auf und bestehen dann ganztätig an durchschnittlich **36 Tagen im Jahr**, bei denen Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte in städtischen Gebieten wahrscheinlicher sind (vgl. Abb.13). In vielen Jahren wurden sogar **mehr als 40 Tage im Jahr** festgestellt.

In Abbildung 16 werden neben den jährlichen Häufigkeiten der innerstädtischen Inversion auch die Anzahl der Überschreitungen des Tagesgrenzwertes von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Feinstaubfraktion PM10 an den Messstationen Krämpferstr. und Bergstr. dargestellt. Beim Vergleich der Aufttrittshäufigkeiten von ganztätigen Inversionen und den PM10-Überschreitungstagen wird eine hohe Korrelation deutlich. Ein gewisser Anteil der Überschreitungen des PM10-Tagesgrenzwertes ist dem Auftreten ganztätiger, innerstädtischer Inversionen zuzuordnen.

Überregionale Inversionen wurden berechnet anhand der Temperaturdifferenz zwischen den Werten der Station Flughafen Erfurt-Weimar (Geländehöhe von 314 m) und der Station Schmücke im Thüringer Wald (937 m). Treten auf der Schmücke gleiche oder höhere Temperaturen auf, liegt eine stabile Schichtung der Atmosphäre vor, die das Vorhandensein überregionaler Inversionen kennzeichnet.

Überregionale Inversionen treten in der ersten Tageshälfte (Frühinversion) durchschnittlich an rund **63 Tagen im Jahr** auf und sind in den letzten 20 Jahren durch einen signifikant zunehmenden Trend gekennzeichnet (Abbildung 17). Maximal wurden bis zu 99 Tage im Jahr ermittelt. Sehr mächtige Inversionen lösen sich tagsüber nicht auf und bestehen dann ganztätig an durchschnittlich **15 Tagen im Jahr**, bei denen Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte nicht nur in städtischen Gebieten sehr wahrscheinlich sind (Abb.13). In einzelnen Jahren wurden sogar **mehr als 30 Tage im Jahr** festgestellt.

Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, schwankt das Auftreten der innerstädtischen und überregionalen Inversion deutlich von Jahr zu Jahr. Grundsätzlich stimmen diese Ergebnisse gut mit früheren Untersuchungen (vgl. Luftreinhalteplan Erfurt Teil 1) überein. Eine Fortführung dieser Statistik wird empfohlen, um zukünftige Entwicklungen (unter fortschreitendem Klimawandel) zu verfolgen. Auch die Höhe der Inversionsobergrenze ist tageszeitlichen Schwankungen unterworfen. Dementsprechend ist die Anreicherung von Luftschadstoffen und deren Konzentration abhängig von der Höhe der Obergrenze, der Mächtigkeit und der Zeitdauer der Inversion. Zusätzliche Vertikalsondierungen der städtischen und atmosphärischen Grenzschicht könnten Erkenntnisse über die zeitliche Entwicklung und die genaue Lage der Inversionsobergrenze liefern.

Mit Blick auf den fortschreitenden Klimawandel kommt es zum häufigeren Auftreten von Hochdruck-Wetterlagen, die stabile, windarme Verhältnisse begünstigen und die Bildung von ausgeprägten Inversionen fördern können. Eine charakteristische Großwetterlage ist die sogenannte "Hochdruckbrücke Mitteleuropa", wo Mitteleuropa unter einem stabilen Hochdruckeinfluss steht (vgl. Luftdruckfeld in Abbildung 18 oben). Sommerliche Hitzebelastungen sind bei dieser Wetterlage wahrscheinlich. Das Auftreten dieser Großwetterlage über einen Zeitraum von 1881 bis 2015 wird in Abbildung 18 (unten) für das Sommerhalbjahr dargestellt. Es ist ersichtlich, dass trotz hoher Unterschiede von Jahr zu Jahr **diese Großwetterlage wesentlich häufiger auftritt als früher**.

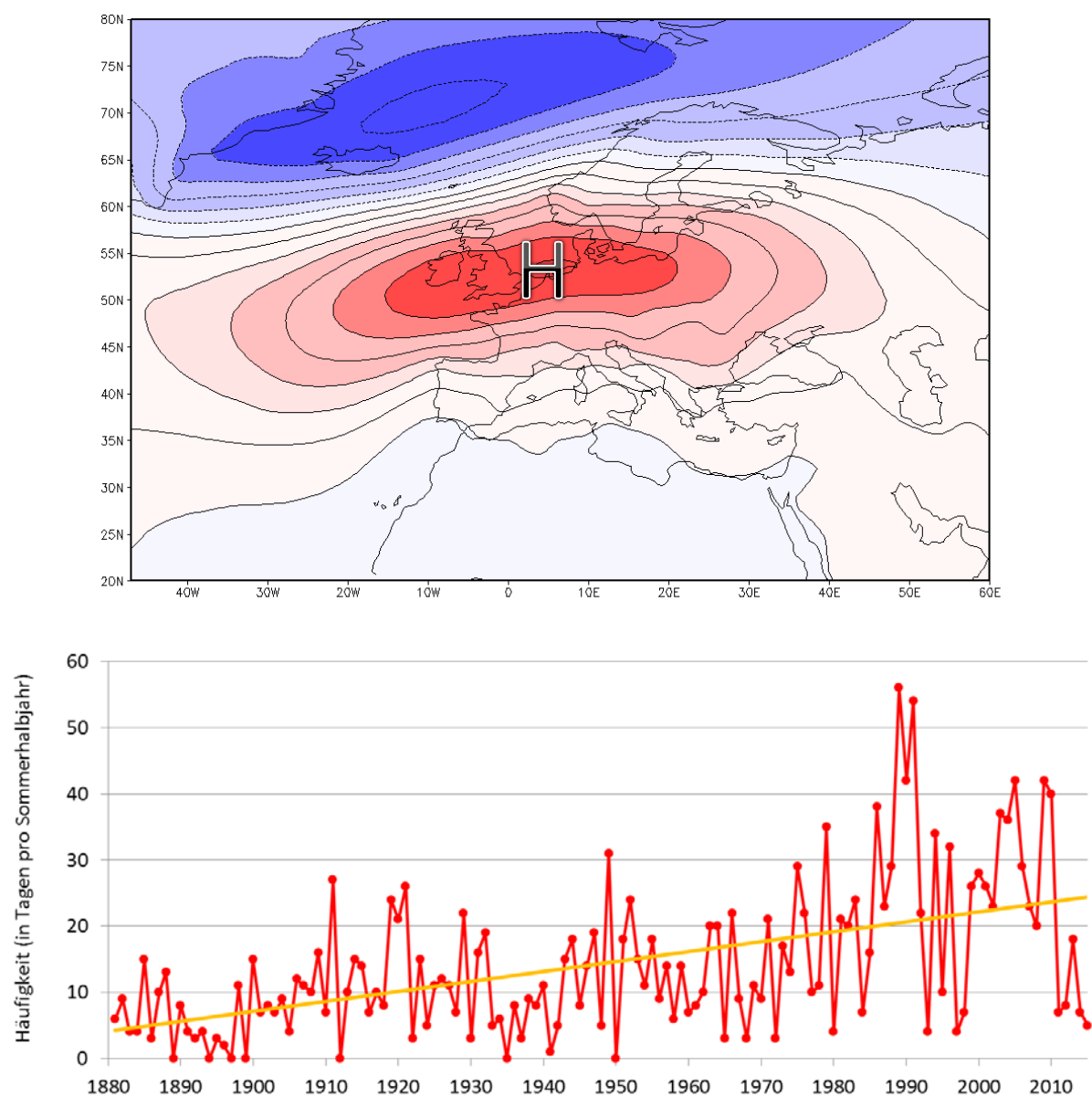


Abbildung 18: Auswertung der Großwetterlage "Hochdruckbrücke Mitteleuropa" für das Sommerhalbjahr April-September im Zeitraum von 1881 bis 2015 (unten) und mittlere Luftdruckanomalie der Großwetterlage "Hochdruckbrücke Mitteleuropa" (oben)

Tabelle 5: Tabellarische Übersicht zu den jährlichen Inversionshäufigkeiten (1995-2014) analog zu den Abbildungen 16 und 17

Jahr	Innerstädtische Inversion		Überregionale Inversion	
	Frühstunden	ganztägig	Frühstunden	ganztägig
1995			55	12
1996			64	33
1997			63	24
1998			49	8
1999			47	3
2000			43	5
2001			40	10
2002	79	45	58	20
2003	92	57	80	21
2004	71	41	51	8
2005	72	42	54	6
2006	87	41	61	22
2007	58	24	69	8
2008	54	19	70	16
2009	76	38	82	17
2010	87	36	78	16
2011	101	42	99	30
2012	74	22	66	10
2013	89	31	50	14
2014	87	27	87	20
Minimum	54	19	40	3
Mittelwert	<b>79</b>	<b>36</b>	<b>63</b>	<b>15</b>
Maximum	101	57	99	33

Fazit (Inversionen):

Herabgesetzte Luftaustauschbedingungen in Form von Inversionen und windschwachen Verhältnissen sind für Erfurt relevant bezüglich der Lufthygiene im Winter und der thermischen Situation (Hitze) im Sommer. Wichtig ist es daher, die Gebiete der Kalt- und Frischluftentstehung und der –abflüsse zu erhalten, die auch bei Inversion entsprechend des Geländegefälles eine Luftzufuhr und eine Verringerung der Schadstoffkonzentration gewährleisten. Aus der Klimafunktionskarte lassen sich diese Gebiete ableiten, die bei solchen Wetterlagen aus klimatischer und lufthygienischer Sicht als schutzwürdig zu betrachten sind.

Im Hinblick auf den Klimawandel und die Inversionsneigung des Erfurter Beckens (hauptsächlich in 60 bis 100 m über der Talsohle) erlangt die Durchlüftungsfunktion, welche u.a. durch Frischluftabflussbahnen versorgt wird, eine **höhere Bedeutung in planerischen Entscheidungsprozessen als in anderen Städten.**

## 4.6 Auswirkungen verschiedener Wetterlagen auf das Stadtklima und die Lufthygiene Erfurts

Neben austauscharmen Inversionswetterlagen können auch windschwache Wetterlagen die stadtklimatischen und lufthygienischen Verhältnisse verschlechtern, wenn in topographisch bedingten Belüftungsräumen keine Luftleitbahnen vorhanden sind.

Bei windschwachen Anströmungen (Auftrittshäufigkeit in Abb. 10) nutzen die Luftmassen wichtige Luftleitbahnen vom Umland in die Stadt. Anhand der aktuellen digitalen Datengrundlage an Geoinformationen (vgl. Tabelle 6 in Kap. 5) ist eine Zusammenschau möglich, um großräumige Belüftungskorridore bei west- oder östlichen Anströmungen auszumachen und bewerten zu können.

In Abbildung 19 sind die charakteristischen Ein- und Ausströmungen der unterschiedlichen Wetterlagen zusammengefasst.

Bei westlicher Anströmung sind die wichtigsten Durchlüftungskorridore der Stadt Erfurt das Geratal und das Tal, in dem der Brühler Hohlweg verläuft, sowie der Flächen entlang der Hannoverschen Straße. Der südwestliche Teil des Erfurter Geratals ist insbesondere für die verdichtete Innenstadt relevant.

Bei östlicher Anströmung sind einerseits die Flächen der Dittelstedter Flur und andererseits die Gebiete östlich des Bahndammes (Linie Erfurt Hbf – Stotternheim) wichtig für eine Gewährleistung der Durchlüftung.

Die **Hauptdurchlüftungssachsen** der bebauten Stadtbereiche sind die Gleisanlagen, der Flutgraben und die nördliche Geraaue sowie die nördliche Querverbindung.

Einen unerheblichen Einfluss auf die klimatische und lufthygienische Situation innerhalb des Erfurter Beckens und damit auf die Belastungsbereiche der Kernstadt haben die entfernter liegenden Flächen der Dorfgebiete, die häufig mit dem Geländegefälle nach außen zu den Stadtgrenzen orientiert sind. Diese stehen meist nicht im Wirkzusammenhang mit den lokalen Wechselwirkungen der städtischen Klimatope (**Flächen ohne direkten Einfluss auf die Erfurter Kernstadt**). Lokal können diese jedoch in den dörflichen Ortsteilen wirksam sein.

Die Klimafunktionen der übrigen Flächen (weiße Darstellungen in Abb. 19) haben Einfluss auf das Stadtklima und werden detailliert in Klimafunktionskarte (Kap. 7) und Planungshinweiskarte (Kap. 9) dargestellt und erläutert.

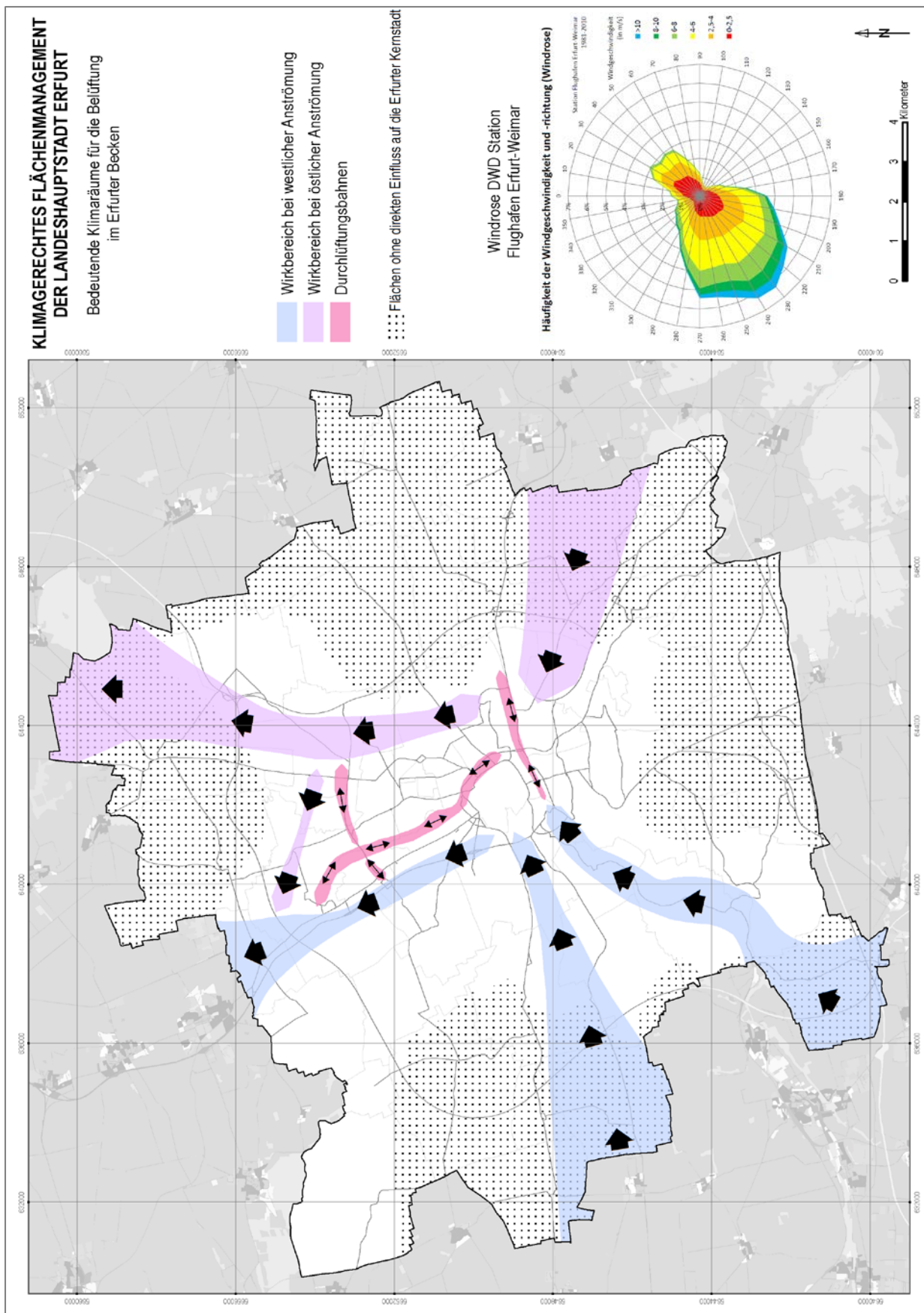


Abbildung 19: Belüftungsrelevante Klimaräume und Klimafunktionen für das Erfurter Becken.



#### 4.7 Zeitlicher Verlauf der klimatischen Verhältnisse

Da die klimatische Analyse der Landeshauptstadt Erfurt ebenfalls die sommerliche Hitzebelastung fokussiert, soll die untenstehende Grafik einen Eindruck der Temperaturverhältnisse an der DWD-Station Flughafen Erfurt-Weimar darstellen.

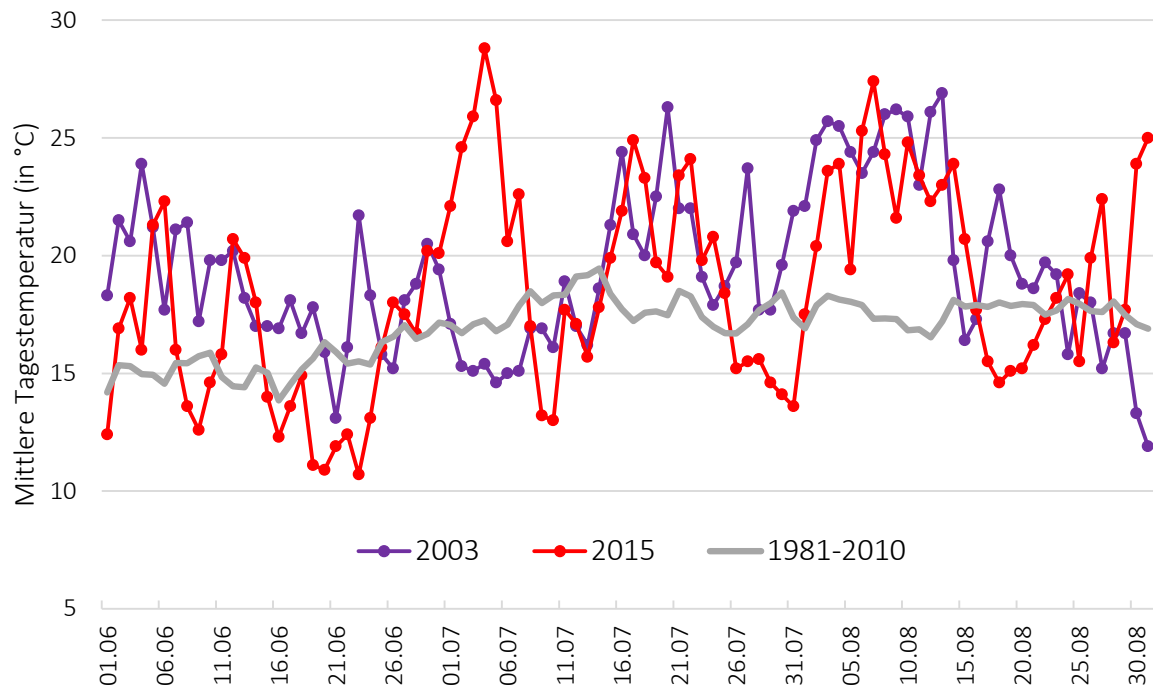


Abbildung 20: Vergleich der Lufttemperatur der Rekordsommer 2003, 2015 und dem langjährigen Mittel 1981-2010 (jeweils angegeben als Tagesmittelwerte für den Zeitraum 01.06. bis 30.08.).

Gegenübergestellt wurden die täglichen Lufttemperaturen der Sommermonate (Juni, Juli, August) als 30-jähriges Mittel von 1981 bis 2010 (grau) und den Jahren mit besonderer **Hitzebelastung der Sommer 2003 und 2015**. In den Jahren 2003 und 2015 treten deutlich die Temperaturspitzen einzelner Hitzewellen hervor, die mehrere Tage andauern. Beachtenswert ist 2015 die erste Hitzewelle Anfang Juli mit der höchsten Belastung. Die hier dargestellten Lufttemperaturen der Hitzesommer können nur den zeitlichen Verlauf, nicht aber die tatsächlich hervorgerufene quantitative thermische Belastung darstellen (vgl. Kapitel 3). Trotzdem zeigt die Entwicklung einzelner Hitzeperioden, die sich über mehrere Tage erstrecken, dass dringender **Handlungs- und Anpassungsbedarf** besteht. Stark überwärmte und hitzebelastete Flächen im Stadtgebiete werden mithilfe der Klimafunktionskarte (vgl. Kapitel 7) ablesbar. Um die Wärmebelastung zu reduzieren, sind planerische Schritte notwendig, z. B. zur Kaltluftzufuhr, durch Verschattungsmaßnahmen oder Entsiegelung.

In Abbildung 21 werden die fünf wärmsten und kühlfsten Sommer seit 1951 mit den mittleren Lufttemperaturen (jeweils gemittelt von 01.06. bis 31.08.) aufgelistet. Mehrheitlich liegen die kühlfsten Sommer in der ersten Hälfte des Messzeitraums (1951-2015), während die wärmsten Sommer in der zweiten Hälfte auftraten. Für einen Stadt-Umland-Vergleich wurden die mittleren Temperaturen von den Messstationen Krämpferstraße (repräsentativ für die Stadt) und Flughafen Erfurt-Weimar (Umland) exemplarisch für den Sommer 2015 gegenübergestellt. Die **mittlere Lufttemperatur liegt in der Stadt um +2,7 °C höher**.

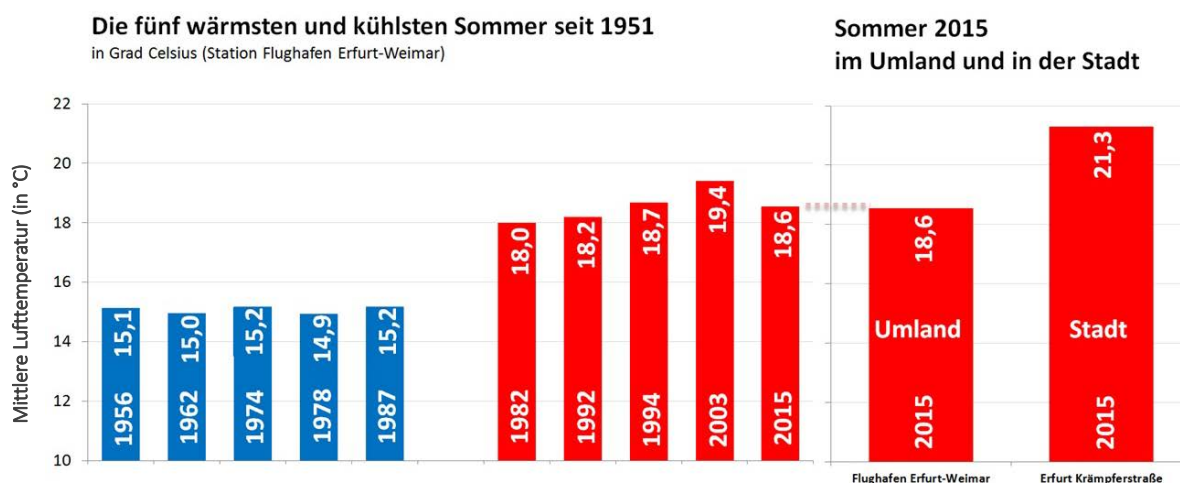


Abbildung 21: Gegenüberstellung der fünf wärmsten und kühlfsten Sommer seit 1951 (links) und Vergleich Sommer 2015 im Umland und in der Stadt (rechts).

In Abbildung 22 ist die mittlere Tagesmaximumtemperatur im Sommer seit 1951 (jeweils gemittelt von 01.06. bis 31.08.) dargestellt. Der Messzeitraum von 1951 bis 2015 ist durch einen positiven Trend zunehmender Tagesmaximumtemperaturen gekennzeichnet. Die Anzahl der durch Wärmebelastung betroffenen Tage und deren zeitliche Entwicklung ist auch im fortschreitenden Klimawandel zu beachten, da eine weitere Zunahme nach derzeitigen Szenarien wahrscheinlich ist. Der Stadt-Umland-Vergleich zeigt einen **Unterschied von +4,4 °C höheren Maximumtemperaturen** in der Stadt.

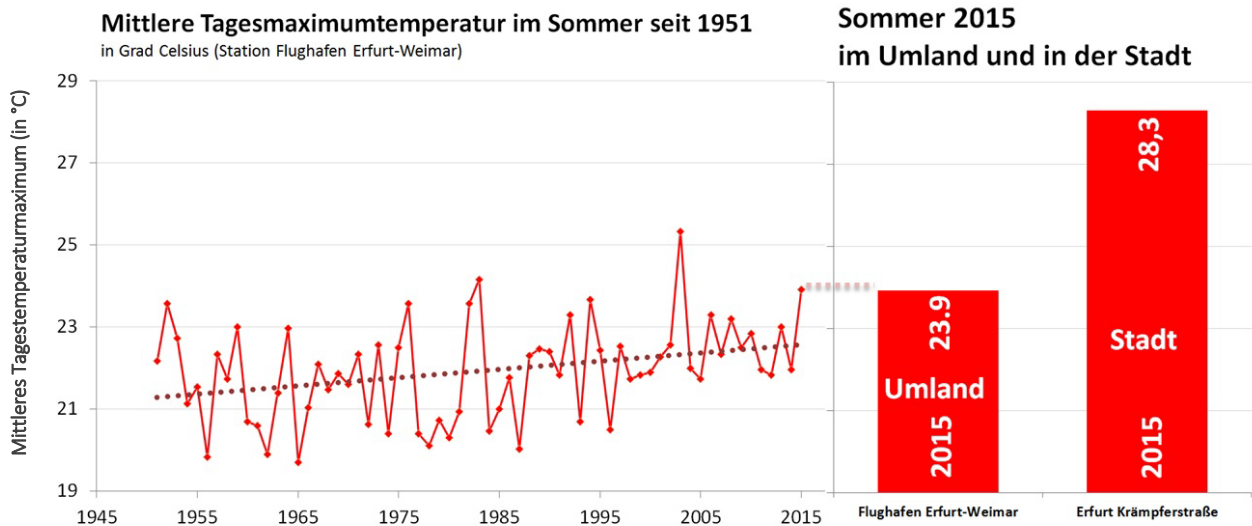


Abbildung 22: Mittlere Tagesmaximumtemperatur im Sommer seit 1951 (links) und Vergleich der Tagesmaximumtemperatur im Sommer 2015 im Umland und in der Stadt (rechts).

In Abbildung 23 ist die Anzahl heißer Tage (mit einem Tagesmaximum von mindestens 30°C) im Sommer seit 1951 (jeweils gemittelt von 01.06. bis 31.08.) dargestellt. Der Messzeitraum von 1951 bis 2015 ist durch einen positiven Trend gekennzeichnet. Der Stadt-Umland-Vergleich zeigt einen **Unterschied von +20 heißen Tagen in der Stadt**, das einer **doppelt so häufigen Wärmebelastung** entspricht. Die Anzahl der durch Wärmebelastung betroffenen Tage und deren zeitliche Entwicklung ist auch im fortschreitenden Klimawandel zu beachten, da eine weitere Zunahme nach derzeitigen Szenarien wahrscheinlich ist.

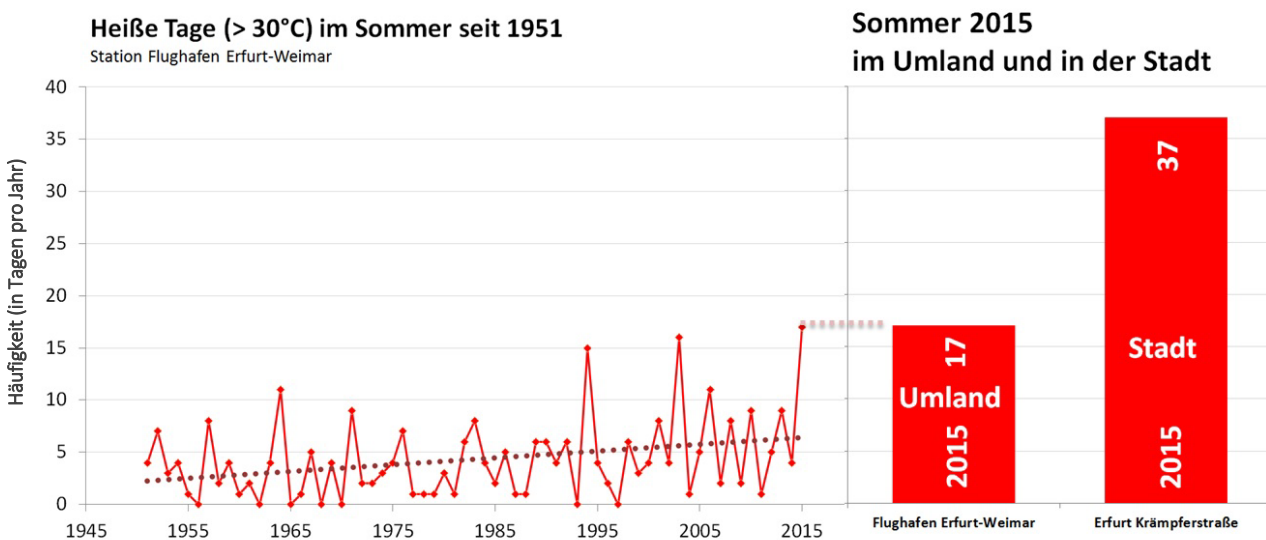


Abbildung 23: Heiße Tage im Sommer seit 1951 (links) und Vergleich der Anzahl Heiße Tage im Sommer 2015 im Umland und in der Stadt (rechts).

In Abbildung 24 wurden exemplarisch die Tropennächte des Sommers 2015 an drei Stationen ausgezählt. Während einer Tropennacht sinken die nächtlichen Temperaturen nicht unter 20°C. Die Station Flughafen Erfurt-Weimar repräsentiert die Umlandverhältnisse, während die Stationen Krämpferstraße und Bergstraße städtische Verhältnisse widerspiegeln. Der Vegetationsanteil um die Station Krämpferstraße ist deutlich höher als in der Bergstraße, jedoch niedriger als im Umland. Das zeigt sich in der Fähigkeit der nächtlichen Abkühlung und damit in der Häufigkeit der Tropennächte. Während im Umland 4 Tropennächte im Sommer 2015 ermittelt wurden, sind es in der Stadt 11 Tropennächte (Krämpferstraße) bzw. in höher versiegelten Bereichen **18 Tropennächte** (Bergstraße).

Aufgrund der episodisch vorkommenden Tropennächte (vgl. Kapitel 4.2 Abb. 5) wurde in der Abbildung 24 auf eine Zeitreihe und Trendberechnung der Tropennächte an der Station Flughafen Erfurt-Weimar verzichtet. Mit fortschreitendem Klimawandel ist in Zukunft eine Zunahme an Tropennächten wahrscheinlich. Für exponierte Bevölkerungsgruppen (z.B. Senioren, kranke Personen) ist die Regenerationsfähigkeit während einer Tropennacht deutlich herabgesetzt.

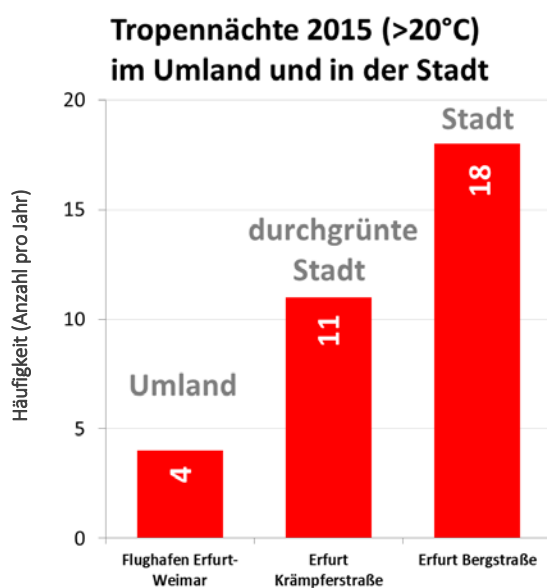


Abbildung 24: Vergleich der Tropennächte im Sommer 2015 im Umland und in der Stadt.

## 5. Übersicht der Themenkarten

Die Erstellung der Klimafunktionskarte basiert auf einer flächendeckenden Analyse der thermischen und dynamischen Komponente des Stadtklimas (Abb. 25). Die Grundlage bilden im Wesentlichen die in Tabelle 6 dargestellten Eingangsdatensätze.

Tabelle 6: Digitale Eingangsdaten.

Datensatz	Datum (Stand)	Zweck
Realnutzungskartierung	2014	Klimafunktionskarte
Flächennutzungsplan (FNP)	2015	Klimafunktionskarte Szenario FNP
Urban Atlas (European Environment Agency)	2015	Klimafunktionskarte
Gebäudegrundrisse und Gebäudehöhen	2015	Klimafunktionskarte
Digitales Geländemodell (2m Auflösung) (DGM)	2011	Klimafunktionskarte Szenario FNP und KW
Baumkataster	2015	Klimafunktionskarte
Klimasignal Zeitraum 2041-2070 (TLUG)	2015	Klimafunktionskarte Szenario KW
Straßen, Grenzen	2015	Layout
Relevante Messdaten	Ab 1951	Kalibrierung
Mobile Mikroklimamessungen Sommer 2015	2015	Kalibrierung

Die Realnutzungskartierung der Stadt Erfurt ist eine grafische Erfassung der Art der Bodennutzung für das gesamte Stadtgebiet. Der Erfassungsmaßstab ist mit 1:2.000 festgelegt. Der seit 2006 beschlossene Flächennutzungsplan stellt als sogenannter vorbereitender Bauleitplan die generellen räumlichen Planungs- und Entwicklungsziele dar, indem die geplante Art der Bodennutzung in Grundzügen im Maßstab 1:10.000 darstellt. Zur Berücksichtigung umliegender Gebiete außerhalb der Gemeindegrenzen wurde auf die Bodennutzung des Urban Atlas der Europäischen Umweltagentur zurückgegriffen.

Die Gebäudegrundrisse wurden aus der aktuellen Stadtgrundkarte extrahiert. Zugehörige Gebäudehöhen wurden anhand von LIDAR-Datensätzen einer 2011 durchgeführten Überfliegung zu geordnet. Die Gebäudehöhen der nach 2011 neu hinzugekommenen Gebäude wurden umfassend mit dem Amt für Geoinformation und Bodenordnung auf den Stand der Gebäudegrundrisse (2015) nachdigitalisiert.

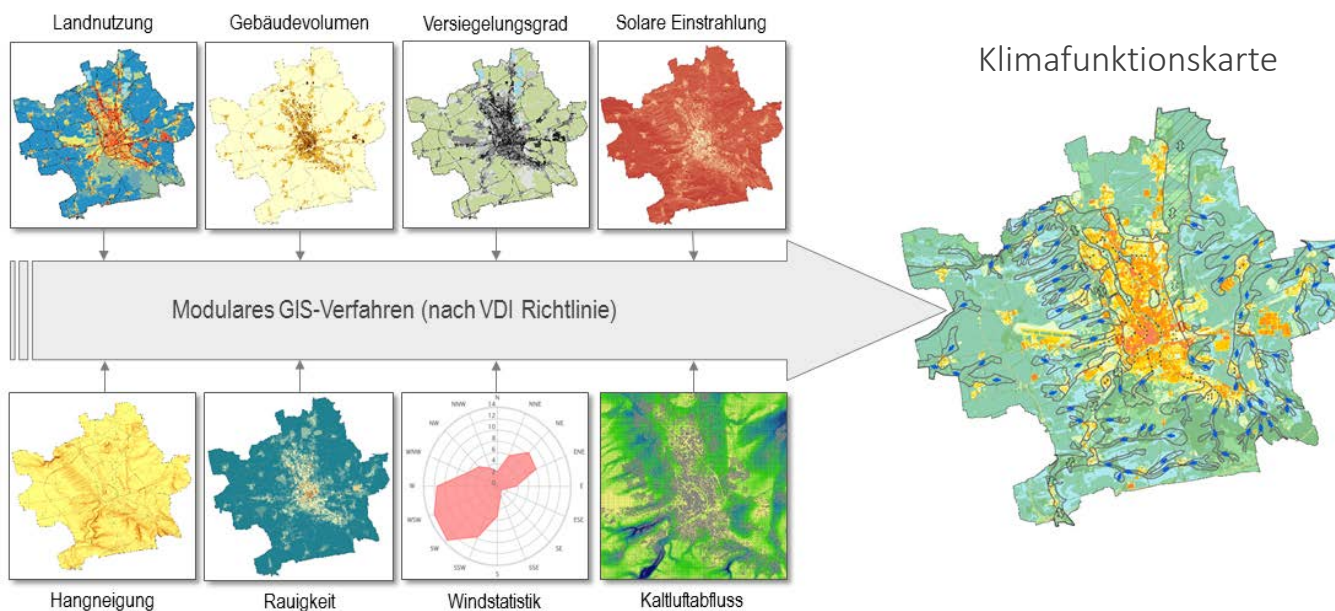
Das Digitale Geländemodell repräsentiert die Geländehöhe der natürlichen Erdoberfläche in einer sehr hohen Auflösung von 2 Metern. Das Baumkataster wurde vom Garten- und Friedhofsamt zur Verfügung gestellt und beinhaltet Baumstandort, Baumart, Baumhöhe und Kronendurchmesser der städtisch bewirtschafteten und auf städtischen Grund stehenden Bäume.

Das Klimasignal für den Zukunftshorizont 2041-2070 wurde uns von der Thüringer Klimaagentur zur Verfügung gestellt und basiert auf der für Thüringen gültigen Klimasimulation der IMPAKT Studie des Thüringer Umweltministeriums.

Aus den Eingangsparametern werden verschiedene Themenkarten generiert, die die Grundlage für die Berechnung der Klimafunktionskarte nach VDI-Richtlinie 3787 sind. Die Berechnung wird über ein modular aufgebautes Modell (GIS-Verfahren) umgesetzt, welches mit Messdaten validiert und ggf. kalibriert werden kann. Eine Kalibrierung der berechneten Klimafunktionskarte war jedoch aufgrund der guten Übereinstimmung nicht notwendig.

Zur Berechnung der thermischen Komponente (Wärmebilanz, -speicherung) sind die Landnutzung, die Gebäudevolumen, der Versiegelungsgrad und die solare Einstrahlung notwendig. Die dynamische Komponente (Windfeldveränderung, Kaltluftabflussrichtung, etc.) wird durch die Hangneigung, die Rauigkeit, langjährige Windstatistiken und die modellierten Kaltluftabflüssen bestimmt.

### Stadtklimatische Komponente **Thermik**



### Stadtklimatische Komponente **Dynamik**

Abbildung 25: Schematische Darstellung der angewandten Methode.

## Typisierung der stadtklimatischen Komponente "Thermik"

### *Landnutzung*

- Herausarbeitung der thermischen Bedeutung unterschiedlicher Oberflächennutzungen und Zusammenfassung mikroklimatisch ähnlicher Nutzungen (z. B. potentiell kalte Luftentstehungsgebiet, potentiell überwärmtes Gebiet) auf Basis der Realnutzungskartierung, der Gebäudekartierung sowie der Luftbilder als wichtiges Ausgangsprodukt für die thermische Analyse.

### *Gebäudevolumen*

- Herausarbeitung der gebäudeabhängigen, thermischen Belastung durch die Wärmespeicherkapazität und Reflexion.
- Auf Grundlage der Gebäudekartierung Ableitung des physikalischen Verhaltens (sowohl gesamtstädtisch als auch mikroklimatisch) als Ausgangsprodukt für die thermische Analyse.

### *Versiegelung der Oberflächen*

- Herausarbeitung der versiegelten Bereiche und Generalisierung bestimmter Gebietstypen. Zweidimensionale Betrachtung auf Grundlage der Realnutzungskartierung, der Gebäudekartierung sowie der Nutzungsartflächen als Ausgangsprodukt für die thermische Analyse.

### *Solare Einstrahlung*

- Herausarbeitung der solaren Einstrahlung unter Berücksichtigung der Exposition der Flächen und Verschattung durch Objekte (z.B. Gebäude, Horizontabschattung). Die Aufwärmung der Oberflächen erfolgt auch in Abhängigkeit der jeweiligen Nutzung.

## Typisierung der stadtklimatischen Komponente "Dynamik"

### *Hangneigung/Relief*

- Herausarbeitung klimatisch relevanter topografischer Faktoren (z. B. Höhenrücken, Täler, Hangneigungen, Exposition) und daraus ableitend Luftleit- und Durchlüftungspotentialbestimmung auf Basis des digitalen Höhenmodells von Luftbildern und topografischen Karten als wichtiges Ausgangsprodukt für die thermische und dynamische Analyse.

### *Rauigkeit/Windstatistik*

- Herausarbeitung der v.a. nutzungsbedingten Oberflächenrauigkeit, differenziert nach klimatischer Relevanz (z. B. potentielle Barrierewirkung bzw. Kanalisierung von Luftmassen), auf Basis der Nutzungsartflächen, topografischen Karten sowie Luftbildern und der Windstatistik (vgl. Windrose im Kap. 4.4) als wichtiges Ausgangsprodukt für die dynamische Analyse.
- Herausarbeitung der gebäudeabhängigen Barrierewirkung und daraus resultierender Minderung des Belüftungspotentials auf Basis der Gebäudefläche und -höhe.
- Berechnung und Generalisierung des Gebäudevolumens als Ausgangsprodukt für die dynamische Analyse.

### *Abflussbahnen und Abflussrichtungen*

- Herausarbeitung der orografisch bedingten Schneisen, die in Abhängigkeit von der Relieftypisierung, der Gebäudevolumina und der Strukturtypisierung berechnet werden konnten und als ergänzender Faktor für die dynamische Analyse eingesetzt werden.
- flächenhafte Verteilung der Kaltlufthöhe und mittleren Fließgeschwindigkeiten (Kaltluftmodellierung)



## ***Funktionsanalyse***

Die Analyse erfolgt zunächst zweigleisig, unterteilt nach thermischen und dynamischen Aspekten. Anschließend wird die gegenseitige Einflussnahme im Sinne einer Wirkungsanalyse untersucht und entsprechend eingearbeitet.

### *Thermische Analyse*

- Verknüpfung der thermischen (und lufthygienischen) Nutzungseigenschaften untereinander sowie mit den dynamischen Einflussfaktoren des Reliefs und der Strömungsstruktur (Bestimmung z. B. des Auftretens von Kaltluftseen und des Abkühlungseinflusses auf Überwärmungsbereiche).

### *Dynamische Analyse*

- Verknüpfung der dynamisch (und lufthygienisch) relevanten Erhebungsebenen untereinander (und damit Bestimmung z. B. der spezifischen Aktivität von Kalt-/Frischluftentstehungsgebieten).

## ***Funktionssynthese***

- Klimafunktionskarten stellen die Verknüpfung der thermischen und dynamischen Themenebenen in Bezug auf klimaökologische Potentiale, Defizite und Funktionen dar und symbolisieren damit eine idealtypische Wiedergabe der real existierenden flächenbezogenen, klimaökologischen Situation, als Ausgangsbasis für die klimaökologische Bewertung.

### *Bewertung von Einzelaspekten/-kriterien*

- Auf Basis der Funktionsanalyse bzw. der Klimafunktionskarte sowie unter der Annahme von planerischen Fragestellungen der Bauleitplanung erfolgt eine Bewertung sowohl der klimaökologischen Potentiale als auch der Defizitbereiche.
- Hierzu werden insgesamt sechs einzelne Bewertungskriterien herangezogen, separat betrachtet und bewertet (vgl. Kapitel 7.2 Hauptklimatope: Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete, Frischluftentstehungsgebiete, Misch- und Übergangsklimate, Überwärmungspotential, moderate Überwärmung und starke Überwärmung). Diese dienen als Ausgangsbasis für die zusammenfassende Gesamtbewertung.

## 5.1 Gebäudevolumen

Um sowohl die Speicherkapazität der eintreffenden Wärmestrahlungen als auch die Barrierewirkung der Bauwerke zu berücksichtigen, ist die Themenkarte „Gebäudevolumen“ angefertigt worden.

Eingangsdaten: Blockmodell

Bearbeitung: Nachdem das Blockmodell (Gebäude mit berechneten Gebäudehöhen auf Grundlage des Digitalen Geländemodells DGM bzw. des Digitalen Oberflächenmodells DSM) (siehe Abbildung 26) angefertigt wurde, konnte das mittlere Gebäudevolumen der Stadt Erfurt berechnet werden.

Hierbei wurde auf Basis eines Datensatzes mit 10 Meter horizontaler Auflösung je eine Höhe, berechnet aus einer fließenden Gebäudehöhe der Nachbarschaft, zugeordnet, um den daraus resultierenden, dreidimensionalen Raum zu erfassen.

Um im stadtklimatischen Maßstab diese Informationen weiterverarbeiten zu können, wurden die Ergebnisse auf eine 25 Meter Auflösung aggregiert (s. Themenkarte „Gebäudevolumen“, Abb. 27). Diese Informationen fließen hauptsächlich in die Betrachtung der Wärmespeicherung ein, partiell werden Parameter von der dynamischen Berechnung der Bodenrauigkeit genutzt.

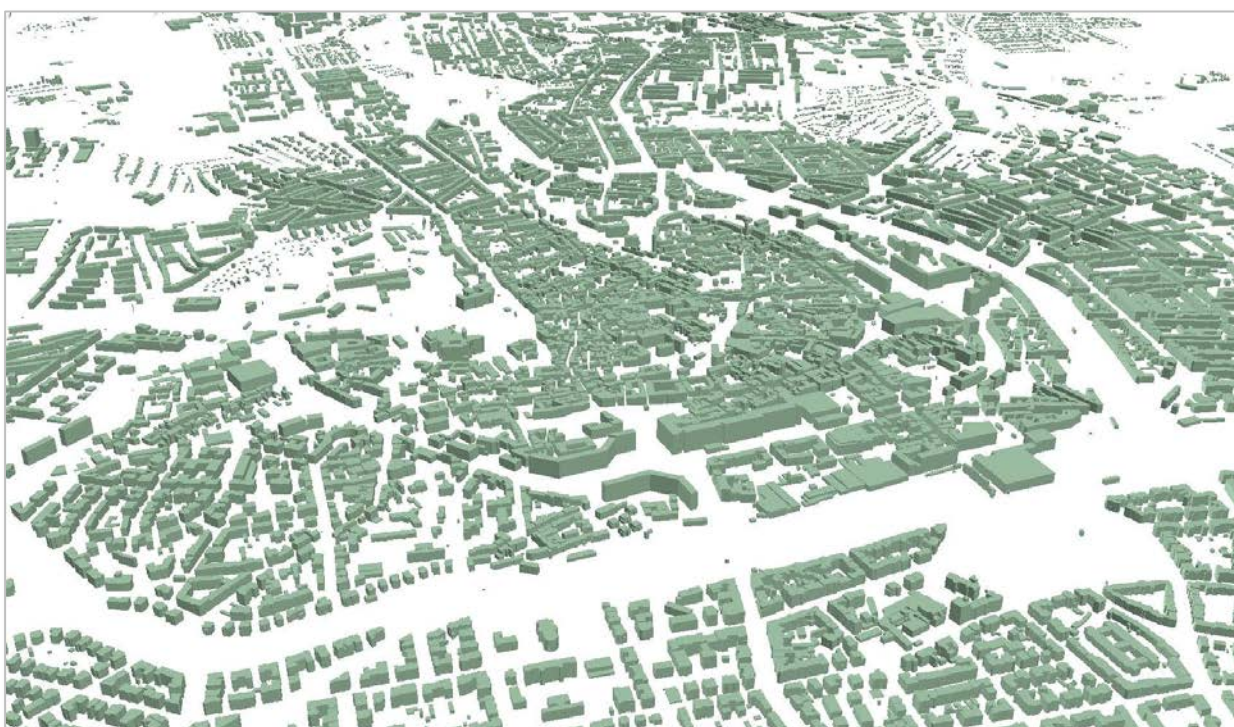


Abbildung 26: Blockmodell Erfurt (Ausschnitt, Blick auf Altstadt und Gründerzeitring aus südlicher Richtung).

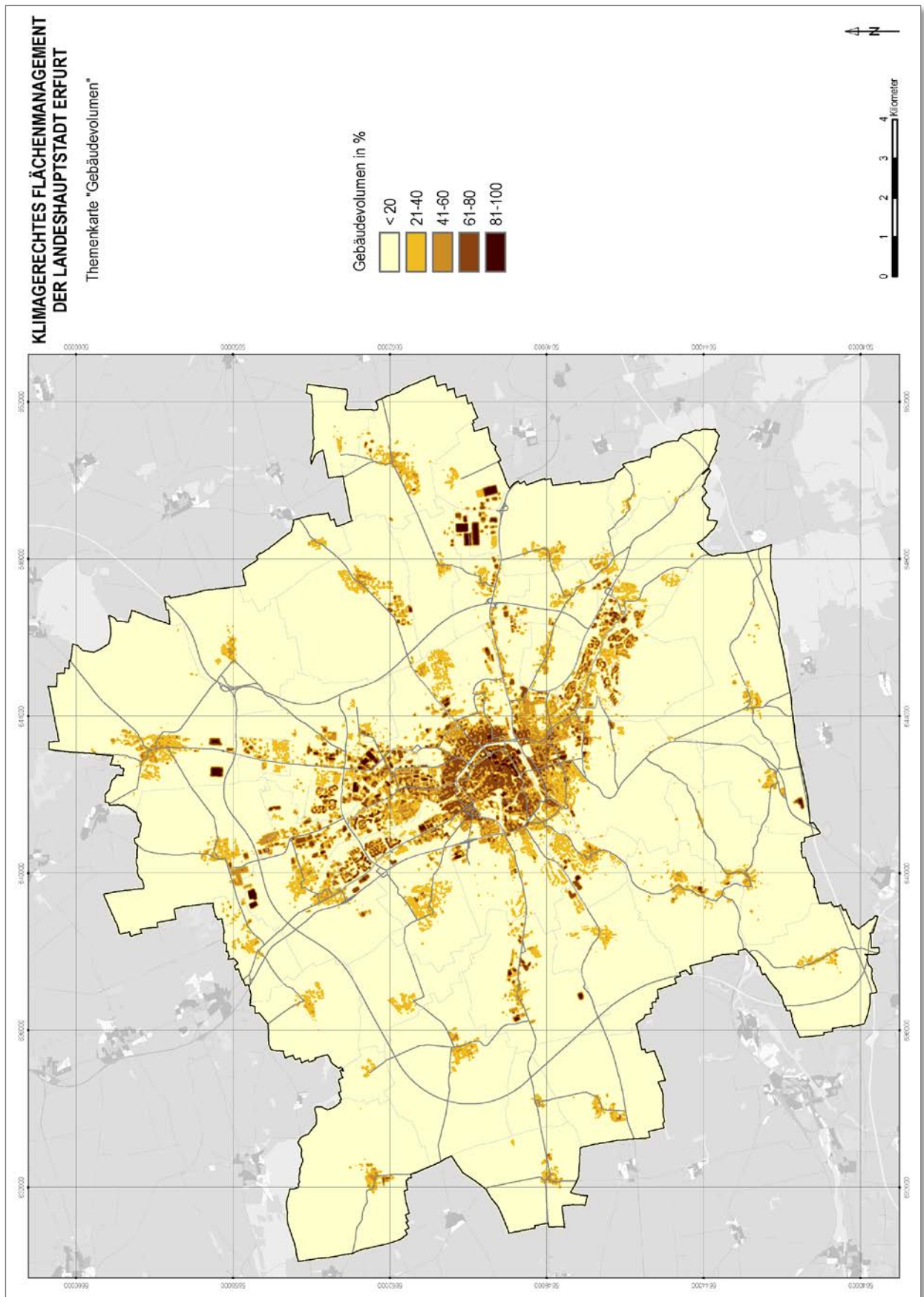


Abbildung 27: Themenkarte „Gebäudevolumen“.

## 5.2 Solare Einstrahlung

Die solare Einstrahlung (kurz- und langwellig) hat vielschichtige Auswirkungen auf die stadtklimatischen Wechselwirkungen. Sie sorgt für die Aufwärmung der Oberflächen, was in Abhängigkeit der jeweiligen Nutzung und der Oberflächenart zu unterschiedlichen Resultaten führt. Thermisch indizierte Windzirkulationen können sich daraus entwickeln. Das Abkühlverhalten hängt von der Besonnungszeit und dem Sonneneinfallswinkel sowie der Lage (Exposition) ab. Auf den Menschen im Freiraum hat die solare Einstrahlung direkten Einfluss und somit auf die Human-Biometeorologie. Sie beeinflusst somit die Freiraumnutzung sehr stark (Sonnen-/Schattenplätze) (siehe Kapitel 3.3).

Eingangsdaten: Blockmodell und DGM

Bearbeitung: Nachdem das Blockmodell auf das digitale Geländemodell projiziert wurde, konnte für einen charakteristischen Tag (21. Juni), für einen bestimmten Zeitpunkt (13:00 Uhr MESZ) die solare Einstrahlung berechnet werden. Zu diesem Zeitpunkt ist aufgrund der Lage zur Sonne mit der potentiell höchsten Einstrahlung zu rechnen. Hierbei treten besonders die südorientierten Hänge hervor, die eine sehr hohe Einstrahlung (in  $W/m^2$ ) erhalten. Vor allem die dicht bebauten Bereiche weisen teilweise sehr geringe Strahlungswerte auf, was von der gegenseitigen Beschattung der Bauwerke und der Bäume (Datenbestand: Baumkataster) verursacht wird. Die Besonnung der Wohn- und Arbeitsräume ist eingeschränkt. Beispielhaft wurde der Erfurter City-Bereich in einer feineren Skala, aus Gründen der Rechenzeit allerdings ohne Vegetation, berechnet, was die Bedeutung der Strahlung innerhalb der Stadt verdeutlichen soll (Abb. 28). Die generalisierten Ergebnisse auf 25 Meter Rasterweite fließen in die Berechnung des städtischen Wärmehaushaltes ein (s. Abb. 29).

Weitere Bearbeitungsschritte: Da die Nutzungsinformationen der Flächen relevant sind, muss diese Themenkarte weiterverarbeitet werden. In den nächsten Rechenprozessen ist die Landnutzung in Albedoklassen (Reflexionsvermögen der Oberflächen zur einfallenden Strahlung) unterteilt, die versiegelten Flächen werden analysiert und mit der solaren Einstrahlung im Modell berechnet, wodurch der Einfluss auf das Stadtklima in einem entscheidenden Baustein weiter verfeinert wird.

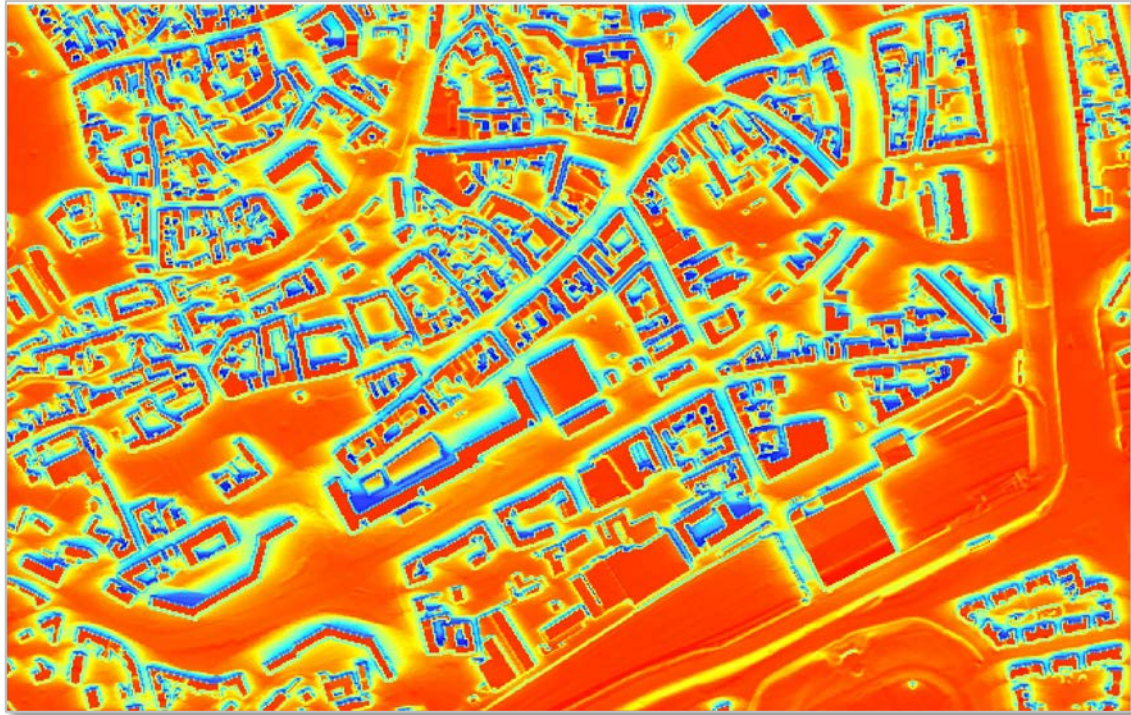


Abbildung 28: Solare Einstrahlung (Einstrahlleistung in  $\text{W}/\text{m}^2$ ) mit geringen Werten (blau; z.B. verschattete Flächen) und hohen Werten (rot), Ausschnitt Innenstadtbereich und Bahnhof (1 Meter Auflösung);



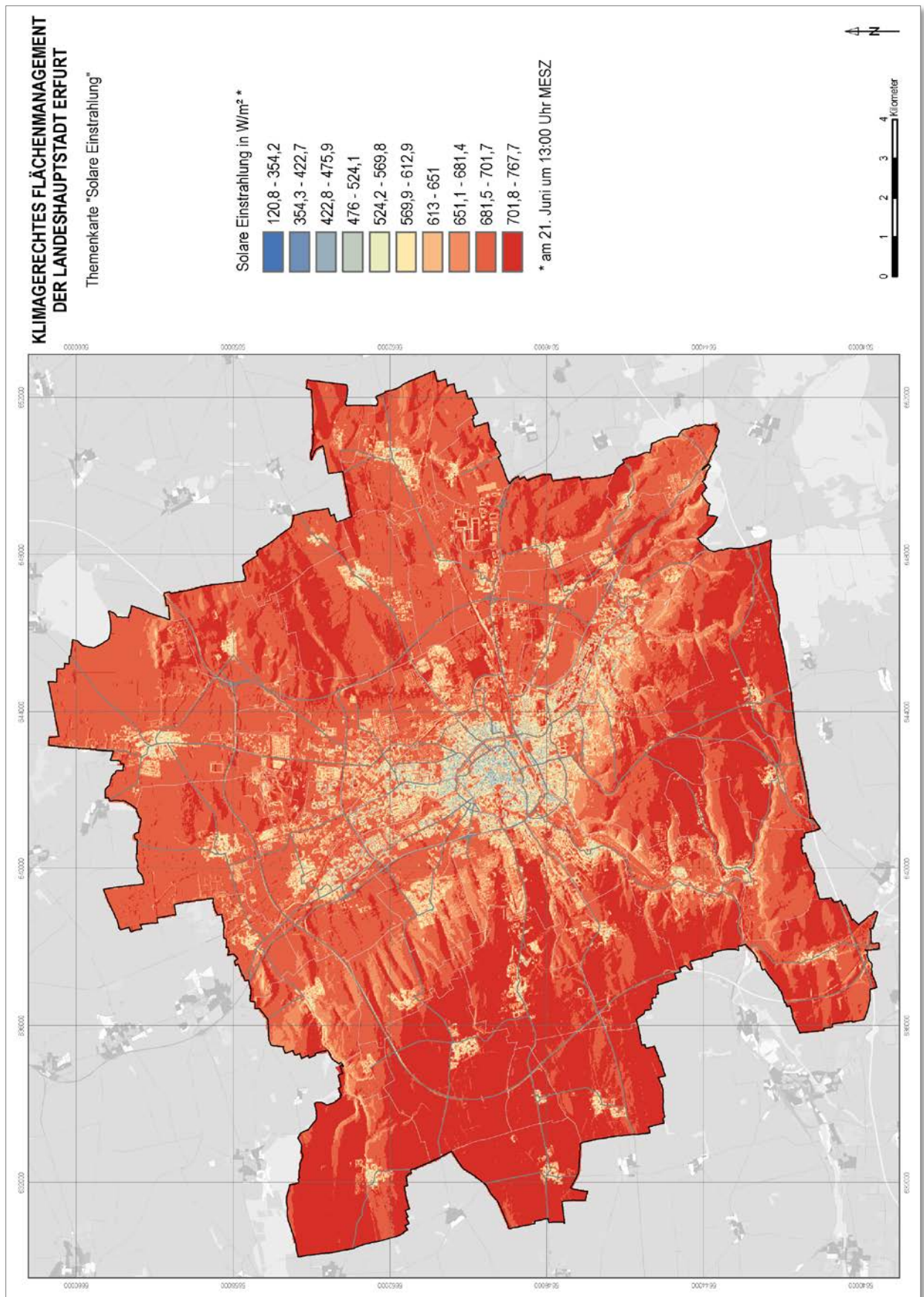


Abbildung 29: Themenkarte „Solare Einstrahlung“.

### 5.3 Kaltluftmodellierung mit KLAM\_21

KLAM 21 ist ein mathematisch-physikalisches Simulationsmodell des Deutschen Wetterdienstes zur Berechnung von Kaltluftflüssen und -ansammlungen in orographisch gegliedertem Gelände. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltlufthöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten.

Eingangsdaten: DGM, Realnutzungskartierung und Blockmodell

Für die Klimaanalyse der Landeshauptstadt Erfurt wurde eine sehr feine horizontale Auflösung von 5 Meter je Gitterzelle gewählt, um möglichst genaue Aussagen zu den teilweise sehr kleinräumigen klimatischen Wechselwirkungen der kaltluftproduzierenden Flächen treffen zu können.

Innerhalb des untersuchten Gebietes treten vor allem die südwestlich ins Erfurter Becken mündenden Täler mit einer sehr hohen Kaltlufthöhe auf. Hier sammelt sich die Kaltluft, die von den angrenzenden Hängen abfließt, um im weiteren Verlauf Richtung Innenstadt abzufließen. Diese beiden Täler haben das Potential, die belasteten Innenstadtbereiche deutlich abzukühlen, wenn die entsprechenden Korridore freigehalten sind. Die Osthänge im Bereich Marbach haben in etwas reduzierter Mächtigkeit die gleichen Potentiale. Hier kann die produzierte Kaltluft bis in die Geraue wirken.

Die Westhänge im Bereich Johannesvorstadt und Krämpfervorstadt wirken ebenfalls in Richtung verdichteter Bebauung. Ebenso die Kaltluft, die von den Hängen im Bereich Melchendorf fließt. Auch die auf den Flächen um Dittelstedt gebildete Kaltluft fließt in Richtung Zentrum.

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse 60 Minuten nach Sonnenuntergang abgebildet.



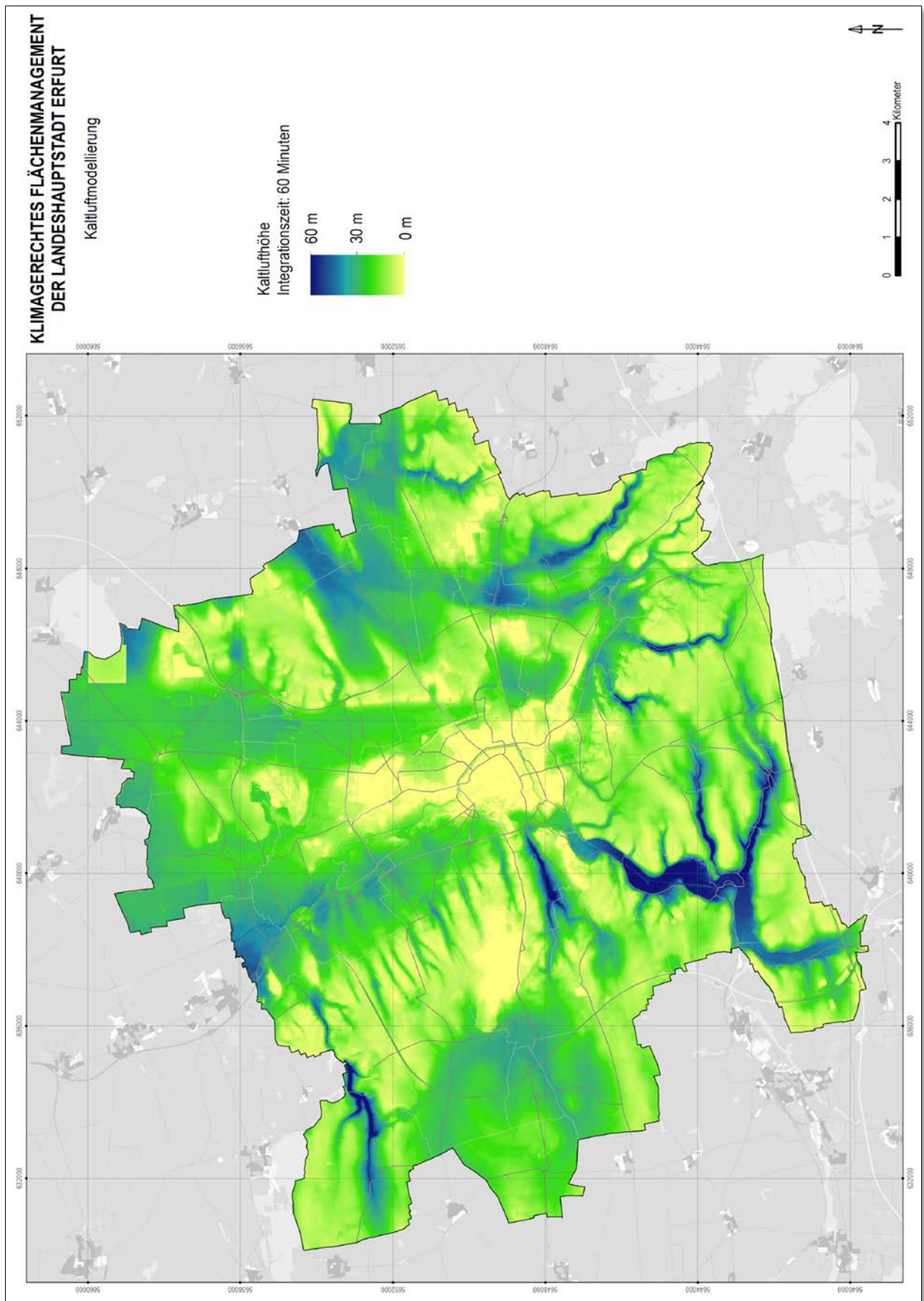


Abbildung 30: Kaltluflhöhe berechnet mit dem Kaltluftmodell des Deutschen Wetterdienstes KLAM\_21.

## 5.4 Bodenrauigkeit

Der Wind wird von der Oberflächenbeschaffenheit bzw. der Bodenrauigkeit beeinflusst. Die Windgeschwindigkeit wird in Bodennähe je nach Bodenrauigkeit reduziert. Die Erdoberfläche besitzt unterschiedliche Bodenrauigkeiten, die unterschiedlichen aerodynamischen Einfluss auf die bodennahen Luftschichten haben. Wasser- oder Eisflächen haben durch ihre fehlende vertikale Komponente eine äußerst geringe Rauigkeit, wogegen Hügel, Bäume, Häuser und Städte durch ihre vertikale Ausdehnung eine entsprechende höhere Rauigkeit besitzen. Auswirkungen sind bis in große Höhen messbar (Abb. 31).

Je höher die Bodenrauigkeit ist, ausgedrückt in Rauigkeitslänge ( $z_m$ ) bzw. Rauigkeitsklasse ( $z_0$ ), desto höher sind die Barrierewirkungen der Fläche.

Eingangsdaten: Blockmodell

Durch die Projizierung des städtischen Blockmodells auf das Digitale Geländemodell DGM konnten die Rauigkeitsklassen berechnet werden (Abb. 32). Die Barrierewirkung der Fläche bzw. die Beeinflussung des Windfeldes ist abhängig von der Windrichtung. Für die Berechnung der Rauigkeitsklassen wurden die Hauptwindrichtungen (Südwest und Nordost, vgl. Abb.9) angenommen.

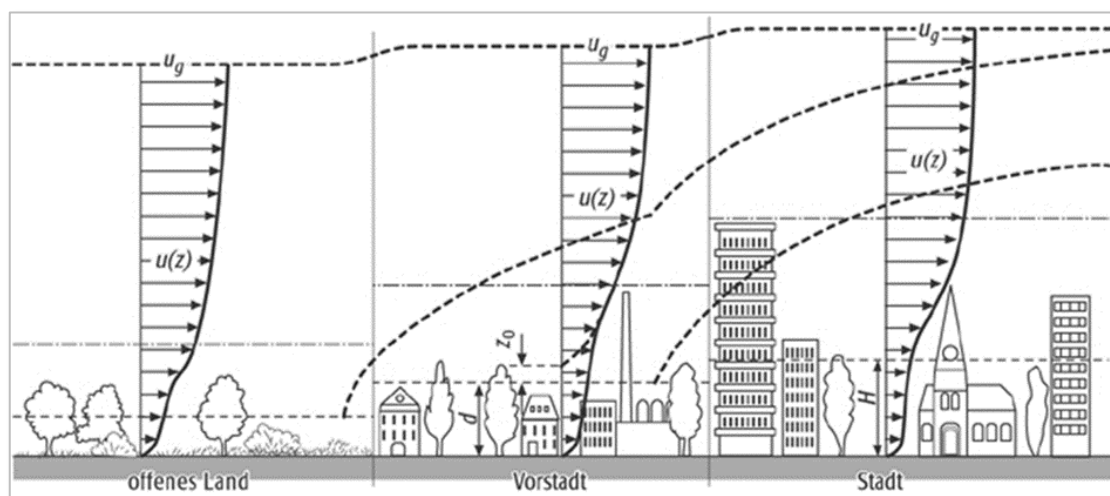


Abbildung 31: Vertikales Windprofil über dem offenen Land, Vorstadt/Stadtrand und Innenstadtbereich (nach Robel et al., 1978).

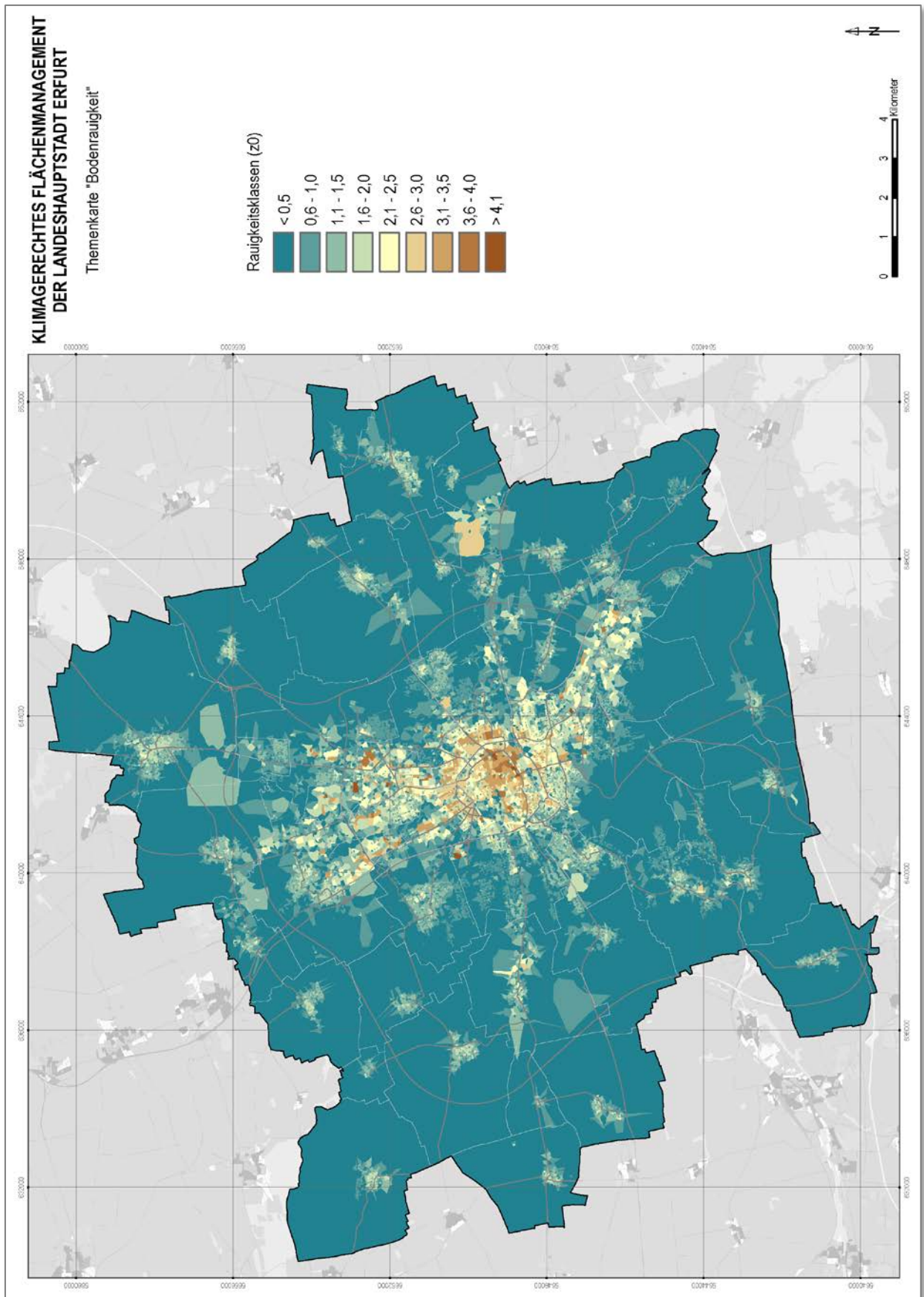


Abbildung 32: Themenkarte „Bodenrauigkeit“.

## 5.5 Hangneigung

Physikalisch bedingt „fließt“ kalte Luft aufgrund ihrer höheren Dichte und damit verbunden mit ihrem höheren Gewicht im Vergleich zu wärmerer Luft der Topografie folgend hangabwärts. Aus diesem Grund ist es aus stadtklimatischer Sicht bedeutend, Informationen der Geländeneigung/ Hanglagen mit in das Datenmodell integrieren zu können.

Eingangsdaten: Digitales Geländemodell DGM

Auf Basis des DGM konnte das gesamte Gebiet auf die Geländeneigung hin untersucht werden. Dargestellt sind bestimmte Kategorien der Hangneigung, wobei kleinräumige Vorkommen unterhalb des stadtklimatischen Maßstabes durch die Generalisierung/Aggregation in diesem Modellschritt nicht berücksichtigt wurden. Deutlich treten allerdings die großräumigen Hänge mit entsprechend hohem Gefälle in den Randbereichen (im Süden und Westen) der Stadt Erfurt hervor (s. Abbildung 33). Kleinräumige Hindernisse und Barrieren wie z. B. Lärmschutzwände wurden in der Berechnung der Dynamik separat betrachtet.

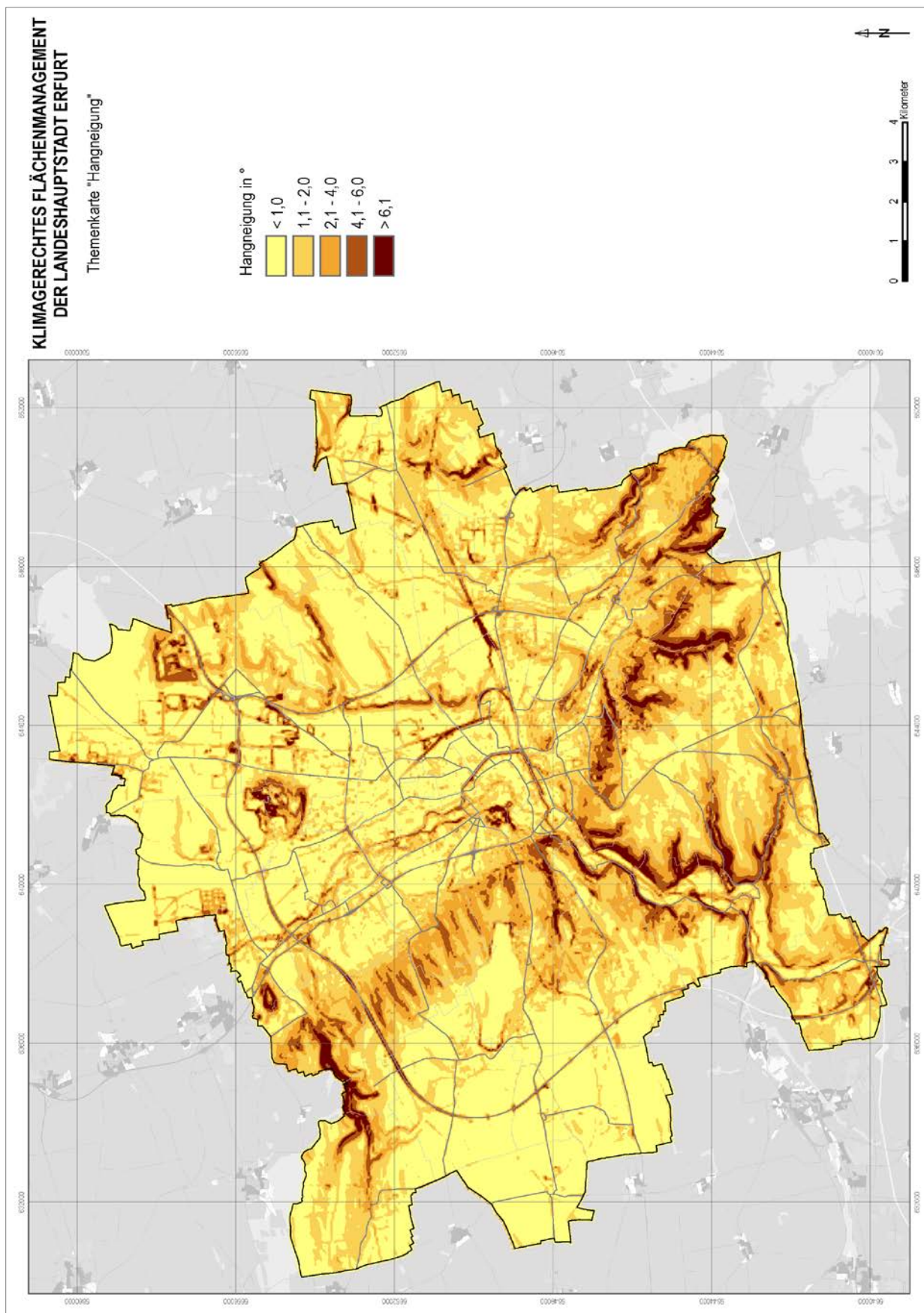


Abbildung 33: Themenkarte „Hangneigung“.

## 6. Messungen

Die Erhebung stadtklimatischer Messdaten ist für die Bewertung der Modellierung unerlässlich. Durch die Messungen können Modellergebnisse validiert und die modellbasierten Klimakarten – falls notwendig – kalibriert werden.

Die stadtklimatischen Messungen basieren auf einer temporären, mobilen Messkampagne und kontinuierlichen Messungen während des Sommers 2015. Mit der temporären Messkampagne wurde das kontinuierliche Messnetz räumlich verdichtet, so dass sowohl Aussagen zum zeitlichen Verlauf als auch eine räumliche Verfeinerung der meteorologischen Messungen möglich werden. Mit dieser Strategie kann die zeitliche und räumliche Variabilität besser erfasst werden. Die Konfiguration des Messnetzes ist für das Erfurt Stadtgebiet repräsentativ.

In Abbildung 34 wird eine Übersicht zur Lage der Messstationen und Messrouten im Stadtgebiet gegeben. Die kontinuierlichen Messdaten stammen zum einen von den Messstationen der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Bergstr. und Krämpferstr.; grüne Punkte) und zum anderen von im Rahmen des Gutachtens installierten Messgeräten (violett), die an stadtklimatisch relevanten Standorten notwendige meteorologische Parameter registrierten.

Die Messrouten Innenstadt (rot), Nord (gelb) und Süd (blau) sind temporäre Messungen während einer sehr heißen Wetterphase vom 02.07.2015 – 04.07.2015. Die Messungen an den im Rahmen des Gutachtens installierten Messgeräten und die Messungen der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) sind kontinuierliche Erfassungen der meteorologischen Parameter während des gesamten Sommers im Zeitraum von 01.06. bis 31.08.2015. Die TLUG Stationen bestehen seit Jahren.

Neben diesen bodennahen Messungen wurde eine Vertikalsondierung während einer sehr heißen Wetterphase vom 02.07.2015 – 04.07.2015 durchgeführt, um ein vertikales Temperaturprofil an einem Messpunkt zu erhalten.

### 6.1 Kontinuierliche, stationäre Messungen

Alle installierten Messpunkte waren ca. 1,6 Meter über Grund und befanden sich vor Strahlung geschützt unter einem Baum. Die Lage der Standorte ist über die geographischen Koordinaten in Abbildung 34 definiert. Die Standorte wurden so gewählt, dass diese für die hier vorgenommene klimatische Bewertung (z.B. das nächtliche Abkühlungsverhalten) hinreichend geeignet sind. Die Werte der Messungen sind zueinander vergleichbar und dienen zur Kalibrierung des Modells.

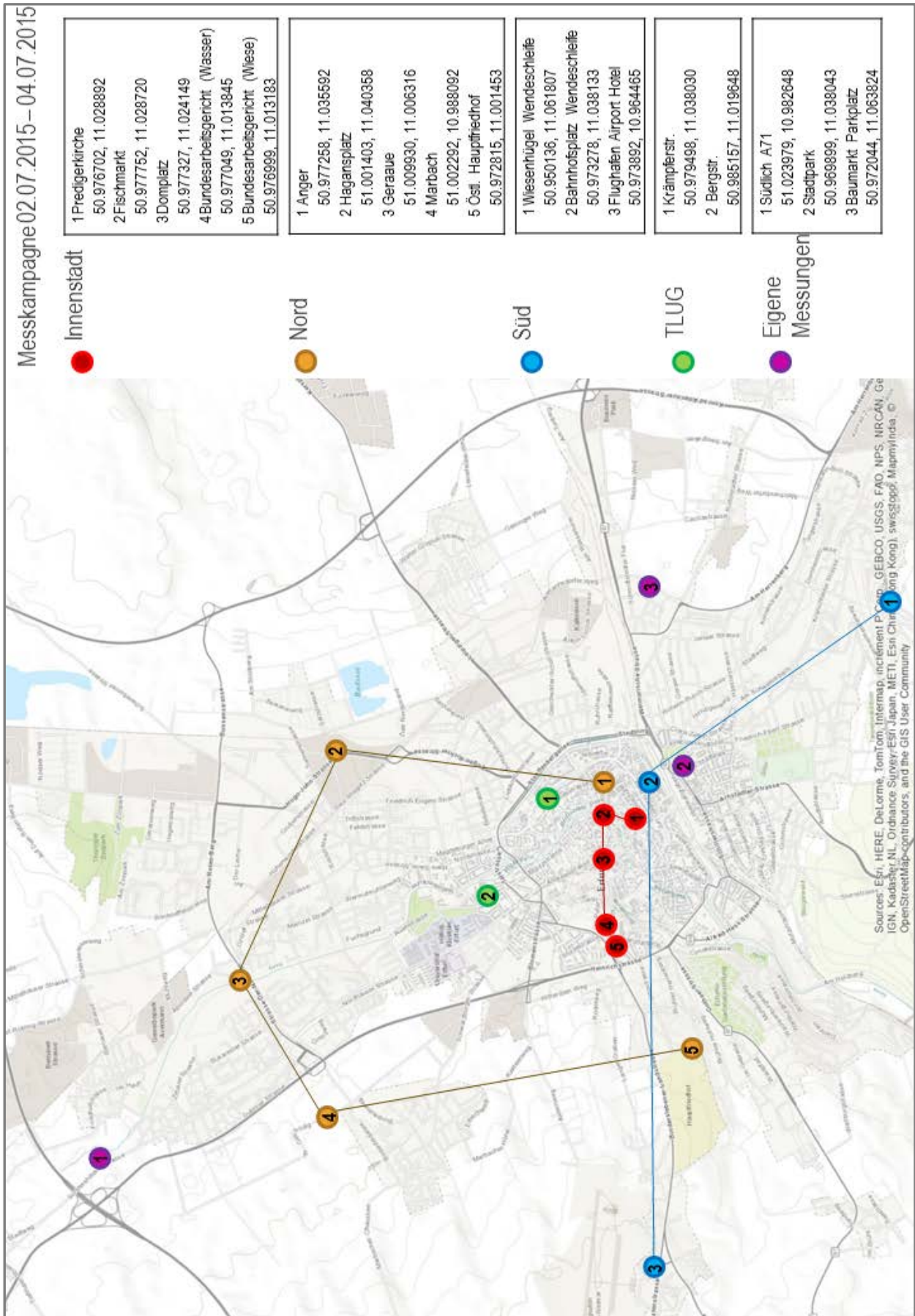


Abbildung 34: Lage der temporären und kontinuierlichen Messorte im Erfurter Stadtgebiet.

### 6.1.1 Messpunkt Baumarkt Parkplatz (Dittelstedter Flur)

Im Osten der Stadt, in der Nähe der Kreuzung Hermsdorfer Straße / Eisenberger Straße, wurde ein Messgerät mit Datenlogger auf dem Parkplatz eines Baumarktes installiert. An dieser Stelle wurden kontinuierlich die Werte der Lufttemperatur gemessen und im Intervall von 30 Minuten gespeichert.

### 6.1.2 Messpunkt südlich A71 bei Gispersleben

Im Norden der Stadt, entlang der Sondershäuser Straße, wurde ein Messgerät mit Datenlogger auf einer kleinen Streuobstwiese installiert. An dieser Stelle wurden kontinuierlich die Werte der Lufttemperatur gemessen und im Intervall von 30 Minuten gespeichert.

### 6.1.3 Messpunkt Stadtpark

Südlich der Innenstadt im vegetationsreichen Stadtpark von Erfurt wurde ein Messgerät mit Datenlogger installiert. An dieser Stelle wurden kontinuierlich die Werte der Lufttemperatur gemessen und im Intervall von 30 Minuten gespeichert.

## 6.2 Messstationen der TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie)

a) Östlich der Erfurter Innenstadt, in der Krämpferstraße, werden Daten im Rahmen des Thüringer Immissionsmessnetzes erhoben. Diese Messungen umfassen neben den umfangreichen Luftqualitätsdaten auch meteorologische Komponenten wie die Lufttemperatur als Stundenmittelwert. Der Umgebungstyp der Messstation ist städtisch geprägt.

b) Nördlich der Erfurter Innenstadt, in der Bergstraße, befindet sich eine weitere Messstation im Rahmen des Thüringer Immissionsmessnetzes. Diese Messungen umfassen neben den umfangreichen Luftqualitätsdaten auch meteorologische Komponenten wie die Lufttemperatur als Stundenmittelwert. Der Umgebungstyp der Messstation ist verkehrsnah.

## 6.3 Temporäre, mobile Messkampagne

Die mobile Messkampagne verlief über drei Routen, wobei die Routen "Innenstadt" und "Nord" je fünf Messorte (Messintervall: 10 Minuten) und die Route "Süd" drei Messorte umfasste (Abbildung 34).

### 6.3.1 Messroute Innenstadt

Die Innenstadtroute ist besonders relevant, da sie hauptsächlich zur Kalibrierung der Klimatope der Klimafunktionskarte im sehr heterogenen Gefüge der städtischen Mikroklimata herangezogen wird.



Zum Einsatz kam ein mobiler umweltmeteorologischer Klimamesswagen MUK (siehe Abbildung 35) mit hochauflösenden Messgeräten, der in vielen nationalen und internationalen Forschungsprojekten methodisch validiert wurde.

In einer Höhe von ca. 1,1 Meter wurden folgende meteorologischen Parameter aufgezeichnet:

- Lufttemperatur
- relative Luftfeuchtigkeit
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Globalstrahlung
- Globetemperatur (zur Berechnung des stadtklimatischen Indizes PET)

Zusätzlich (manuell): Oberflächentemperatur



Abbildung 35: Mobiler umweltmeteorologischer Klimamesswagen MUK

### 6.3.2 Messroute Nord

Die Nordroute umfasste, beginnend in der Innenstadt (Anger), Messorte in den Außengebieten der Stadt. Hier sollten vor allem die nächtliche Abkühlung und die Windverhältnisse untersucht werden.

Zum Einsatz kamen transportable Messgeräte, die schnell und leicht an den nächsten Ort gebracht werden konnten.

Gemessen wurden folgende Parameter in einer Höhe von ca. 1,2 Meter:

- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Windrichtung und -geschwindigkeit
- Oberflächentemperatur
- Globetemperatur
- Globalstrahlung



Abbildung 36: Mobile umweltmeteorologische Messstation.

### 6.3.3 Messroute Süd

Die Südroute sollte ein Querprofil durch das Erfurter Becken messtechnisch erfassen. Beginnend von der Wendeschleife der Straßenbahn „Am Wiesenhügel“ südlich der Stadt auf ca. 270 m Höhe wurde der nächste Messpunkt in der Nähe des Hauptbahnhofs „Willy-Brandt-Platz“ (Höhe ca. 196 m) angefahren. Die Südroute endete in der Nähe des Flughafens Erfurt/Weimar bei einer Höhe von ca. 310 m. Ein Querschnittsprofil der Messpunkte durch das Erfurter Becken ist in Abbildung 37 dargestellt.

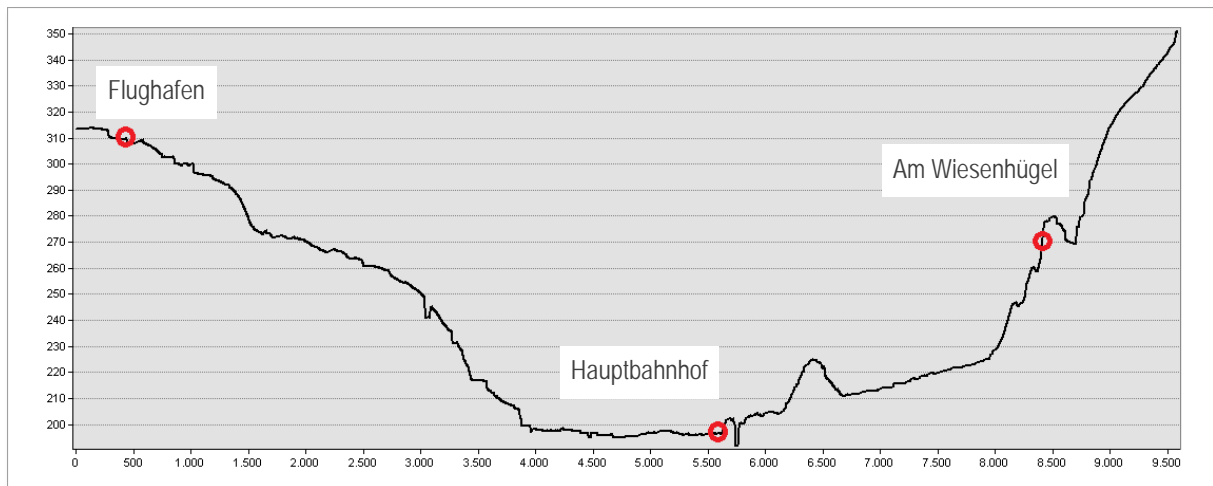


Abbildung 37: Höhenlagen der Profilmessung.



Abbildung 38: Standorte der Messroute Süd (v.l.): Flughafen (Airport Hotel), Hauptbahnhof (Willy-Brandt-Platz), Am Wiesenhügel (Straßenbahn Wendeschleife)

### 6.3.4 Vertikalsondierung (Drohnenaufstieg)

Zum Einsatz kam eine Drohne der Firma Dij, Modell Flameweehl F550, die mit einem GPS- und Temperatursensor ausgestattet wurde. Hiermit besteht die Möglichkeit, punktgenau an einem Messpunkt in die Höhe zu steigen, um Temperaturdaten der städtischen Grenzschicht zu erheben. Der Messpunkt lag östlich der Ruhrstraße im Bereich der Äußeren Oststadt auf dem Gelände der SWE.

Gemessen wurde in zwei Messgängen während der umfangreichen Messkampagne vom 02.07. – 04.07.2015. Am 02.07. wurde zwischen 16:12 und 16:22 der Nachmittagsaufstieg während des Tagesmaximums der Lufttemperatur durchgeführt und am 03.07. wurde zwischen 05:58 und 06:08 die Nachtsituation während der größtmöglichen Abkühlung erhoben.



Abbildung 39: Drohnenaufstieg, Verlängerung Ruhrstraße Erfurt.

## 6.4 Auswertung und Interpretation

Die Abbildung 40 zeigt den Tagesgang der Temperatur der kontinuierlichen Messstationen während der ersten Hitzewelle (01.07. bis 04.07.2015). Das typische Verhalten unterschiedlicher Mikroklimata ist zu erkennen. Die Stationen Krämpferstraße (gelb) und Bergstraße (rot) sind charakteristische Stadtstationen mit reduzierter nächtlicher Abkühlung. Die Standorte "Baumarkt/Dittelstedter Flur" (grau) und "Südlich A71 bei Gispersleben" (blau) mit hohem Vegetationsanteil und nächtlicher Kaltluftbildung/-zufuhr zeigen eine hohe nächtliche Abkühlung. Die Station "Südlich A71 bei Gispersleben" (blau) lag an einem sonnenexponierten Standort und ist von mit hohen Tagestemperaturen, jedoch starker nächtlicher Abkühlung geprägt. Der Stadtpark (grün) ist durch die hohe Vegetation in seiner Ein- und Ausstrahlung eingeschränkt, besitzt so jedoch einen **positiven Einfluss auf das Abkühlungsverhalten**. Je länger die Hitzeperiode dauert, desto stärker ist die abkühlende Wirkung.

Sowohl am Standort "Baumarkt/Dittelstedter Flur " als auch "Südlich A71 bei Gispersleben " kommt die einwirkende Kaltluft (gebildet in der Dittelstedter Flur bzw. in der nördlichen Geraue in Gispersleben) positiv zum Tragen. Im Nachtzeitraum von 22-6 Uhr liegen die Lufttemperaturen deutlich unter denen der Stadtstationen. Das Kriterium einer Tropennacht (nächtliches Temperaturminimum von über 20°C) wurde während dieser Hitzewelle an diesen Stationen – im Gegensatz zu den Stadtstationen – nicht erreicht.

Die **thermische Belastung ist in der Innenstadt am höchsten**, wie die Messungen in der Bergstraße und in der Krämpferstraße zeigen. Die Messungen an beiden Stationen belegen das Auftreten von Tropennächten und Tagestemperaturen von über 40°C am Tag. Zwischen der Innenstadt und den Umland besteht ein Temperaturunterschied von +5°C, insbesondere am Abend und in der Nacht. Ausdrücklich zum Tragen kommt die nächtliche Abkühlung entlang der Belüftungskorridore (z.B. Dittelstedter Flur).

In Korrelation zu den berechneten Klimatopen der Klimafunktionskarte (vgl. Kapitel 7) stimmen die gemessenen Werte sehr gut überein. Für die Kalibrierung der Klimaklassen ist nicht der Tageswert sondern die nächtliche Abkühlungsrate entscheidend. Hierfür sind die Temperaturmessungen repräsentativ und untereinander vergleichbar. Die Abkühlungsrate ist geprägt durch die Abstrahlung der Oberflächen und beeinflusst die Kaltluftbildung und damit verbundene Hangabwinde entscheidend. In diesem Zusammenhang wird die thermische Belastung bestimmt.

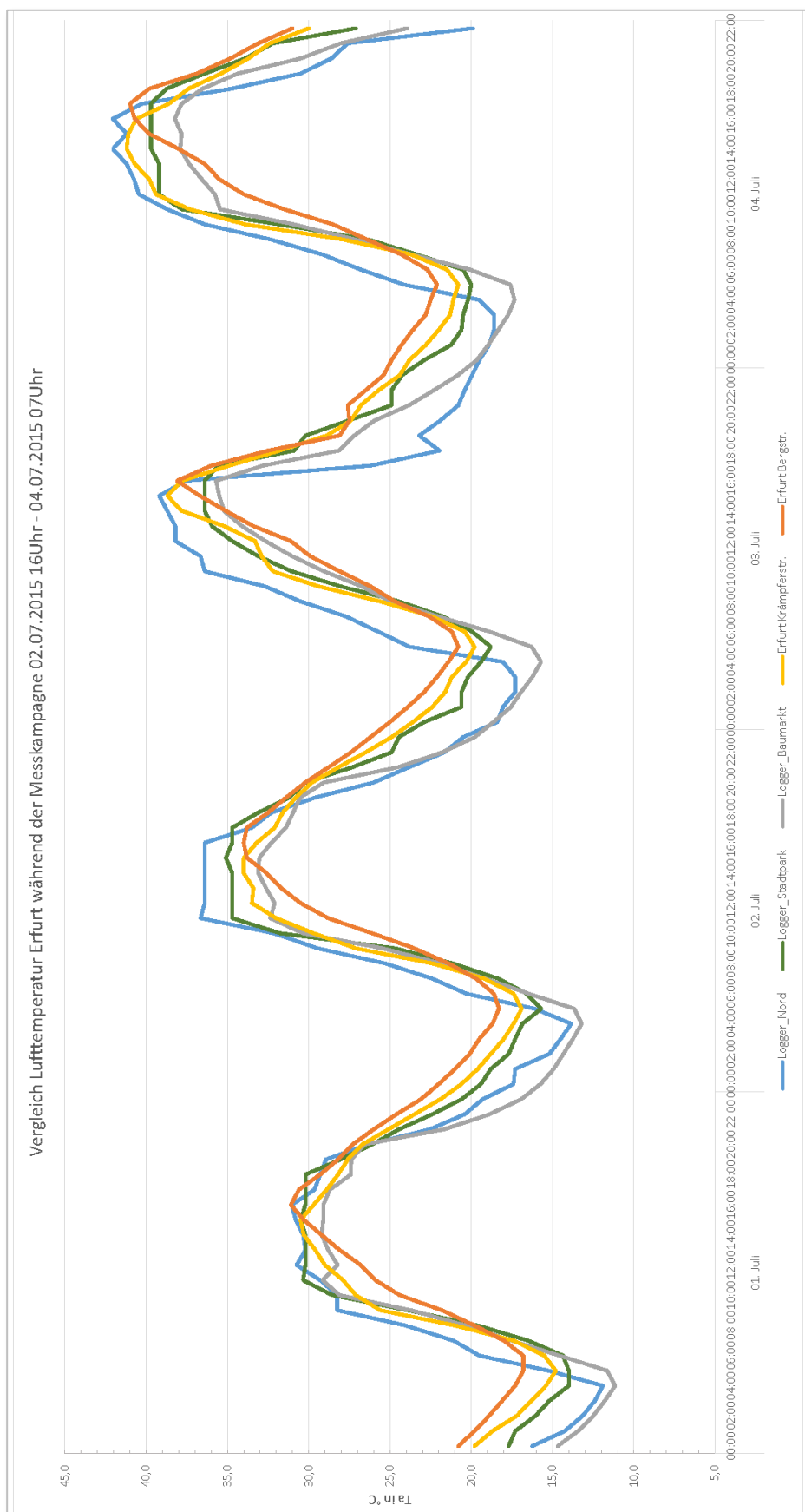


Abbildung 40: Tagesgang der Lufttemperatur an unterschiedlichen Messpunkten in Erfurt "Südlich A71" (blau), "Stadtpark" (grün), "Baumarkt" (grau), TLUG Krämpferstraße (gelb) und TLUG Bergstraße (orange) während einer heißen Periode 01.07. bis 04.07.2015.

### Fazit (Messkampagne):

Die nächtliche **städtische Wärmeinsel Erfurts beträgt ca. + 5 °C** (gegenüber dem Umland). Der Stadtpark zeigt eine temperaturreduzierende Wirkung von ca. 2 °C. Die durch Kaltluft geprägten Standorte im Umland weisen am Abend und in der Nacht eine deutliche Reduzierung der Lufttemperaturen auf, vor allem je länger die Hitzeperiode anhält. Die lang andauernde Hitzewelle verursachte ein verringertes Abkühlen der nächtlichen Temperaturen bzw. ein Anstieg der Wahrscheinlichkeit einer Tropennacht, so dass die nächtliche Erholungsphase des Organismus zusätzlich beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund ist es wichtig, eine ausreichende, nächtliche Kaltluftzufuhr sowie lokale Kaltluftbildung auf Grünflächen zu schaffen, um die hohe städtische Überwärmung so gering wie möglich zu halten.

### Vertikale Temperaturschichtung innerhalb der städtischen Grenzschicht:

Um die vertikale Temperaturverteilung zu bestimmen, wurden Vertikalsondierungen mittels Drohne durchgeführt. Wie in den Abbildungen in Kapitel 4.5 dargestellt, ist die städtische Hindernisschicht als die Schicht zwischen Oberfläche bis zum mittleren Dachniveau definiert. Diese Luftschicht ist für den Menschen als häufigster Lebens- und Aufenthaltsraum von größter Bedeutung.

Die Abbildungen 41 und 42 zeigen eine Tag- und eine Nachtsituation am 2. bzw. 3. Juli während der Hitzewelle 2015. Tags bildet sich über Erfurt eine Durchmischung aus, die in den untersten Schichten bis 10 m durch konvektive Prozesse sehr labil (Durchmischung) ist. Sehr hohe Lufttemperaturen von über 35°C werden in den unteren 5 m sichtbar, die relevant für die Bewertung des bioklimatischen Wirkungskomplexes des Menschen sind. Oberhalb des Dachniveaus ist eine stabilere Schichtung mit einzelnen Unterbrechungen labiler Phasen zu erkennen. Die Unterbrechungen sind dabei allerdings hauptsächlich messbedingt.

Die Nachtsituation hat mit Eintreten der negativen Strahlungsbilanz einen Abkühlungseffekt zur Folge, der jedoch innerhalb der Grenzschicht zunächst sehr stabil und nur von kleineren Turbulenzen durchbrochen bis ca. 50 Meter eine Isothermie (nahezu gleiche Lufttemperaturen, Wärmeglocke) aufweist. Darüber liegt dann eine Inversion im Erfurter Becken (die Untergrenze liegt bei 50 Meter über Grund). Die Höhe der städtischen Inversion stimmt gut mit bisher bekannten Analysen überein (vgl. Luftreinhalteplan Erfurt Teil 1 1995, Klimaanalyse Erfurt 1993). Die Inversion wird tagsüber trotz einer Wetterlage mit hoher Sonneneinstrahlung nicht vollständig aufgelöst. Es liegen eingeschränkte Luft- und Wärmeaustauschverhältnisse vor.

Die Ergebnisse der Vertikalsondierung zeigen deutlich die **Wärmeentwicklung der Stadt** in der bodennahen Luftschicht (bedingt durch Bebauung und Versiegelung). Vor allem die Messwerte in der städtischen Hindernisschicht zeigen eine hohe Wärmebelastung am Tag und in der Nacht.

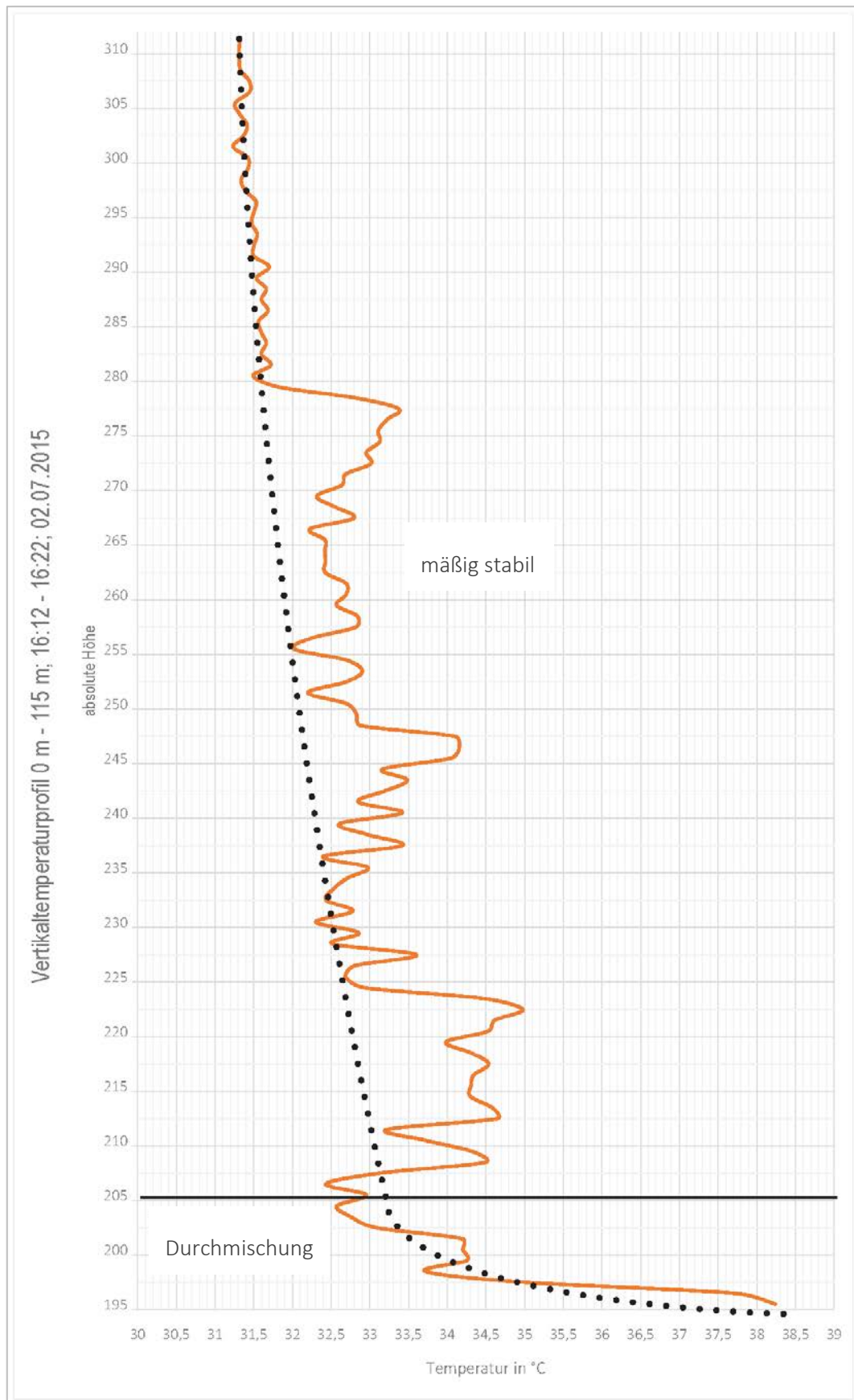


Abbildung 41: Darstellung der Messergebnisse mit angedeuteter schematischer Interpretation (Tagsituation).

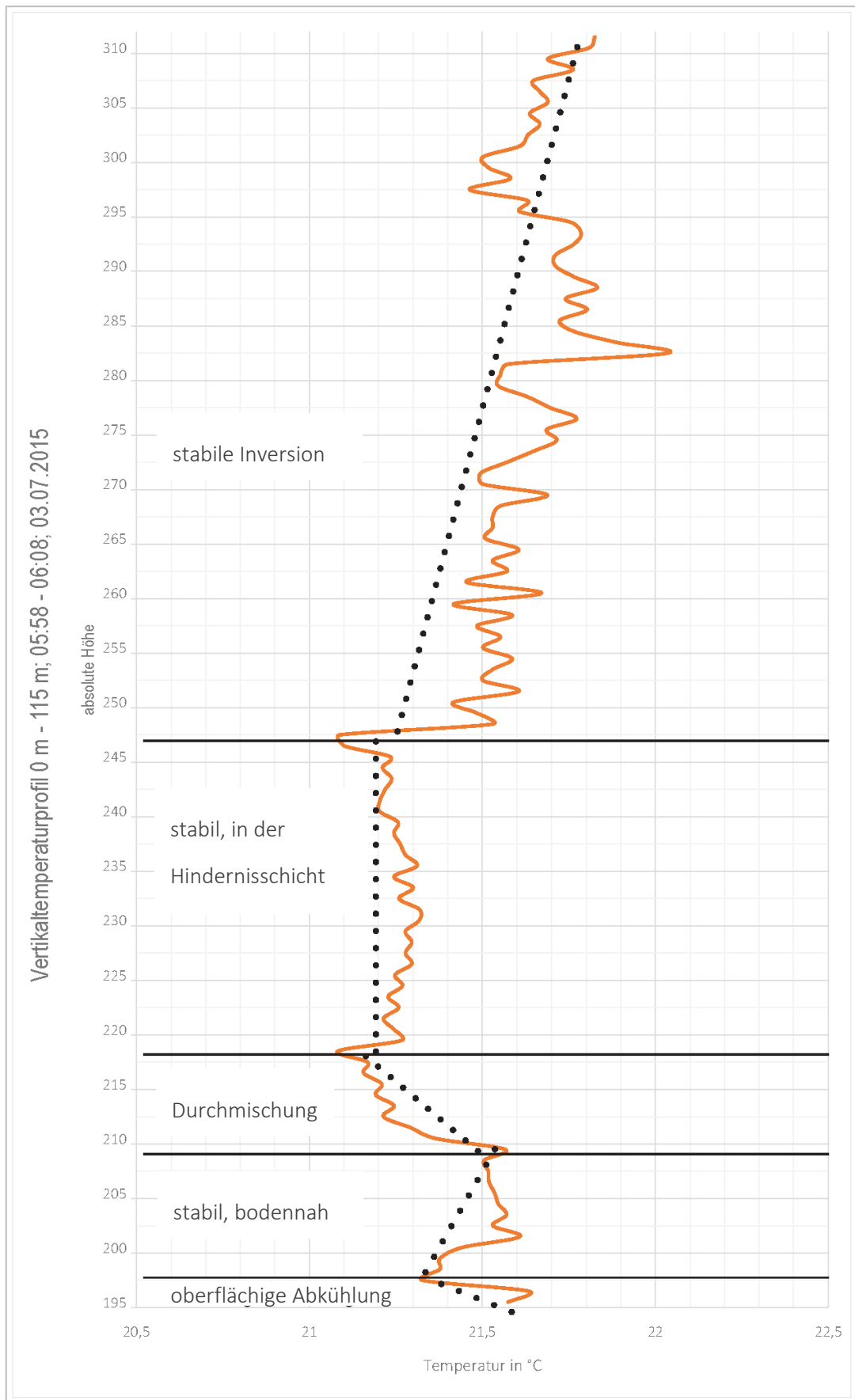


Abbildung 42: Darstellung der Messergebnisse mit angedeuteter schematischer Interpretation (Nachtsituation).



## 6.5 Thermalaufnahme

Neben den punktuellen Messungen der unterschiedlichen meteorologischen Parameter wurde vom Institut für Geographie, Lehrstuhl Fernerkundung, der Friedrich-Schiller-Universität Jena, eine Thermalbildauswertung aus Satellitendaten zur Verfügung gestellt.

Abbildung 43 zeigt die **Landoberflächentemperaturen** am 19.07.2015 um 12:09 Uhr Ortszeit (Tagzeitraum). Dieser Tag war ein sehr heißer Sommertag mit Lufttemperaturen über 30 °C, allerdings mit einigen Wolkenfeldern über dem Erfurter Stadtgebiet. Die Wolken sind die blauen (kühlen) Bereiche der Karte mit den sehr geringen Temperaturen. Durch die Abtastung des Satelliten werden die niedrigen Temperaturen der Wolkenobergrenze und nicht die der Erdoberfläche messbedingt erfasst. Diese sind nicht mit den restlichen Flächen der Erdoberfläche zu vergleichen.

Insgesamt betrachtet stimmen die Oberflächentemperaturen gut mit den Ergebnissen der Klimatopanalyse der Klimafunktionskarte (vgl. Kapitel 7) überein. Die Innenstadtstrukturen und die großflächigen Industriegebiete im Norden der Kernstadt bzw. entlang A71 sind geprägt von hohen Oberflächentemperaturen. Auch das Güterverkehrszentrum, die Gewerbeflächen entlang der Weimarischen Straße und die Flächen südlich des Flughafens (inkl. Landebahn) zeigen höhere Oberflächentemperaturen. **Kühlere Bereiche sind hauptsächlich Wald-, Grün- und Parkflächen** (z.B. Steiger, Stadtpark, Südpark, Nordpark, nördliche Geraaue, Petersberg, Stauffenbergallee) sowie Wasserflächen (z.B. Nordstrand, Erfurter Seenkette).

Allerdings gibt es auch einzelne Abweichungen im Vergleich zur Klimafunktionskarte und der Karte der Oberflächentemperaturen. Deutlich treten landwirtschaftlich genutzte Flächen mit sehr hohen Temperaturwerten hervor (z.B. im Nordosten des Stadtgebietes). Hierbei handelt es sich um unversiegelte, unbebaute Flächen, die tagsüber dasselbe Temperaturniveau wie versiegelte Flächen (Straßen, Industrieflächen, etc.) erreichen. Es handelt sich wahrscheinlich um frisch geerntete Felder. Die dunkle Farbe der Felder (niedrige Albedo/Rückstrahlung der Sonnenenergie) und der Feuchtegehalt des Bodens führen zu dieser Aufwärmung. Zusätzlich können Flächen südlich exponiert sein, wodurch die Sonneneinstrahlung am höchsten ist (vgl. Themenkarte Solare Einstrahlung Kapitel 5.2). Diese hohen Oberflächentemperaturen sind ebenfalls an anderen Stellen der Karte zu finden und bei einer Interpretation der Temperaturverteilung zu beachten.

Thermalaufnahmen sind stets differenziert zu beurteilen, da es sich um die Oberflächentemperaturen zu einem bestimmten Zeitpunkt handelt. Kleinräumig ausgedrückt stehen die Temperaturverhältnisse der Straße und dem Dach nebeneinander, obwohl unterschiedliche Höhen vorliegen und entsprechende Kleinklimate herrschen. Zudem werden keine weiteren meteorologischen Parameter dargestellt, die zur Abschätzung der Hitzebelastung eine ausschlaggebende Rolle spielen. Diese Wechselwirkungen können nur in der Klimafunktionskarte analysiert und dargestellt werden.

Fazit (Thermografie):

Mit der Infrarot-Thermografie sind **hoch aufgelöste Momentaufnahmen** der Temperatur der Erdoberfläche möglich, die so kein stationsbasiertes Messnetz liefern könnte. Die **Oberflächentemperaturen sind nicht identisch mit Lufttemperaturen** oder der thermischen Belastung, jedoch erhält man Hinweise auf bebauungsbedingte Unterschiede der Temperaturverteilung (Wärmeinseln, Kaltluftentstehungsgebiete) flächendeckend für das gesamte Stadtgebiet. Zur Prüfung und Validierung der Temperaturstrukturen der Klimafunktionskarte ist mit entsprechendem Hintergrundwissen in Fernerkundung / Satellitenbildinterpretation die zur Verfügung gestellte Thermalaufnahme hilfreich.

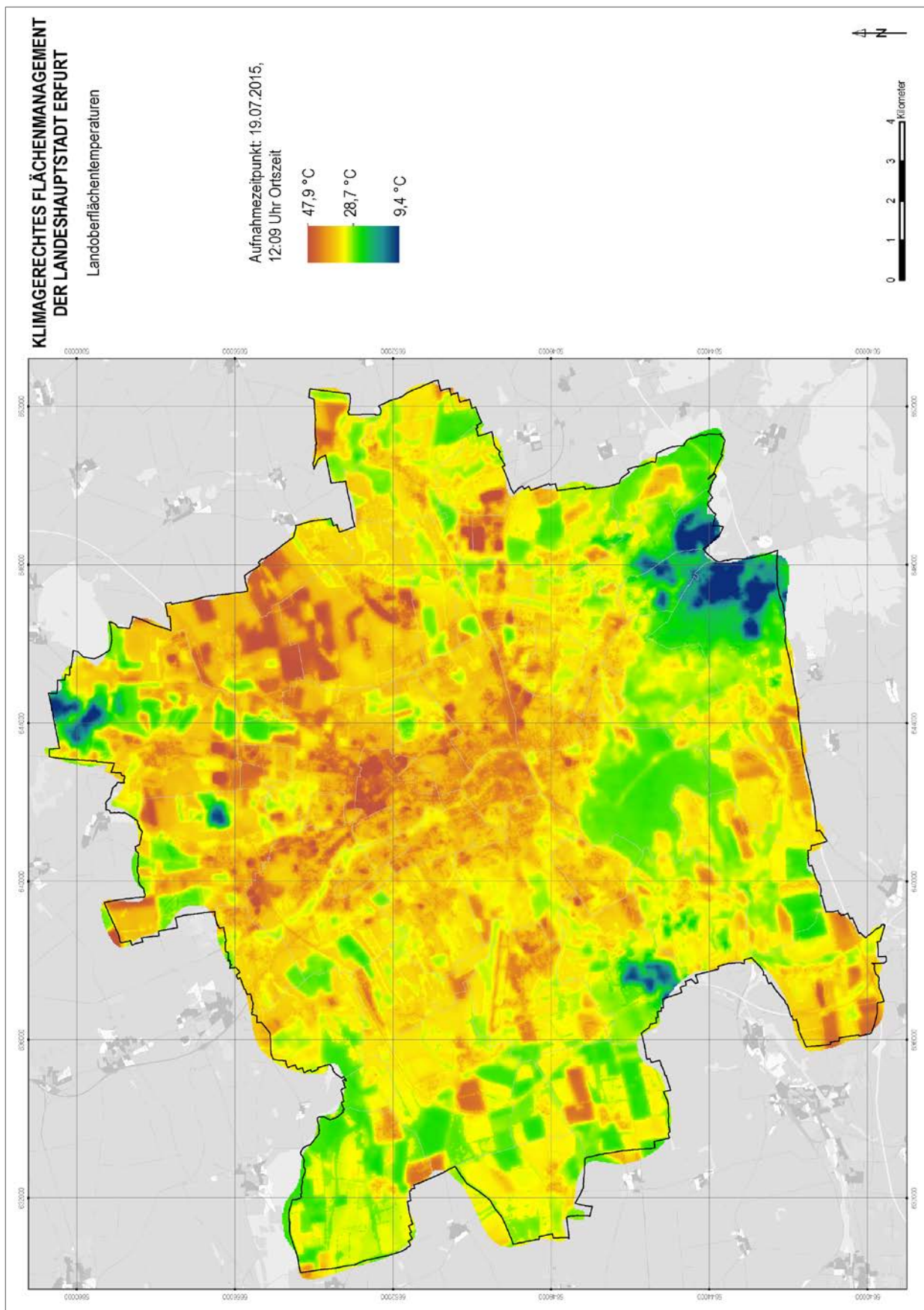


Abbildung 43: Landoberflächentemperaturen am 19.07.2015 um 12:09 Uhr Ortszeit.

## 7. Klimafunktionskarte

Eine Klimafunktionskarte stellt die räumlichen Klimaeigenschaften einer Fläche dar, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie sowie der meteorologischen Randbedingungen einstellen. Dargestellt werden flächendeckend die thermischen und dynamischen Verhältnisse des Erfurter Stadtgebietes. Eine Klimafunktionskarte erleichtert dem Planer stadtklimatische Belange zu berücksichtigen und mögliche lokalklimatische Auswirkungen einer Nutzungsänderung zu bewerten. Die einheitliche Erstellung (Symbole, Begriffe) einer Klimafunktionskarte und die daraus abgeleitete Planungsempfehlungen regelt die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1.

### 7.1 Klimatope

Klimatope bezeichnen räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen und die klimatischen Bedingungen wenig unterschiedlich sind (VDI RL 3787 Blatt 1).

Eine wichtige Grundlage für die Charakterisierung der Klimatope ist der beschriebene thermische Index PET (Höppe, 1999). Er beschreibt und bewertet die Eigenschaften und die Wirkung der Klimatope auf den Menschen und vermittelt das Stressniveau (siehe Kap. 3.3). Grundlage bilden die Untersuchungen über das thermische Empfinden aus verschiedenen Forschungsprojekten im Rahmen der KLIMES Projekte (Katzschner, 2011).

Der Gesetzgeber hat den Städten bei der Aufstellung von Bauleitplänen vorgegeben, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürliche Lebensgrundlage zu schützen und zu entwickeln und dabei auch die Belange des Klimas zu berücksichtigen (§1 Abs. 5 BauGB). Das Ziel ist die Schaffung und Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsbedingungen. Die Aspekte des Stadtklimas sind durch die Stadtplanung beeinflussbar und deshalb frühzeitig zu berücksichtigen.

Während dem Auftreten von Hitzeperioden wird das Anpassungsvermögen von empfindlichen Personen, älteren und kranken Menschen, Schwangeren und Kindern häufig überfordert. Die Wirkung von Hitze auf Morbidität (Ziffer für die Häufigkeit von Erkrankungen) und Mortalität (Sterbeziffer) zeigen verschiedene Untersuchungen (Jendritzky, 1992; Sozialministerium Baden Württemberg, 2004). Hitzebedingte Ereignisse stellen neben der direkten Wirkung auf die Gesundheit auch eine massive Beeinflussung der Lebensqualität und Leistungsfähigkeit der Menschen dar, was zu Belästigungen und Beeinträchtigungen oder subklinischen Veränderungen führt. Lang anhaltende Wärmebelastungen führen nicht nur zu gesundheitlichen Problemen, sondern können auch volkswirtschaftliche Schäden bewirken (UBA, 2005).

## Klimatopbeschreibung (VDI RL 3787 Blatt 1):

### *Gewässerklimatop (implizit vorhanden)*

Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser kommt es an den Oberflächen von Gewässern nur zu schwachen tagesperiodischen Temperaturschwankungen, das heißt Wasserflächen sind am Tag relativ kühl und nachts vergleichsweise warm. Sie können daher das lokale Klima stark beeinflussen. Jedoch bleibt ihr klimatischer Einfluss in der Regel lediglich auf das Gewässer selbst und die unmittelbaren Randbereiche beschränkt.

Ein positiver Effekt für die klimatische Situation wird durch die geringe Rauigkeit von Gewässerflächen bewirkt, wodurch Austausch- und Ventilationsverhältnisse begünstigt werden. Durch die Windoffenheit ist eine Wirkung als funktionstüchtige Luftleitbahn vorhanden.

Hinweise für die Planung: Undurchlässige Strukturen (z. B. geschlossene Bebauung oder dichte Hecken bis hin zu Waldflächen) sollten am Uferrand und angrenzenden Bereichen vermieden werden.

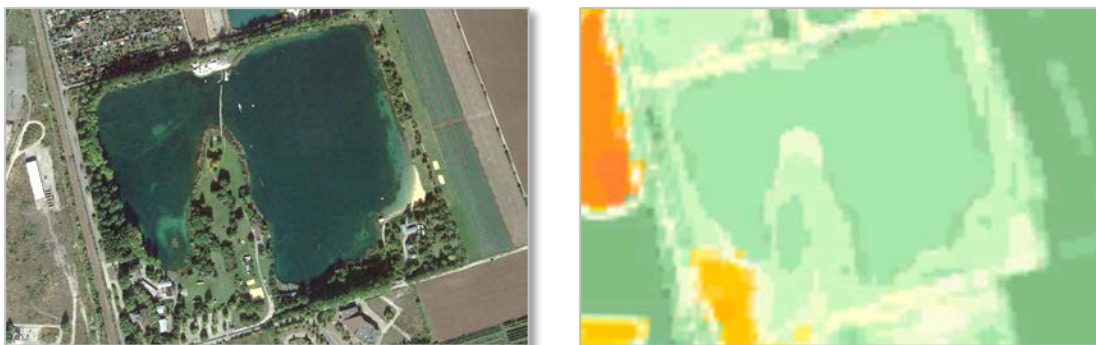


Abbildung 44: Gewässerklimatop am Beispiel Nordstrand: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Freilandklimatop*

Freilandklimatope sind überwiegend unbewaldete, vegetationsbestandene Außenbereiche (z.B. ausgedehnte Wiesen- und Ackerflächen sowie Freiflächen mit sehr lockerem Gehölzbestand). Sie zeichnen sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte und weitgehend unbeeinträchtigte Windströmungsbedingungen aus. Nächtlich wirken sie intensiv als Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete. Da in den Freilandbereichen selten Emittenten für Luftschadstoffe vorkommen und bei geeigneten Wetterlagen in den Nachtstunden Kaltluftmassen gebildet werden, besitzen diese Bereiche eine sehr hohe Ausgleichsfunktion für die human-biometeorologisch und lufthygienisch belasteten bebauten Bereiche.

Hinweise für die Planung: Siedlungsnahen Flächen sind mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet. Das Frisch- und Kaltluftentstehungspotenzial ist zu erhalten. Aufforstungs- und Siedlungsmöglichkeiten sind entsprechend der lokalklimatischen Verhältnisse deutlich einzuschränken. Aufgrund des ungestörten Windfeldes haben diese Flächen (auch in Stadtrandlage) große Bedeutung für den großräumigen Luftaustausch.



Abbildung 45: Freilandklimatop am Beispiel der Felder zwischen Salomonsborn und Marbach: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Waldklimatop*

Das Klima im Stammraum eines Waldes wird durch den Energieumsatz (verminderte Ein- und Ausstrahlung) bestimmt. Dichte und höher wachsende Baumvegetation führt zu gedämpften Tagesgängen von Lufttemperatur und -feuchte sowie zu niedrigen Windgeschwindigkeiten im Bestand. Das Kaltluftentstehungsgebiet befindet sich unterhalb des Kronenraums. Deshalb sind Waldgebiete auf geneigten Flächen hochrelevant für die Entstehung von Kaltluft/Frischlufte und deren Dynamik. Waldflächen erweisen sich aufgrund sehr geringer thermischer und humanbiometeorologischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Stadtnahe Wälder können auch am Tag Kaltluft zugunsten der überwärmten Räume erzeugen. Darüber hinaus übernehmen Wälder bei geringen oder fehlenden Emissionen die Funktion als Frischluft- und Reinluftgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit kaum Luftleitfunktion übernehmen. Eine ausgeprägte Luftleitfunktion ist im Wald nur bei breiten Schneisen/Lichtungen mit ausreichend Geländegefälle gewährleistet.

Hinweise für die Planung: Erhalten und erweitern soweit lokalklimatisch verträglich (siehe Hindernisse für den Kaltluftabfluss).



Abbildung 46: Waldklimatop am Beispiel Willroder Forst: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Klimatop innerstädtischer Grünflächen*

Die klimatischen Verhältnisse innerstädtischer Park- und Grünanlagen sind zwischen denen von Freiland- und Waldklima einzustufen. Dabei variiert die klimatische Reichweite von Parkflächen in Abhängigkeit von der Größe und Form der Parkanlagen, deren Ausstattung sowie von der Anbindung an die Bebauung oder Durchlüftungsbahnen.

Die Klimawirksamkeit von kleinen Grünflächen beschränkt sich auf die Fläche selbst (Mikroklimaeffekt). Je nach Größe, Relief und Rauigkeit können Grünflächen auch stadtklimatisch positive Nahwirkungen über die Fläche hinaus aufweisen und wirken dann ausgleichend auf die überwärmten Stadtgebiete.

Verschiedene Untersuchungen und Modellierungen haben gezeigt, dass mikroklimatische Kühlungseffekte in Abhängigkeit der Verdunstungsleistung und Beschattung auch bei geringer Flächengröße (z.B. "Pocket Parks") nachweisbar sind. Bei einer engen Vernetzung ("Grüne Trittsteine") können kleinere Grünflächen zur Abmilderung von Wärmeinseln beitragen, u. a. indem sie den Luftaustausch fördern.

Hinweise für die Planung: Innerörtliche Grünflächen sind zu erhalten und möglichst zu vernetzen ("Grünachsen" z.B. wie die Geraaue), offene Randbebauung erhalten oder anstreben (zur Förderung des Luftaustauschs). Baumbestand erhöhen, um durch Verschattung auch tagsüber kühle Aufenthaltsplätze zu schaffen. Fußläufige erreichbare Grünanlagen sind zu realisieren.

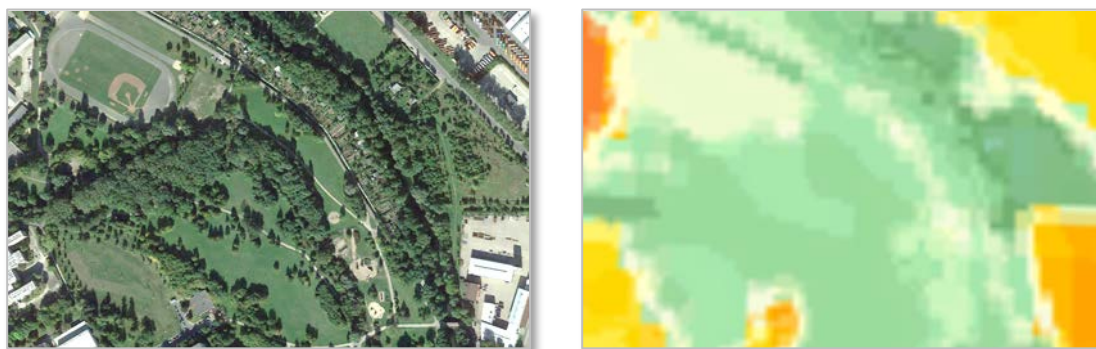


Abbildung 47: Klimatop innerstädtischer Grünflächen am Beispiel der Nördlichen Geraaue: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)



### *Vorstadtklimatop (implizit vorhanden)*

Das Klimatop ist dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen und wird durch eine grüngerprägte Flächennutzung und Oberflächenstruktur geformt. Es überwiegt der Einfluss des unbebauten Geländeanteils. Dieser Klimatoptyp ist charakteristisch für die Vorstadtsiedlungen, Gartenstädte oder Ortsränder, die darüber hinaus oft im unmittelbaren Einflussbereich des Freilands stehen und dadurch günstige bioklimatische Verhältnisse aufweisen. Das Klima in den Vorstadtsiedlungen zeichnet sich durch eine leichte Dämpfung der Klimaelemente Lufttemperatur, -feuchte, Wind und Strahlung aus. Die Windgeschwindigkeit ist niedriger als im Freiland, aber höher als in der Innenstadt.

Hinweise für die Planung: Weitere Versiegelung vermeiden, Arrondierung möglich. Emissionsarme Energieversorgung anstreben.



Abbildung 48: Vorstadtklimatop am Beispiel der Ringelbergsiedlung: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Stadtrandklimatop*

Das Stadtrandklimatop unterscheidet sich vom Vorstadtklimatop durch eine dichtere Bebauung und einen geringeren Grünflächenanteil. Dennoch handelt es sich um Bereiche mit einer lockeren Bebauung und einer relativ ausgeprägten Durchgrünung. Hieraus resultiert eine nur schwache Ausprägung von Überwärmung, zumeist kann von einem ausreichenden Luftaustausch sowie eher günstigen bioklimatischen Bedingungen in diesen Gebieten ausgegangen werden.

Hinweise für die Planung: Besonders in diesen Klimatopen ist die Grünflächenvernetzung zum Freiland zu erhalten oder zu schaffen ("Grünachsen" z.B. wie die Geraue). Hohe, geschlossene Bauformen und verriegelnde Bebauung zum Umland sind zu vermeiden. Emissionsarme Energieversorgung anstreben, z. B. Fernwärme.

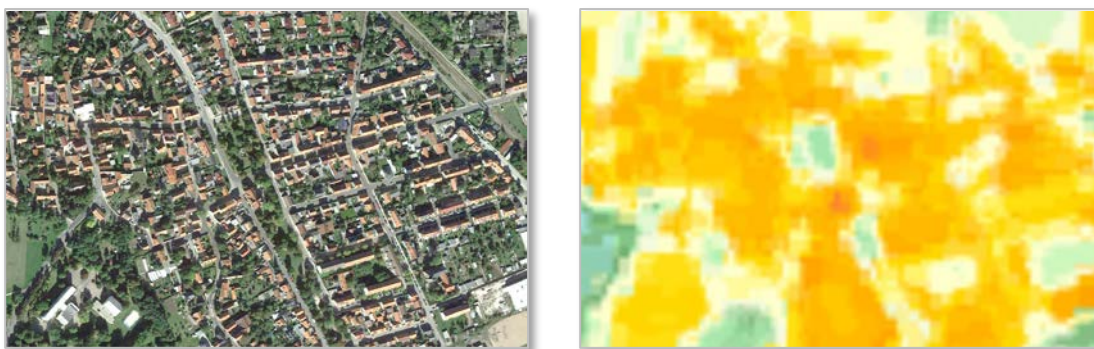


Abbildung 49: Stadtrandklimatop am Beispiel Gispersleben: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Stadtklimatop*

Charakteristisch für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit hauptsächlich hohen Baukörpern und Straßenschluchten. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad, die ausgeprägten Oberflächenrauigkeiten und geringen Grünflächenanteile, ist der Stadtkörper während austauscharmer Strahlungsnächte deutlich überwärmt. Tagsüber treten hohe Strahlungstemperaturen auf, die zu Hitzestress führen. Die dichte städtische Bebauung verursacht ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die mit zeitweise ungünstigen human-biometeorologischen Verhältnissen und erhöhter Luftbelastung verbunden sind und das Stadtklima prägen.

Hinweise für die Planung: Entsiegelung und Begrünung, Blockentkernung, Fassaden-, Dach- und Hofbegrünungen anstreben, hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden, Verkehrsberuhigung und emissionsarme Energieversorgung anstreben, z. B. Fernwärme.

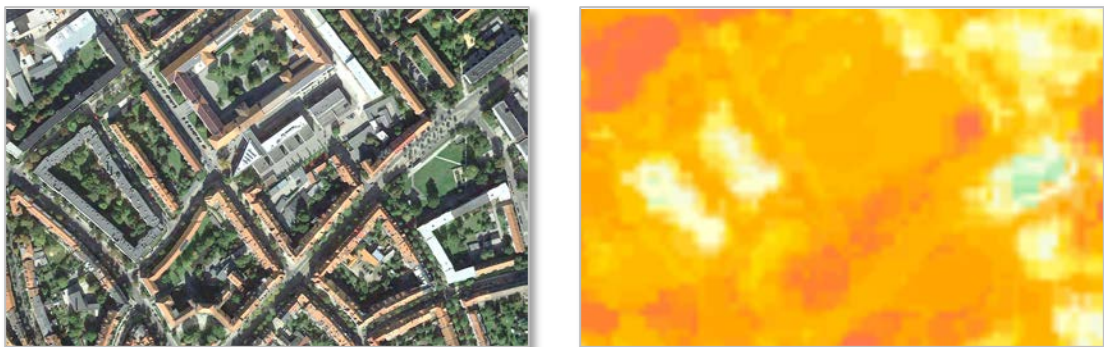


Abbildung 50: Stadtklimatop am Beispiel Gründerzeitring: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Innenstadtklimatop*

Kennzeichnend für das Innenstadtklima sind ein sehr hoher Versiegelungsgrad, hohe Oberflächenrauigkeit sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, zum Teil mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün, charakterisiert ist. Aufgrund dieser Eigenschaften weist das Innenstadtklima die stärksten mikroklimatischen Veränderungen im Stadtgebiet auf. Hierzu zählt vor allem der starke Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudeoberflächen und der starken Windfeldreduktion, die sich in den straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegelt. Human-biometeorologisch ist dies sehr ungünstig.

Hinweise für die Planung: Diese Gebiete sind aus stadtklimatischer Sicht sanierungsbedürftig. Weitere Bau- und Versiegelungsmaßnahmen führen zu negativen Auswirkungen auf die klimatische Situation. Vergrößerung des Vegetationsanteils sowie Sicherung und Erweiterung der Belüftungsflächen ggf. Entfernung und Verlagerung störender Baumwerke. Entsiegelung und Begrünung, Blockentkernung, Fassaden-, Dach- und Hofbegrünungen anstreben, hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden, Verkehrsberuhigung und Vorrang für emissionsarme Energieversorgung, z. B. Fernwärme.

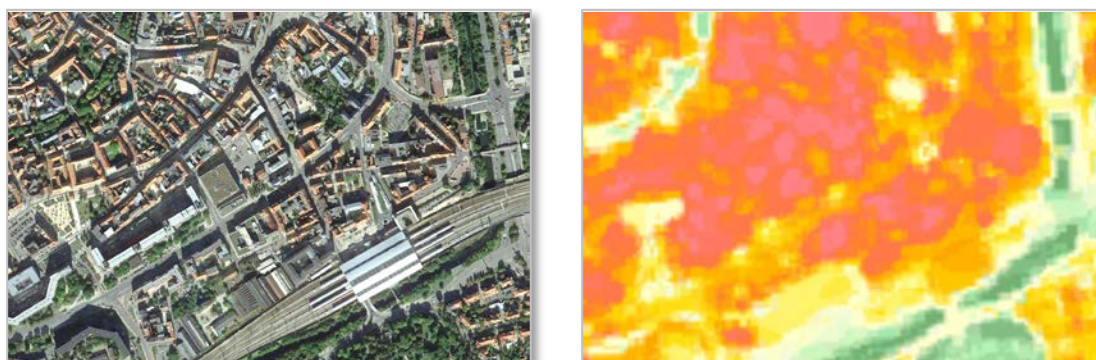


Abbildung 51: Innenstadtklimatop am Beispiel Bahnhofsviertel/Altstadt: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

### *Gewerbe-/Industrieklimatop (implizit vorhanden)*

Gewerbebetriebe mit den dazugehörigen Produktions-, Lager- und Umschlagstätten prägen das Mikroklima maßgeblich. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad in Kombination mit erhöhten Emissionen an Produktionsstätten kommt es verstärkt zu lufthygienischen und human-bioklimatischen Belastungssituationen. Zu diesen Flächen zählen auch häufig Sonderflächen, wie militärisch genutzte Flächen usw.

Hinweise für die Planung: Dach- und Fassadenbegrünung anstreben. Begrünung von Parkplätzen, Flächenbegrünung, Grünvernetzung, Entsiegelung, durchgängige Belüftungsstrukturen erhalten/schaffen, Beschränkung auf emissionsarme Betriebe, emissionsarme Energieversorgung.



Abbildung 52: Gewerbe-/Industrieklimatop am Beispiel Güterverkehrszentrum: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

*Gleisanlagenklimatop (implizit vorhanden)*

Gleisanlagen sind durch einen extremen Lufttemperaturtagesgang gekennzeichnet, d.h. einer intensiven Erwärmung am Tag folgt eine rasche nächtliche Abkühlung. Die Temperaturen sind fast so niedrig wie im Freiland. Aufgrund der geringen Strömungshindernisse sind diese Flächen wichtige Durchlüftungsbahnen und nachts mögliche Kaltluftleitbahnen.

Hinweise für die Planung: Von Emittenten und bei Umnutzung von erhöhter Rauigkeit freihalten. Flächenbegrünung vorsehen zum Erhalt der hochwertigen Funktion. Offene Ränder schaffen zur Verbesserung der Durchlüftung.

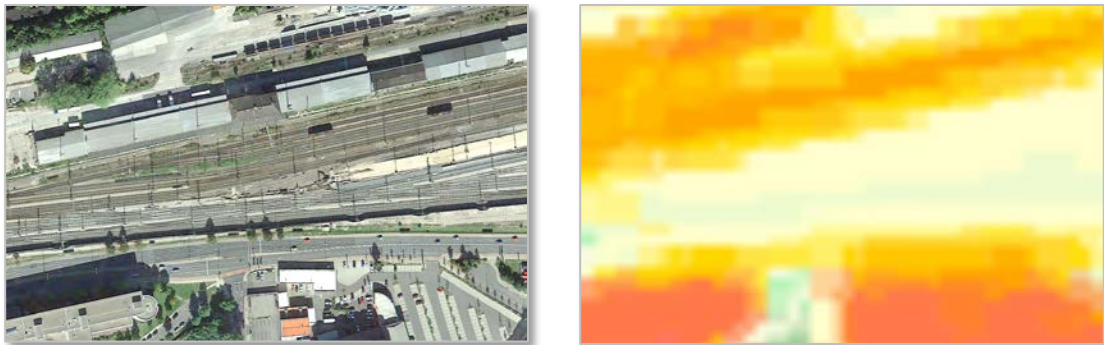


Abbildung 53: Gleisanlagenklimatop am Beispiel Gleisanlagen nördlich der Weimarischen Straße: Luftbild (links) und Ausschnitt aus der thermischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2)

## Klimafunktion (VDI RL 3787 Blatt 1):

### *Kaltluftbahn/ Kaltluftabflussrichtung*

Die Kaltluftzirkulation ist ein thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem (Hangabwind). Dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Diese durch Temperatur- und Dichteunterschiede entstehenden, bodennahen Kaltluftabflüsse initiieren und/oder verstärken das nächtliche Windsystem. Generell beeinflusst Kaltluft das lokale Klima signifikant. Relevant sind diese Kaltluftabflüsse bei windstillen/-armen, hitzebelasteten Wetterlagen. Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftabflüsse ist auf mehrere Dekameter beschränkt.

Neben der Stärke des Abflusses ist es entscheidend, ob durch die Kaltluft unbelastete (=Frischluft) oder belastete Luftmassen herab transportiert werden. Kaltluft kann sich zudem an Hindernissen aufstauen und in Senken und Tälern ansammeln (Sammelgebiete). Beim Eindringen in überwärmte Stadtgebiete wird die Kaltluft durch Strömungshindernisse gebremst und schrittweise verbraucht. Riegelartige Kaltluftstaubereiche sind (insbesondere in den Sammelgebieten) zu vermeiden. In der Planung sind Entstehungsgebiete, Sammelgebiete und Abflüsse der Kaltluft zu berücksichtigen und möglichst freizuhalten.

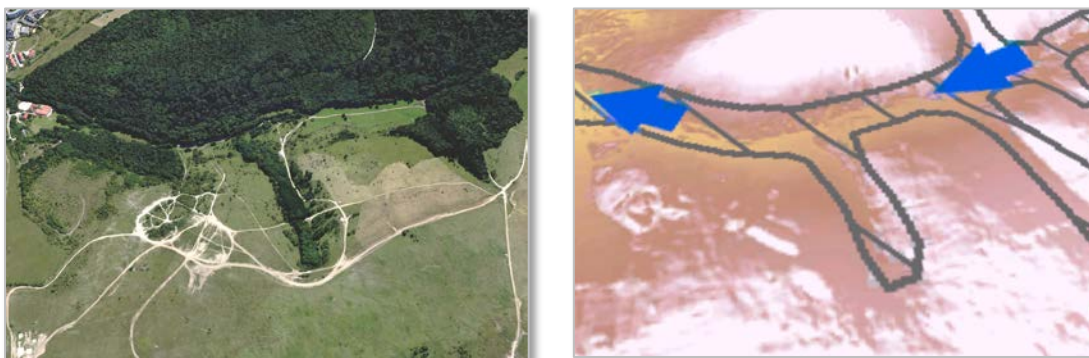


Abbildung 54: Kaltluftbahn/-abflussrichtung am Beispiel westlich des Willroder Forstes (Blick aus West): Luftbild (links) und Ausschnitt aus der dynamischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2); farbliche Kartengrundlagen: Digitales Oberflächenmodell (rechts)

### *Luftleitbahn*

Die Luftleitbahnen ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Luftleitbahnen erfüllen dabei zwei wesentliche Aspekte: Sie bewirken sowohl eine Belüftung durch die Zufuhr frischer bzw. kalter Luftmassen als auch eine Entlüftung durch den Abtransport belasteter bzw. überwärmter Luftmassen.

Flächen mit einer entsprechenden Oberflächenbeschaffenheit, Ausrichtung und Breite stellen Luftleitbahnen für den bodennahen Luftmassentransport dar. Diese Flächen sind durch geringe Rauigkeiten (keine hohen Gebäude, nur einzeln stehende Bäume), möglichst geradlinige oder nur leicht gekrümmte Ausrichtung und größere Breite (möglichst in einem Breiten-/Längenverhältnis 1:20) gekennzeichnet. Eine Breite von 50 Metern und eine Länge von 1.000 Metern sind nach Mayer et al. (1994) nötig, um eine hohe Wirksamkeit der Luftleitbahn zu gewährleisten, wobei beschränktere Abmessungen eine schwächere Be- und Entlüftung mit geringerer Eindringtiefe bewirken.

Die Wirksamkeit hängt zudem von der Windverteilung in Kombination mit der Ausrichtung der Luftleitbahn ab. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung innerstädtischer Gebiete sein. Das Relief und die Hangneigung können die Funktion als Luftleitbahn unterstützen. Effiziente Luftleitbahnen werden z. B. durch breite Flussauen gebildet. Auch breite, geradlinige Straßen oder Gleisanlagen können Luftleitbahnen darstellen. Je nach Nutzung und Emissionseintrag können Luftleitbahnen lufthygienisch beeinträchtigt sein.



Abbildung 55: Luftleitbahn am Beispiel der südlichen Erfurter Seen (Sulzer See und Stotternheimer See): Luftbild (links) und Ausschnitt aus der dynamischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2); farbliche Kartengrundlage: Digitales Oberflächenmodell (rechts)



### *Durchlüftungsbahn*

Die Durchlüftungsbahnen ermöglichen den Luftmassentransport in der Stadt. Als Durchlüftungsbahnen werden klimarelevante Flächen mit unterschiedlichem thermischem und/oder lufthygienischem Niveau bezeichnet, auf denen bei austauscharmen und/oder austauschreichen Wetterlagen lufthygienisch belastete oder unbelastete Luftmassen mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften in der Stadt transportiert werden.

Durchlüftungsbahnen liegen meist in der dichter bebauten Kernstadt. Größtenteils sind das breitere, geradlinige Straßenbereiche, die durch Verkehrsemissionen belastet sind. Es sind auch teilversiegelte Freiflächen, die in überwärmten Stadträumen liegen und dadurch nur einen eingeschränkten thermischen Ausgleich bewirken können. Dennoch sind die Durchlüftungsbahnen durch ihre geringen Strömungswiderstände wichtig, um einen Transport von Luftmassen im Stadtgebiet (insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen) zu ermöglichen. Stadtrelevante, funktionsfähige Durchlüftungsbahnen (Juri-Gagarin-Ring, Stauffenbergallee, innerstädtische Gleisanlagen, größere Ausfallstraßen, etc.) sind bei den Planungen zu berücksichtigen und das lufthygienischen/thermischen Niveau zu verbessern.



Abbildung 56: Durchlüftungsbahn am Beispiel der Geraaue, der Magdeburger Allee und Gleisanlagen (der Strecke Erfurt – Nordhausen): Luftbild (links) und DGM-Ausschnitt aus der dynamischen Klassifizierung der Klimafunktionskarte (rechts, Legende in Kapitel 7.2); farbliche Kartengrundlage: Digitales Oberflächenmodell (rechts)

## 7.2 Klimafunktionskarte

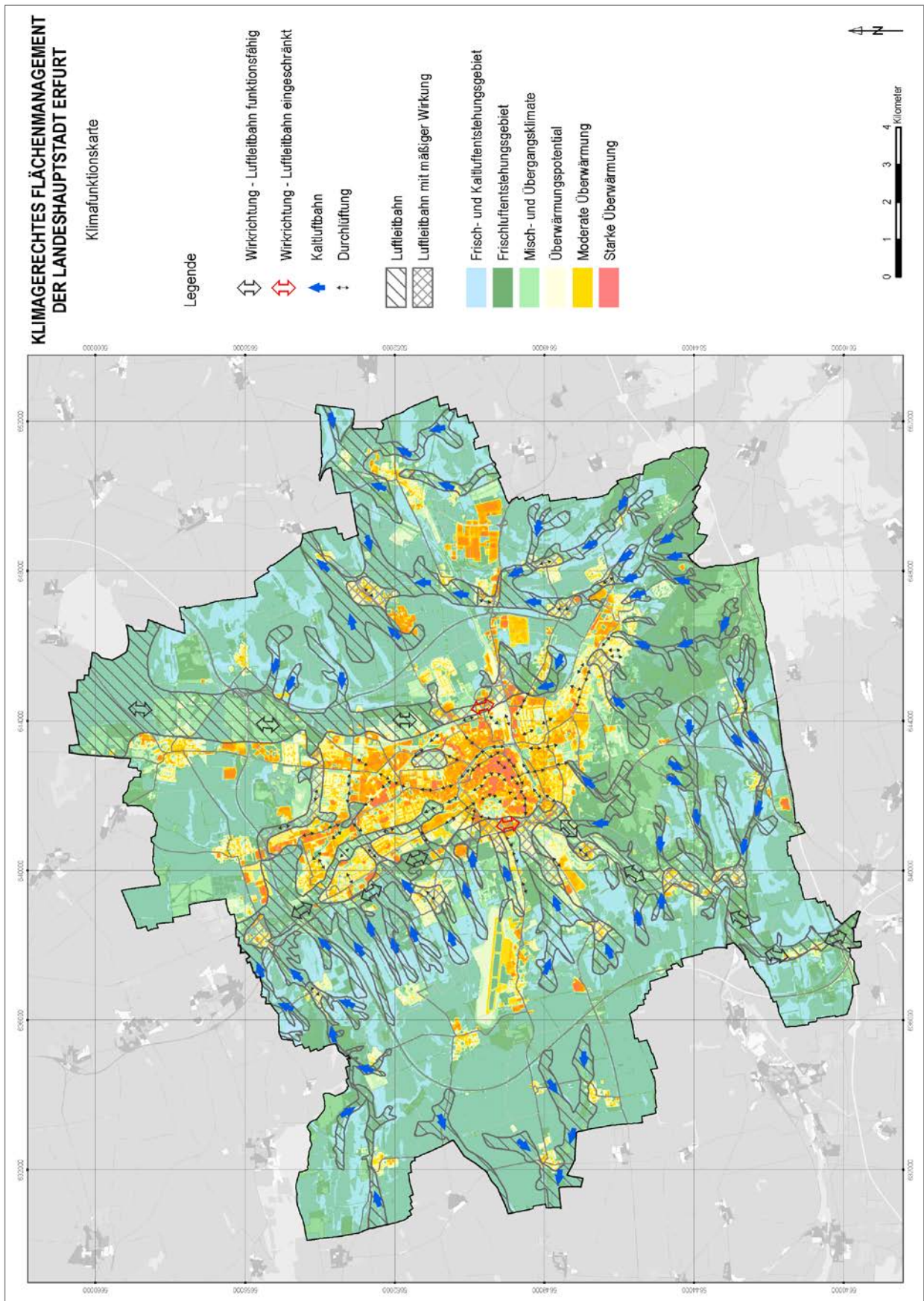


Abbildung 57: Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt Erfurt.

Die Legende der Klimafunktionskarte (Abb. 57) beschreibt sowohl die thermische (Farbkodierung) als auch die dynamische (Schraffur und Symbolik) Komponente des Stadtklimas in Erfurt.

Die Legende ist in sechs Hauptklimatope unterteilt, welche farblich zugeordnet sind. Zusätzlich gibt es in dieser Legende, die dem Kartenwerk beigelegt ist, eine kurze Beschreibung zur Einordnung der Funktionen. Die klimaökologische Wertigkeit ist an der linken Seite angegeben und verläuft von sehr wertvoll (+) für die naturnahen Klimatope bis hin zu defizitär (-) für die Belastungsbereiche.

Klimafunktionen (Kaltluftabfluss, Luftleitbahn, Durchlüftungsbahn) werden richtungsbezogen durch Pfeile und flächenhaft durch Schraffuren dargestellt. Die Luftleitbahnen können funktionsfähig oder eingeschränkt sein und mäßige wirken.







Klimaökologische Wertigkeit	+	<b>Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Freilandklima</b> Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich; Größtenteils mit geringer Rauigkeit und entsprechender Hangneigung.
		<b>Frischlufentstehungsgebiet</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Waldklima</b> Flächen ohne Emissionsquellen; Hauptsächlich mit dichten Baumbestand und hoher Filterwirkung.
		<b>Misch- und Übergangsklimate</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Klima innerstädtischer Grünflächen</b> Flächen mit sehr hohem Vegetationsanteil, geringe und diskontinuierliche Emissionen; Pufferbereiche zwischen unterschiedlichen Klimatopen.
		<b>Überwärmungspotential</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Vorstadtklima</b> Baulich geprägte Bereiche mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen; Größtenteils ausreichende Belüftung.
		<b>Moderate Überwärmung</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Stadtklima</b> Dichte Bebauung, hoher Versiegelungsgrad und wenig Vegetation in den Freiräumen; Belüftungsdefizite.
	-	<b>Starke Überwärmung</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Innenstadtklima</b> Stark verdichtete Innenstadtbereiche/City, Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetationsanteil und fehlender Belüftung.
	<b>Wirkrichtung - Luftleitbahn funktionsfähig</b>	Sie ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Die Wirksamkeit hängt von der Windverteilung ab. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung sein.	
	<b>Wirkrichtung - Luftleitbahn eingeschränkt</b>	Durch die Flächennutzung (erhöhte Bodenrauigkeit/ Gebäude) und/oder Emissionen (Verkehr, Industrie/ Gewerbe) lufthygienisch beeinträchtigt. Durch erhöhtes Bauvolumen/ Versiegelung klimatisch beeinträchtigt.	
	<b>Kaltluftbahn/ Kaltluftabflussrichtung</b>	Thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem (Hangabwind). Dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Das Pfeilsymbol entspricht der Abflussrichtung.	
	<b>Durchlüftung/ Durchlüftungsbahn</b>	Neben Luftleitbahnen auch Gleisanlagen, breite Straßen, Flussläufe etc. die als zusätzliche Bahnen belüftend wirken. Kanalisierung von Luftströmungen.	
	<b>Luftleitbahn</b>	Durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite bevorzugte Fläche für den bodennahen Luftmassentransport. Luftleitbahnen sind durch geringe Rauigkeit (keine hohen Gebäude, nur einzeln stehende Bäume) gekennzeichnet.	
	<b>Luftleitbahn mit mäßiger Wirkung</b>	Lage im Netz/Wirkzusammenhang der Luftleitbahn, jedoch mit herabgesetzter Qualität. Klimatisch und/oder lufthygienisch belastet, Überströmungsbereich.	

Abbildung 58: Legende der Klimafunktionskarte.

### 7.3 Bilanzierung der Klimatope

Die flächendeckende Analyse der **klimaökologischen Wertigkeit** innerhalb der administrativen Grenzen der Landeshauptstadt Erfurt wurde auf der Ebene der Stadtteilgrenzen heruntergebrochen. Bei dieser räumlichen Bilanzierung der Flächen ist zu beachten, dass sich physikalisch-klimatische Bedingungen nicht an den administrativen Grenzen einer Kommune orientieren. Zudem können die Wirksamkeit bzw. die Wechselwirkungen, welche sich über Stadtteilgrenzen hinweg ergeben, nicht berücksichtigt werden (z.B. ein Kaltluftabfluss über die Stadtteilgrenze hinweg oder nicht wirksamer Kaltluftabfluss innerhalb eines Stadtteils). Dennoch soll eine Interpretation der klimaökologischen Ausgangslage räumlich bilanziert werden, um eine **stadtteilbezogene Datengrundlage** für das klimagerechte Flächenmanagement abzuleiten.

Legende der Flächenbilanzierung Landeshauptstadt Erfurt  
-klimaökologischer Wertigkeit-

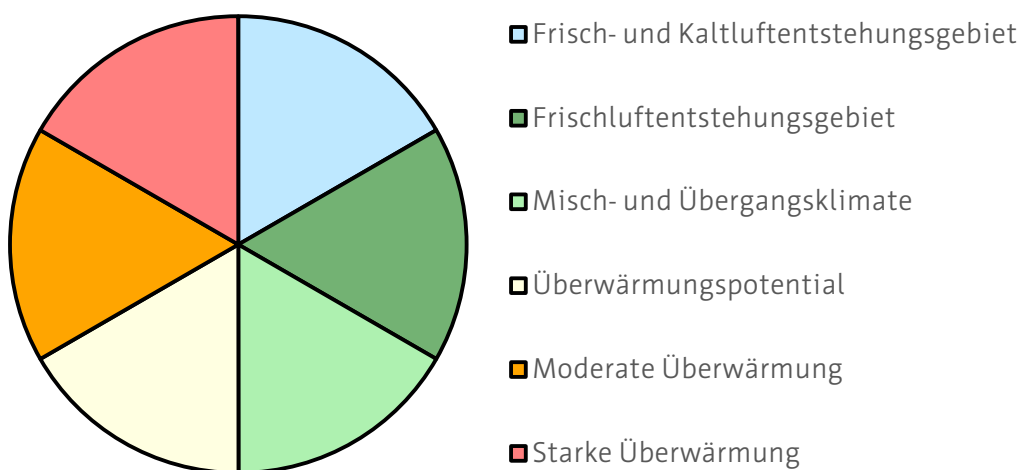


Abbildung 59: Beispiellegende der Flächenbilanzierung Landeshauptstadt Erfurt

Tortendiagramme mit einem hohen Anteil von blau bis grün bedeuten eine klimaökologisch positive Gesamtwertung, während Diagramme mit einem hohen Anteil zwischen gelb bis rot auf klimatische Defizite/ Überwärmung hin deuten. Im Sinne eines Flächenmanagementsystems sind Stadtteile mit einem hohen bis sehr hohen Anteil der Belastungsklimatope aus stadtklimatischer sanierungsbedürftig.

Abbildung 60 und Tabelle 7 zeigen die prozentuale Aufteilung der Klimatopanteile der einzelnen Stadtteilflächen.

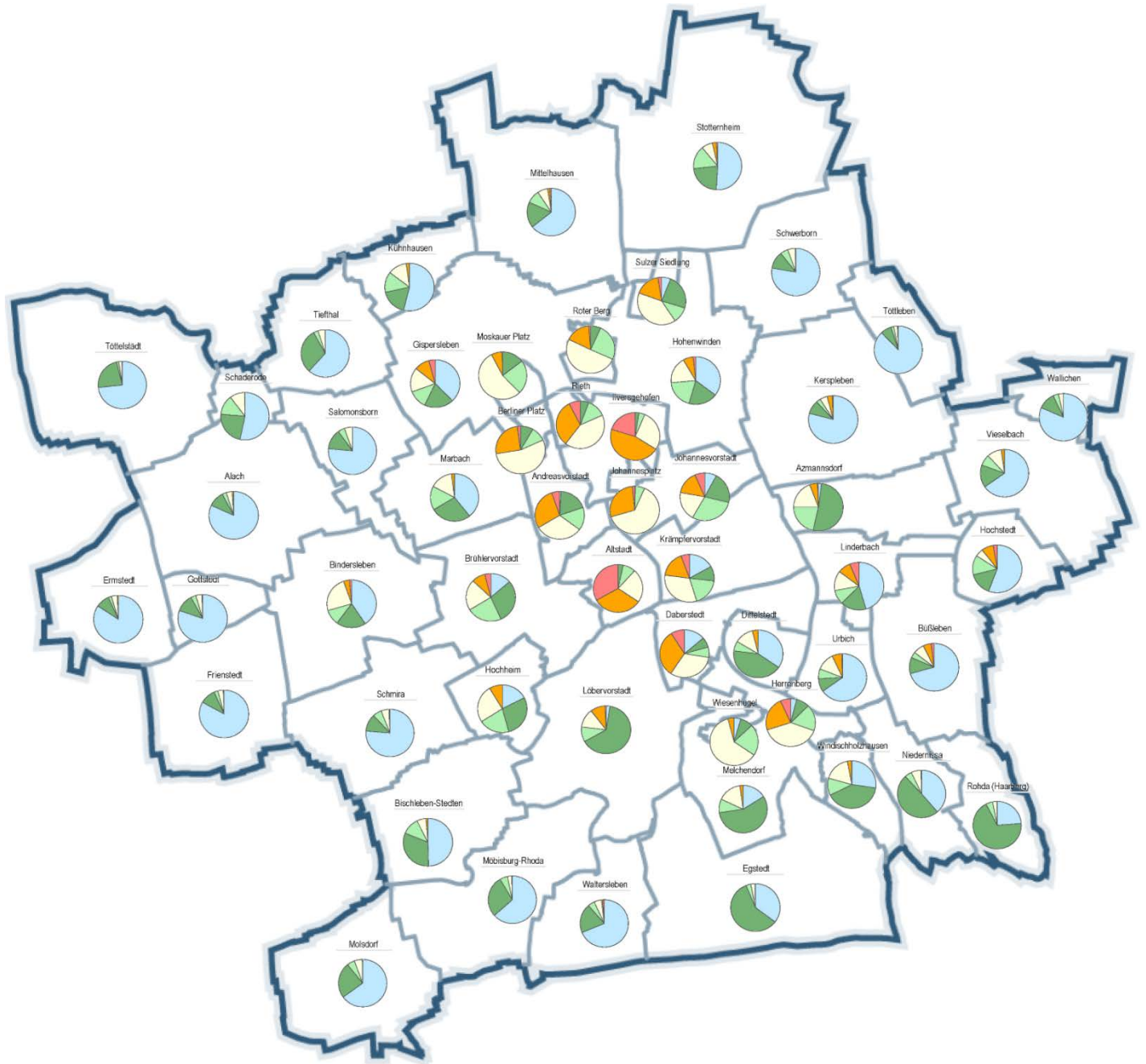


Abbildung 60: Übersicht der Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt.

Tabelle 7: Flächenbilanzierung der Klimatope bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt

Stadtteil	Kalt- und Frischluftentstehungsgebiet	Frischluftentstehungsgebiet	Misch- und Übergangsklimate	Überwärmungspotential	Moderate Überwärmung	Starke Überwärmung
Alach	81,9%	10,5%	2,7%	3,9%	1,0%	0,1%
Altstadt	0,0%	3,4%	8,3%	22,7%	32,4%	33,2%
Andreasvorstadt	0,8%	18,8%	15,6%	31,2%	28,3%	5,3%
Azmannsdorf	2,1%	51,5%	21,5%	19,2%	5,2%	0,6%
Büßleben	70,7%	11,0%	3,9%	7,2%	5,2%	2,0%
Berliner Platz	0,0%	8,3%	9,8%	54,3%	25,5%	2,1%
Bindersleben	40,7%	19,4%	10,3%	24,3%	3,8%	1,5%
Bischleben-Stedten	49,7%	31,6%	11,4%	6,0%	1,2%	0,1%
Brühlervorstadt	13,6%	29,6%	23,0%	20,9%	8,9%	4,0%
Daberstedt	13,7%	6,8%	7,0%	31,8%	31,7%	9,0%
Dittelstedt	34,6%	42,5%	6,6%	12,5%	3,7%	0,2%
Egstedt	35,3%	58,5%	3,2%	2,7%	0,2%	0,1%
Ermstedt	84,4%	9,0%	2,0%	4,0%	0,6%	0,0%
Frienstedt	83,1%	10,3%	2,5%	3,6%	0,5%	0,1%
Gispersleben	37,7%	19,3%	12,3%	16,5%	9,9%	4,2%
Gottstedt	80,3%	11,8%	3,3%	4,1%	0,4%	0,1%
Herrenberg	3,9%	8,7%	17,9%	39,6%	23,1%	6,9%
Hochheim	17,4%	28,4%	20,1%	25,4%	8,7%	0,0%
Hochstedt	55,7%	15,2%	13,2%	5,3%	7,8%	2,7%
Hohenwinden	35,4%	19,0%	19,2%	18,1%	6,7%	1,7%
Ilversgehofen	0,0%	2,4%	4,0%	27,6%	45,8%	20,2%
Johannesplatz	0,0%	0,4%	6,1%	63,9%	28,0%	1,6%
Johannesvorstadt	7,7%	21,1%	29,4%	19,6%	15,7%	6,5%
Kerspleben	79,2%	9,1%	2,9%	4,9%	3,4%	0,6%
Krämpfervorstadt	16,8%	10,0%	18,4%	31,9%	17,3%	5,6%
Kühnhausen	54,0%	17,5%	13,9%	12,4%	2,0%	0,2%
Linderbach	45,5%	17,0%	9,6%	13,3%	8,5%	6,2%
Löbervorstadt	2,5%	64,3%	10,1%	12,7%	9,7%	0,7%
Marbach	39,2%	27,2%	16,2%	15,2%	1,9%	0,2%
Melchendorf	16,1%	56,6%	9,2%	16,0%	2,1%	0,1%
Mittelhausen	64,3%	17,5%	8,9%	6,9%	1,4%	1,0%
Möbisburg-Rhoda	63,4%	28,0%	5,2%	2,9%	0,4%	0,0%
Molsdorf	65,0%	24,1%	5,2%	5,4%	0,2%	0,0%
Moskauer Platz	0,0%	14,6%	23,1%	54,6%	7,3%	0,4%
Niedernissa	38,6%	49,6%	4,8%	6,6%	0,4%	0,0%
Rieth	0,0%	5,7%	12,7%	42,1%	31,9%	7,7%
Rohda (Haarberg)	23,9%	68,5%	4,6%	2,9%	0,1%	0,0%
Roter Berg	0,0%	6,8%	24,8%	50,4%	16,6%	1,3%
Salomonsborn	76,5%	13,6%	4,5%	5,4%	0,0%	0,0%
Schaderode	53,3%	23,0%	13,4%	10,1%	0,2%	0,0%
Schmira	76,2%	11,8%	6,0%	5,2%	0,4%	0,4%
Schwerborn	77,7%	11,7%	5,3%	4,9%	0,4%	0,0%
Stotternheim	50,9%	22,3%	15,7%	7,5%	2,6%	0,9%
Sulzer Siedlung	6,0%	23,7%	10,9%	39,8%	16,9%	2,6%
Tiefthal	61,7%	30,3%	3,2%	4,8%	0,0%	0,0%
Töttelstädt	73,3%	22,9%	1,4%	2,2%	0,3%	0,0%
Töttleben	87,7%	7,3%	1,8%	2,6%	0,5%	0,0%
Urbich	65,2%	9,0%	6,7%	12,1%	6,4%	0,7%
Vieselbach	65,3%	15,3%	7,4%	9,8%	2,1%	0,2%
Wallichen	81,6%	11,4%	3,7%	3,3%	0,0%	0,0%
Waltersleben	68,7%	19,8%	4,6%	5,0%	0,9%	1,0%
Wiesenhügel	4,6%	8,5%	21,4%	61,4%	4,1%	0,0%
Windischholzhausen	27,2%	40,4%	11,7%	17,6%	2,8%	0,2%

Im Bereich der städtischen Wärmeinsel konzentrieren sich die Probleme der Belastungen durch Hitze. Diese Gebiete sind als anfällig gegenüber Hitzebelastungen zu charakterisieren. Je größer die Einwohnerdichte der Stadtteile ist, desto mehr Menschen sind einer potentiellen Hitzebelastung ausgesetzt. Bei einem Aufenthalt in der Innenstadt am Tag kann einer Hitzebelastung durch Standortwechsel und durch Vermeidung von stark besonnten Standorten entgegengewirkt werden. Anders sieht es mit der Wohnbevölkerung aus, die insbesondere nachts einer Hitzebelastung (z.B. bei Tropennächten) durch fehlende Abkühlung im Bereich der überwärmten Stadtteile nicht ausweichen kann.

Eine nur generelle Anfälligkeit gegenüber Hitzebelastung besteht in Gebieten mit einer nur durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von bis zu 6.000 Einwohnern pro km<sup>2</sup> (MUNLV 2010). Sehr hohe Einwohnerdichten von über 6.000 Einwohner pro km<sup>2</sup> oder sogar über 10.000 Einwohner pro km<sup>2</sup> verursachen eine erhöhte bzw. hohe Anfälligkeit gegenüber einer Hitzebelastung, da sich in diesen Gebieten die Wohnbevölkerung konzentriert.

Soziodemographische Faktoren wie das Alter der Bevölkerung spielen neben dem Hitzepotential eine große Rolle um die Anfälligkeit eines Stadtteils zu bewerten. Ältere und kranke Menschen sowie Kinder können sich an extreme Hitze schlechter anpassen. Gesundheitliche Folgen, die von Abgeschlagenheit bis hin zu Hitzschlag und Herzversagen reichen können, sind möglich. Aufgrund des zukünftigen demographischen Wandels wird der Anteil der über 65-Jährigen weiter zunehmen.

Um Anpassungsmaßnahmen (an den Klimawandel) gezielt anzusetzen, ist neben der klimatischen Bilanzierung eine Identifikation der Stadtteile wichtig, die eine besondere Sensitivität gegenüber den Folgen von Hitzestress und Luftverunreinigungen aufweisen. Auf Grundlage bevölkerungsstatistischer Datenbestände lassen sich in Erfurt Gebiete identifizieren, die aufgrund der klimatischen Situation und einem hohen Anteil hitzesensitiver Bevölkerungsgruppen bereits heute als Belastungsräume zu bezeichnen sind.

Um mögliche Belastungen in den Stadtteilen zu bewerten, wurden folgende Kriterien herangezogen und Stufen zugeordnet (Abb. 61):

- der Anteil der überwärmten und zur Überwärmung neigenden Flächen eines Stadtteils (**Überwärmungsgrad**)
- die Einwohnerzahl eines Stadtteils (**Exposition**)
- der Anteil der Einwohner unter 6 (Kinder) und über 65 Jahren (Senioren) eines Stadtteils (**Anfälligkeit**)

Zur Einstufung von Stadtteilen wurden folgende Parameter herangezogen:

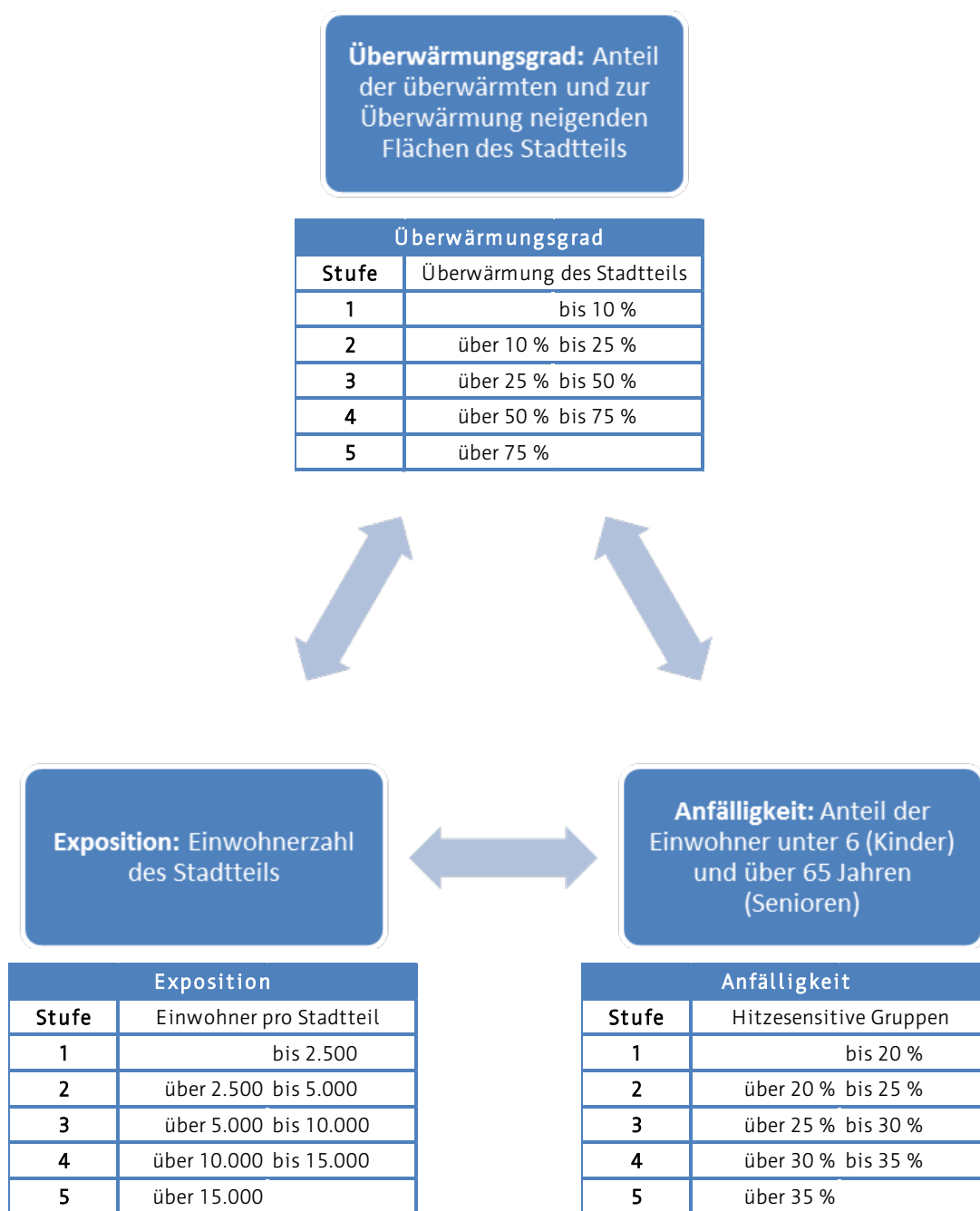


Abbildung 61: Einstufung der Stadtteile nach den Kriterien Überwärmungsgrad, Exposition und Anfälligkeit



In den drei Kriterien (Überwärmungsgrad, Exposition, Anfälligkeit) erhält jeder Stadtteil eine Zuordnung zu den Stufen (1 bis 5) je nach dem Überwärmungsgrad, der Einwohnerzahl und dem Anteil der hitzesensitiven Gruppe. Die Zahlenwerte der jeweiligen Stufe werden nach dem Bewertungsschema in Abbildung 62 addiert und gemittelt. Dieses Ergebnis ist eine Bewertung der möglichen Belastung in den Stadtteilen.

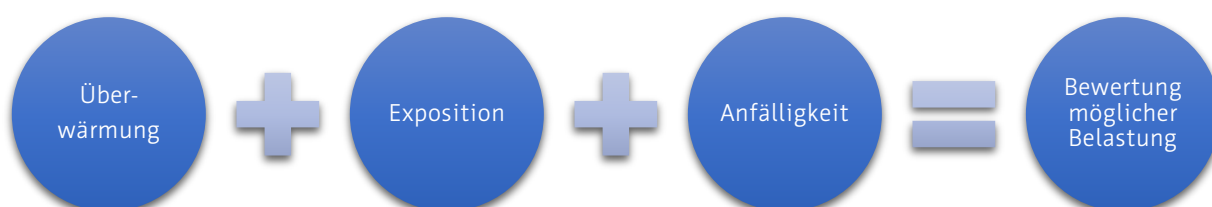


Abbildung 62: Bewertungsschema für die Stadtteile

In den Tabellen 8, 9 und 10 werden der Überwärmungsgrad, die Einwohneranzahl und der Anteil der hitzesensitiven Bevölkerungsgruppen für alle Erfurter Stadtteile aufgelistet. Die Stadtteile werden jeweils in städtische und dörfliche Gebiete sowie Plattenbau-Gebiete untergliedert. Zu jedem Kriterium ist die ermittelte Stufe angegeben. Jeder Stadtteil erhält eine **Bewertung der möglichen Belastung**, resultierend aus dem Mittelwert der jeweiligen Stufen der Kriterien.

Diese zusammenfassende Bewertung eines Stadtteils dient ausschließlich als erste Orientierung, ob mehr bzw. weniger Betroffenheit vorliegen kann. In welchen Räumen stadtklimatisch relevante Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen notwendig sind, ist erst über eine differenzierte Einschätzung mithilfe der abgeleiteten Klimafunktions- (Kap. 7) und Planungshinweiskarte (Kap. 9) möglich.

Tabelle 8: Bevölkerungsstatistik und Überwärmungsgrad bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt (Teil 1 - städtische Gebiete und Plattenbau)

	Überwärmung		Einwohnerdichte (EW pro km <sup>2</sup> )	Einwohner		Hitzesensitive Gruppen				Bewertung möglicher Belastung	
	Stufe	Stufe		Stufe	Stufe	unter 6 Jahre	über 65 Jahre	Summe	Stufe		
			Stufe								Stufe
Plattenbau	Berliner Platz	81,9%	5	12.533	6.016	3	6,1%	32,9%	39,0%	5	4,3
	Rieth	81,6%	5	8.051	5.797	3	5,0%	32,8%	37,8%	5	4,3
	Johannesplatz	93,5%	5	12.302	5.290	3	4,9%	33,5%	38,3%	5	4,3
	Moskauer Platz	62,4%	4	8.680	7.638	3	4,2%	32,7%	36,9%	5	4,0
	Roter Berg	68,4%	4	7.610	5.860	3	6,4%	26,1%	32,4%	4	3,7
	Wiesenhügel	65,5%	4	12.022	5.410	3	5,3%	24,8%	30,1%	4	3,7
	Herrenberg	69,6%	4	4.696	7.937	3	5,0%	23,1%	28,0%	3	3,3
	Melchendorf	18,2%	2	1.847	10.401	4	4,8%	22,5%	27,3%	3	3,0
städtisch	Daberstedt	72,5%	4	3.883	13.589	4	5,1%	28,9%	34,1%	4	4,0
	Altstadt	88,3%	5	7.793	19.015	5	6,2%	17,3%	23,5%	2	4,0
	Andreasvorstadt	64,8%	4	5.970	17.014	5	6,2%	15,3%	21,5%	2	3,7
	Krämpfervorstadt	54,8%	4	3.283	16.283	5	6,5%	14,5%	21,0%	2	3,7
	Ilversgehofen	93,6%	5	4.272	11.704	4	5,6%	19,4%	25,0%	2	3,7
	Brühlervorstadt	33,7%	3	1.940	13.733	4	6,6%	19,6%	26,2%	3	3,3
	Löbervorstadt	23,1%	2	1.232	12.614	4	5,8%	21,3%	27,0%	3	3,0
	Hohenwinden	26,4%	3	247	2.019	1	3,3%	30,4%	33,7%	4	2,7
Johannesvorstadt	41,8%	3	1.964	6.482	3	6,0%	10,0%	16,0%	1	2,3	

Tabelle 9: Bevölkerungsstatistik und Überwärmungsgrad bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt (Teil 2a – dörfliche Gebiete)

	Überwärmung		Einwohnerdichte (EW pro km <sup>2</sup> )	Einwohner		Hitzesensitive Gruppen				Bewertung möglicher Belastung
	Stufe	Stufe		Stufe	Stufe	unter 6 Jahre	über 65 Jahre	Summe	Stufe	
dörflich	Hochheim	34,1%	969	2.752	2	5,9%	26,2%	32,1%	4	3,0
	Gisperleben	30,7%	405	4.103	2	4,4%	22,5%	26,9%	3	2,7
	Sulzer Siedlung	59,4%	1.048	1.006	1	3,4%	23,8%	27,1%	3	2,7
	Bindersleben	29,6%	176	1.416	1	5,2%	21,3%	26,4%	3	2,3
	Hochstedt	15,8%	93	275	1	3,3%	27,6%	30,9%	4	2,3
	Marbach	17,3%	778	3.997	2	5,9%	17,1%	22,9%	2	2,0
	Stotternheim	11,1%	216	3.408	2	4,8%	19,3%	24,1%	2	2,0
	Linderbach	28,0%	275	859	1	5,8%	18,7%	24,6%	2	2,0
	Windischholzhausen	20,6%	843	1.905	1	7,7%	19,3%	27,0%	3	2,0
	Vieselbach	12,0%	258	2.170	1	5,5%	21,7%	27,1%	3	2,0
	Möbisburg-Rhoda	3,3%	132	1.063	1	5,5%	26,0%	31,4%	4	2,0
	Tiefthal	4,8%	205	1.073	1	3,5%	26,7%	30,2%	4	2,0
	Rohda	3,0%	71	254	1	5,5%	27,2%	32,7%	4	2,0
	Azmannsdorf	25,0%	77	326	1	3,7%	20,6%	24,2%	2	1,7
	Dittelstedt	16,4%	393	763	1	6,8%	17,7%	24,5%	2	1,7
	Büßleben	14,4%	186	1.277	1	5,8%	17,2%	23,0%	2	1,7
Kühnhausen	14,6%	368	1.154	1	5,2%	19,2%	24,4%	2	1,7	
Urbich	19,1%	378	1.076	1	5,0%	19,9%	24,9%	2	1,7	

Tabelle 10: Bevölkerungsstatistik und Überwärmungsgrad bezogen auf die einzelnen Stadtteile der Landeshauptstadt Erfurt (Teil 2b – dörfliche Gebiete)

	Überwärmung		Einwohnerdichte (EW pro km <sup>2</sup> )	Einwohner		Hitzesensitive Gruppen				Bewertung möglicher Belastung	
	Stufe	Stufe		Stufe	Stufe	unter 6 Jahre	über 65 Jahre	Summe	Stufe		
dörflich	Schaderode	10,3%	2	199	283	1	5,3%	18,7%	24,0%	2	1,7
	Bischleben-Stedten	7,4%	1	247	1.628	1	4,4%	23,0%	27,4%	3	1,7
	Mittelhausen	9,3%	1	100	1.049	1	4,6%	21,9%	26,5%	3	1,7
	Molsdorf	5,7%	1	74	534	1	4,9%	20,6%	25,5%	3	1,7
	Ernststedt	4,7%	1	75	441	1	5,2%	20,9%	26,1%	3	1,7
	Gottstedt	4,5%	1	100	211	1	6,2%	21,3%	27,5%	3	1,7
	Wallichen	3,3%	1	72	171	1	5,8%	19,3%	25,1%	3	1,7
	Schmira	6,0%	1	135	983	1	4,9%	18,5%	23,4%	2	1,3
	Schwerborn	5,4%	1	87	603	1	5,1%	18,6%	23,7%	2	1,3
	Kerspleben	8,9%	1	164	1.708	1	5,2%	15,3%	20,5%	2	1,3
	Niedernissa	7,0%	1	432	1.637	1	6,4%	15,5%	21,9%	2	1,3
	Egstedt	3,0%	1	40	508	1	5,9%	17,9%	23,8%	2	1,3
	Waltersleben	6,9%	1	87	419	1	7,4%	16,9%	24,3%	2	1,3
	Frienstedt	4,1%	1	185	1.329	1	7,7%	16,0%	23,6%	2	1,3
	Alach	4,9%	1	97	984	1	5,9%	18,2%	24,1%	2	1,3
	Töttelstädt	2,5%	1	61	662	1	6,5%	17,7%	24,2%	2	1,3
Salomonsborn	5,4%	1	241	1.128	1	5,9%	17,7%	23,6%	2	1,3	
Töttleben	3,1%	1	100	314	1	6,1%	16,9%	22,9%	2	1,3	

Städtische Stadtteile zeigen neben einer hohen Einwohnerdichte auch einen überdurchschnittlichen Überwärmungsgrad. Noch höhere Dichten und eine stärkere Überwärmung sind in den Plattenbaugebieten im Südosten und im Nordwesten der Stadt vorhanden. Die dörflichen Stadtteile hingegen sind geprägt durch keine bis leichte Überwärmungstendenzen und sehr geringe Bevölkerungsdichten.

Generell sind Stadtteile mit einer überdurchschnittlich hohen Bevölkerungsdichte häufiger mäßig bis stark überwärmt. Darunter finden sich Stadtteile mit sehr hohem Anteil hitzesensitiver Gruppen (mit über einem Drittel der Einwohner), meist sind das Plattenbaugebiete (Berliner Platz, Rieth, Johannesplatz, Moskauer Platz und Roter Berg).

Bei der Interpretation der Flächenbilanzierung und Bewertung sind die räumlichen und klimatischen Eigenschaften der Gebiete zu berücksichtigen. Einige Stadtteile umfassen z.B. sowohl Flächen mit sehr hohen und sehr niedrigen Einwohnerdichten (Krämpfer-, Johannes-, Löber- und Brühlervorstadt). Insgesamt werden diese durch die Flächenbilanzierung ausgeglichen und führen zu gemittelten Wert bei dem Überwärmungsgrad und Bevölkerungsdichten. Zu beachten gilt, dass in dicht besiedelten Bereichen auch dieser Stadtteile häufiger höhere Betroffenheit vorliegt.



## 8. Zukunft

Um in den heutigen Planungsprozessen eine klimabewusste und zukunftsfähige Ausrichtung zu realisieren, müssen auch Kenntnisse vorhanden sein, wie sich klimatologische Trends entwickeln und welche Auswirkungen diese auf den konkreten Planungsraum haben können.

Um diesen Trend der wahrscheinlich eintretenden Veränderungen zu veranschaulichen, wurden zwei Szenarien entwickelt. Im ersten Szenario wurde die Grundlage der Analyseschritte, die Flächennutzung, durch den aktuell rechtskräftigen Flächennutzungsplan der Landeshauptstadt Erfurt als Eingangsdatensatz in die Berechnung integriert (**Szenario Flächennutzungsplan**).

Stand FNP:

*"Flächennutzungsplan der Landeshauptstadt Erfurt, wirksam mit Veröffentlichung im Amtsblatt am 27.05.2006; neu bekannt gemacht mit Veröffentlichung im Amtsblatt am 14.07.2017."*

Die zukünftig baulich verursachten Veränderungen innerhalb der Klimatope werden dadurch berücksichtigt und in Form einer weiteren Klimafunktionskarte dargestellt.

Basierend auf dieser Karte wird zudem ein weiteres Szenario berücksichtigt, welche Auswirkung der prognostizierte Klimawandel auf das Stadtklima in Erfurt haben wird (**Szenario Klimawandel**). Um dies zu berechnen, wurde ausgehend von der Datengrundlage des Szenarios Flächennutzungsplan das Szenario Klimawandel mit den mittleren klimatologischen Eingangswerten für einen Zukunftshorizont (2041-2070) berechnet. Die Eingangswerte basieren auf Klimasimulationsdaten der IMPAKT-Studie des Thüringer Umweltministeriums.

Die räumliche Auflösung dieser Klimafunktionskarten liegt mit 50 Meter Rastergröße niedriger als die der Klimafunktionskarte der Ist-Situation (10 Meter Rastergröße). Grund dafür ist die Genauigkeit der Eingangsdatensätze, die zu unterschiedlich sind (z.B. die grobe horizontale Auflösung des FNP gegenüber der Realnutzungskartierung, Unsicherheiten der Klimaprojektionen). Durch diese Methodik ist dennoch das Ablesen von Trends und der räumlichen Entwicklungen möglich.

## 8.1 Klimafunktionskarte Szenario Flächennutzungsplan

In Abbildung 63 wird die Klimafunktionskarte Szenario Flächennutzungsplan dargestellt. Die Eingangsdaten wurden geändert, so dass der Flächennutzungsplan (anstatt der Realnutzungskartierung) die Grundlage für die Flächennutzung bildet. Die Differenzen zur Klimafunktionskarte der Ist-Situation im Vergleich zum Szenario FNP werden in Abbildung 64 dargestellt. Dabei zeichnen sich Bereiche mit mäßiger bis starker Zunahme der Überwärmung ab. Belüftungskorridore, die aufgrund der geänderten Flächennutzung wegfallen, sind schraffiert gekennzeichnet.

Durch die geplanten gewerblichen Bauflächen nördlich und südlich der BAB 71 (Mittelhausen und Stotternheim) im Norden der Stadt sind **großflächige Veränderungen** zu erwarten. Im Vergleich zu den unbebauten Naturräumen mit einer hohen klimaökologischen Wertigkeit sind durch die geplanten Baumaßnahmen deutliche Verluste dieser Funktion hin zu Belastungsbereichen zu erwarten.

Durch die Entwicklungen des FNP ist im Stadtgebiet mit einem **Wegfall einiger Belüftungskorridore** zu rechnen. Manche Arme des Systems der Luftleitbahnen werden durch eine gesteigerte Bodenrauigkeit ihr aerodynamisches Potential verlieren und zukünftig nicht mehr dem Belüftungssystem der Stadt zur Verfügung stehen:

- entlang der Straße der Nationen sowie östlich davon im Bereich August-Röbling-Str./Am Roten Berg
- entlang der BAB71 zwischen Kreuz Gisperleben und Ausfahrt Mittelhausen
- entlang der Martin-Anderson-Nexö-Str.
- östlich des Zooparks
- nördlich des Klinikums entlang der Donaustr. und Marie-Elise-Kayser Str.

Dadurch ist eine Reduktion der Belüftungsverhältnisse zu erwarten.

Durch die Innenentwicklung ist an unterschiedlichen Bereichen der Stadt mit einer **Ausdehnung der städtischen Klimatope** zu rechnen:

- Teile der äußeren Oststadt
- östlich der Hannoverschen Straße zwischen Thüringen Park und Klinikum
- entlang der Straße der Nationen

Dies gilt auch für die Erweiterungen verschiedener Gewerbegebiete:

- das Güterverkehrszentrum
- südlich des Flughafens
- die Gewerbegebiete "Überm Feldgarten" und "Am Tonberg" (Weimarische Straße/Ostumfahrung)
- südwestlich und nordöstlich von Vieselbach
- entlang der Leipziger Straße östlich des Bahndamms



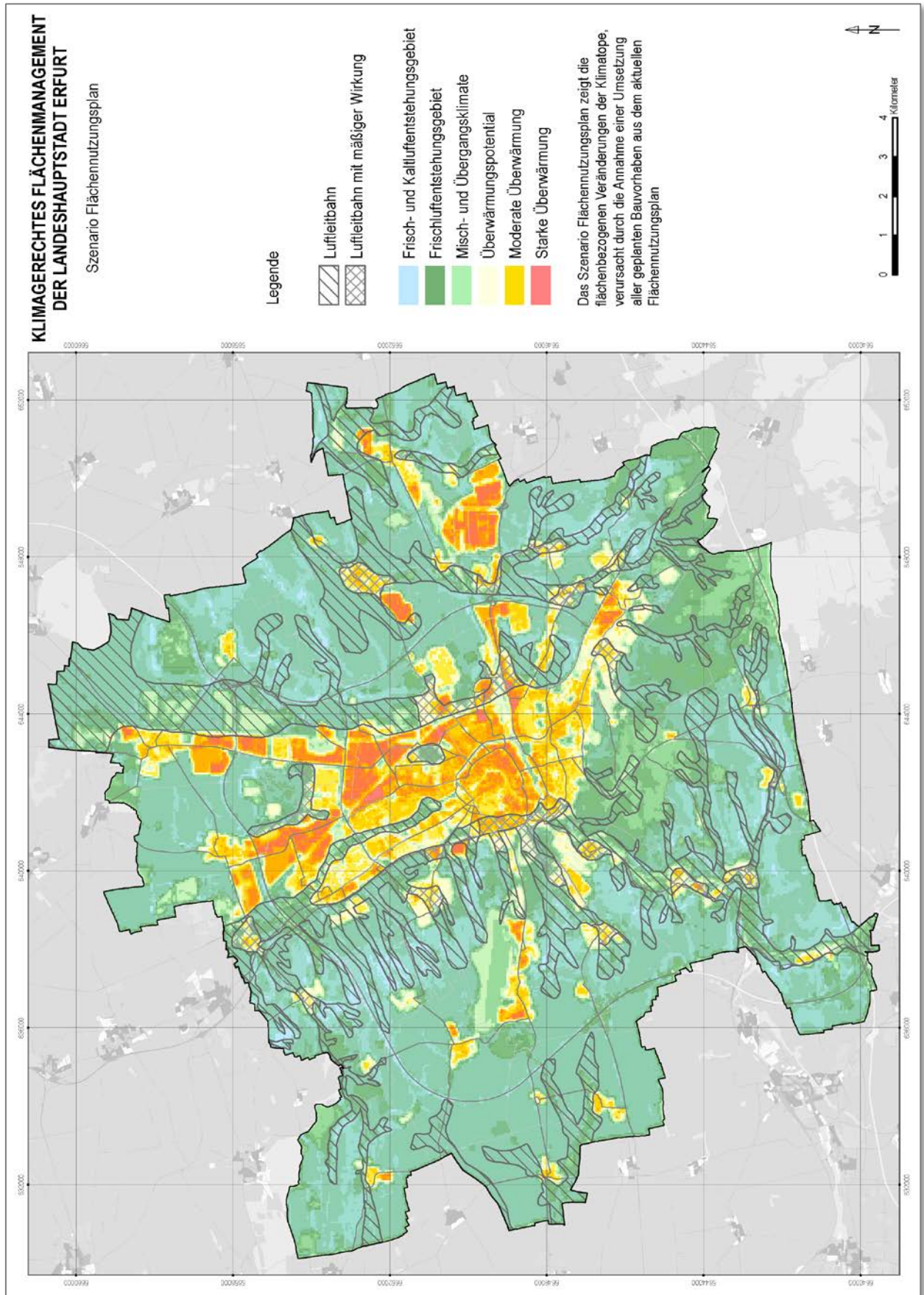


Abbildung 63: Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt Erfurt - Szenario Flächennutzungsplan.



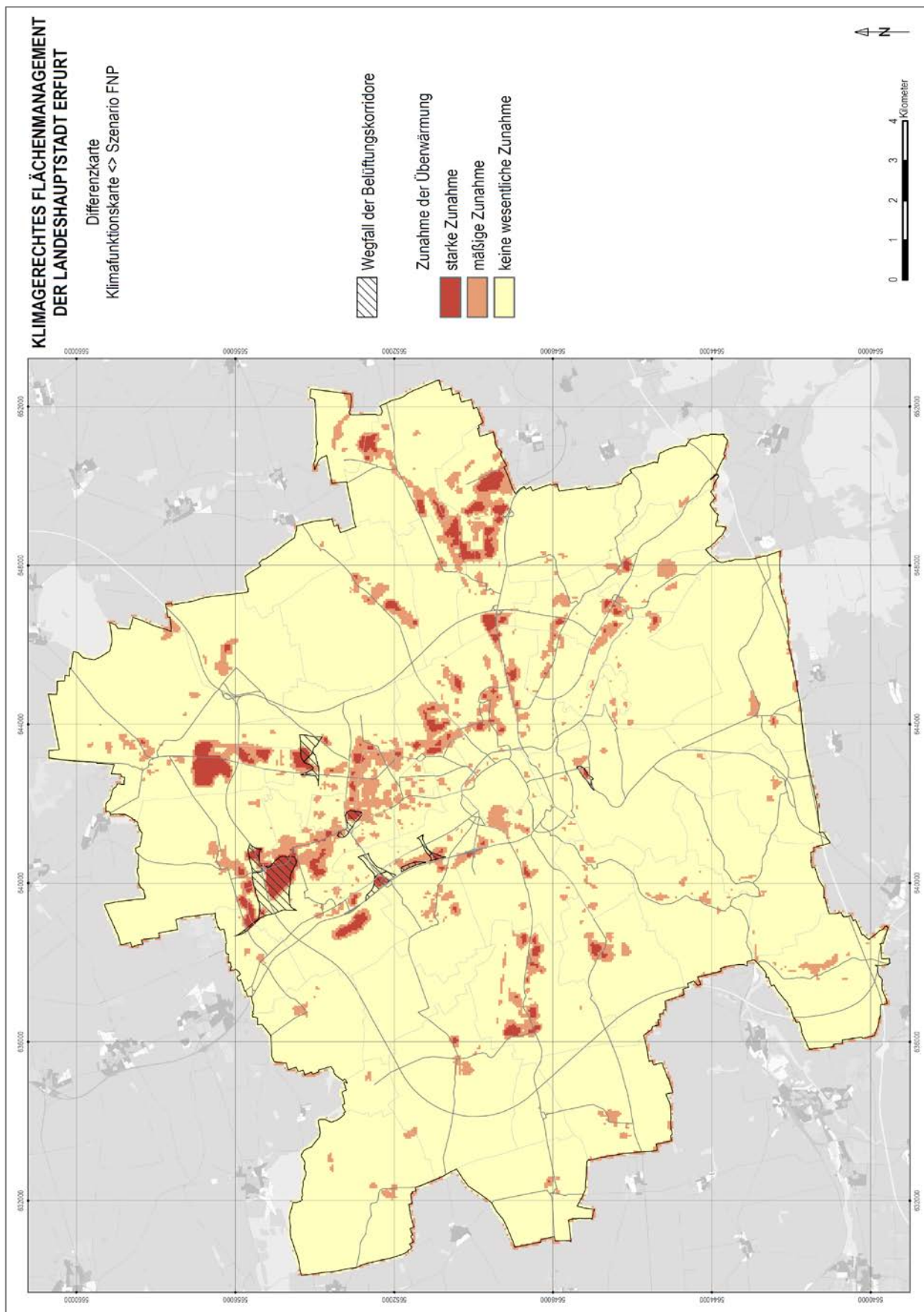


Abbildung 64: Differenzkarte Klimafunktionskarte Ist-Situation zur Klimafunktionskarte Szenario Flächennutzungsplan.

## 8.2 Klimafunktionskarte Szenario Klimawandel

Um die Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels (2041-2070) als klimatische Randbedingung zu berücksichtigen, wurden dementsprechend die meteorologischen Eingangsdaten verändert.

Analog zu der IMPAKT Studie des Landes Thüringen wurden für die Berechnung des Szenarios Klimawandel Daten aus dem 4. Sachstandsberichtes des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) genutzt. Der IPCC fasst den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand der Klima- und Klimafolgenforschung zusammen. Als Eingangsdaten wurde das A1B-Szenario verwendet, welches in der Klimafolgenanpassungsforschung und -praxis für am wahrscheinlichsten gehalten wird.

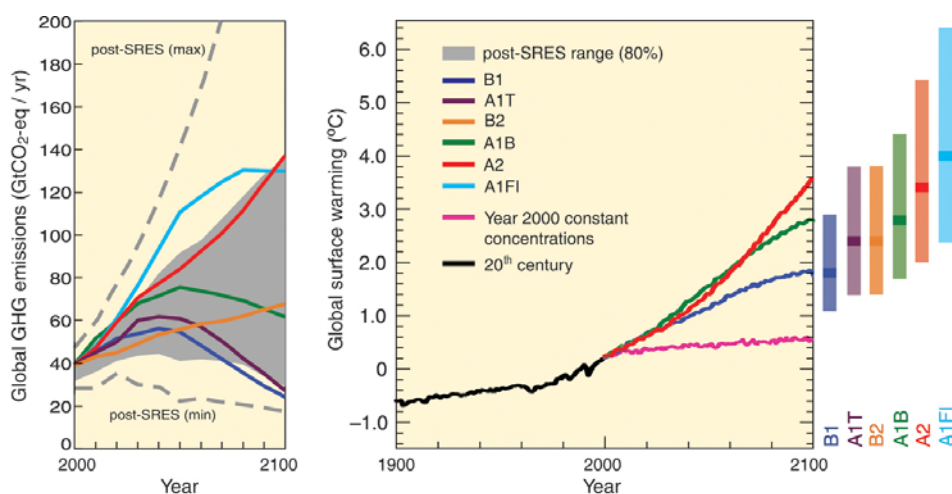


Abbildung 65: Klimaszenarien und prognostizierter globaler Temperaturverlauf (IPCC 2007).

Dieser Klimaanalyse wurde das Klimamodell CLM für das Klimaszenario A1B (Lauf 1; Zeitraum 2001 - 2100) in Verbindung mit dem Referenzszenario C20 (Lauf 1; Zeitraum 1961 - 2000) zugrunde gelegt.

Durch den prognostizierten Klimawandel treten unterschiedliche Veränderungen hervor. Vor allem **steigert sich der Effekt der städtischen Wärmeinsel**. Häufigkeit, Dauer und Intensität städtischer Hitzebelastung nehmen zu aufgrund der Zunahme austauscharmen Wetterlagen und thermischer Extremwerte (Kuttler 2011). Urbane Gebiete, geprägt von künstlichen Baumaterialien wie Asphalt, Beton etc. werden zukünftig besonders stark betroffen sein. In Erfurt sind die dicht bebauten städtischen Gebiete und die großflächigen Gewerbe- und Industrieflächen besonders betroffen. In diesen Bereichen ist in Zukunft nahezu flächendeckend mit der höchsten Hitzebelastung/ Hitzestressniveau auszugehen. Lang anhaltende Wärmebelastungen führen nicht nur zu gesundheitlichen Problemen, sondern können auch volkswirtschaftliche Schäden bewirken (UBA, 2005).

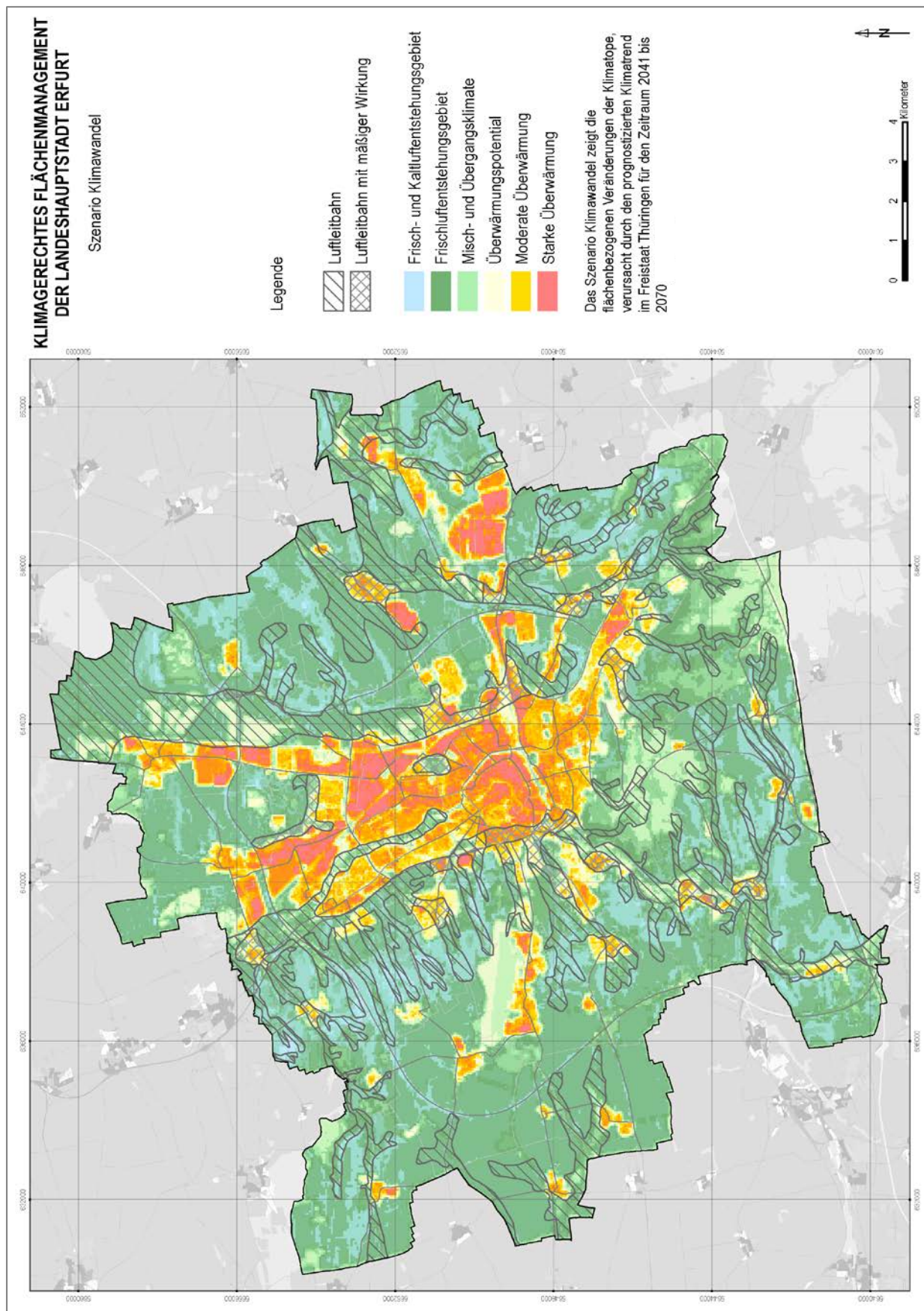


Abbildung 66: Klimafunktionskarte der Landeshauptstadt Erfurt - Szenario Klimawandel.

Locker besiedelte Gebiete mit einem hohen Vegetationsanteil auf den Flächen sind weniger stark betroffen, allerdings sind die Auswirkungen auch auf Naturflächen festzustellen. So werden die Funktionen der Frisch- und Kaltluftentstehungsgebieten, vor allem auf südlich exponierten Hängen, einen leichten Verlust ihrer Funktionsfähigkeit durch die prognostizierten längeren Trockenperioden erleiden.

Anders verhalten sich die Kaltluftentstehungsgebiete an den östlich exponierten Hängen im Westen der Stadt, südlich des Flughafens und in der südwestlichen Geraue. Der Kaltluftabfluss erleidet nahezu keine Einschränkungen und gilt demnach als besonders schützenswert, da er **in Zukunft eine noch höhere Bedeutung für das Stadtklima der Landeshauptstadt Erfurt** haben wird.

Um die Lufttemperaturen zu senken, ist grundsätzlich der Vegetationsanteil innerstädtisch zu erhöhen (Parks, Grünflächen, Dach- und Fassadenbegrünung, Straßenbegleitgrün, etc.). Um die positive Wirkung von urbanen Grünflächen zu verstärken, sollte eine Freiraumvernetzung angestrebt werden. Ideal wäre die Kopplung von funktionsfähigen Luftleitbahnen an städtische bzw. siedlungsnaher Kalt- und Frischluftproduktionsflächen (über Grünachsen und Grüngürtel). Lokale Ausgleichsmaßnahmen können auch auf eine Reduktion der Strahlungstemperaturen abzielen (z.B. schattenspende Laubbäume, Aufhellung von Oberflächen, baulicher und technischer Sonnenschutz).

## 9. Planungshinweiskarte

Im Rahmen der Klimaanpassung ist gemäß §1BauGB unverzichtbar klimatische Ziele in der Stadtentwicklung und Stadtplanung zu berücksichtigen und Strukturen zu optimieren. Die Bewertung der im Analyseprozess gewonnenen Erkenntnisse in einer für die Regional-, Flächennutzungs- und Bauleitplanung verständlichen „Sprache“ fördert eine erfolgreiche Einbindung stadtklimatischer Anforderungen in die Planungsprozesse.

In der Planungshinweiskarte werden alle stadtklimatisch relevanten Teilaspekte

- thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte der Ist-Situation (Abb. 67)
- lokale Belüftung (Abb. 68)
- regionale Belüftung (Abb. 69)
- Flächen ohne direkten Einfluss auf die Erfurter Kernstadt (Abb. 70)
- thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte des Szenario Klimawandel (Abb. 71)

zusammengeführt und Planungsempfehlungen abgeleitet. Planungserfordernisse der relevanten Teilaspekte werden auf den Folgeseiten zusammengefasst (Kapitel 9.1).

Die Klimabewertungskarte (Kapitel 9.2) enthält eine **integrierte Bewertung** dieser Teilaspekte in einer Karte im Hinblick auf planungsrelevante Belange. Die Flächenkennzeichnungen in der Klimabewertungskarte geben Planungshinweise bezüglich der **klimatischen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen** bzw. Bebauungsänderungen. Aus diesen Hinweisen lassen sich klimatisch begründete Anforderungen und Maßnahmen im Rahmen der Bauleitplanung ableiten (Planungshinweiskarte, Kapitel 9.3).

Zur Klimaanpassung gilt es, Kenntnisse über klimatische Wirkungszusammenhänge in der Planungspraxis konsequent umzusetzen. Dies kann mit dem BauGB vorgesehenen Rechtsinstrumenten erfolgen (Darstellungen im Flächennutzungsplan, den Festsetzungen des Bebauungsplanes, im Vorhaben- und Erschließungsplan und durch Vereinbarungen im Städtebaulichen Vertrag).

Generelle Zielsetzung der Planungshinweiskarte ist die Erhaltung bzw. die Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Situation in Erfurt. In der Planungshinweiskarte werden Bereiche mit erhöhter Belastung und Räume mit ausgleichender Funktion dargestellt. Extreme Belastungen sollen abgebaut oder minimiert werden.

Folgende Zielsetzungen sind für eine **klimagerechte Planung** zu verfolgen

- Frisch- und Kaltluftzufuhr durch lokale Windsysteme sichern und fördern
- Durchlüftung der Kernstadt sichern und fördern
- human-bioklimatische Aufenthaltsbedingungen verbessern
- Luftschadstoffemissionen reduzieren
- zukünftig mögliche Belastungen durch den Klimawandel berücksichtigen
- natürliche Vegetation sichern und fördern
- Versiegelung vermeiden und Entsiegeln fördern

## 9.1 Planungserfordernisse der stadtklimarelevanten Teilaspekte

Für die stadtklimarelevanten Teilaspekte wurden Einzelabbildungen generiert, da raumbezogene kartographische Darstellungen als Informationsgrundlage hilfreich sind, um die spezifischen Planungshinweise zu verorten. Diese Abbildungen beruhen auf extrahierten Darstellungen vorhandener Karten:

- Karte der belüftungsrelevanten Räume und Klimafunktionen für das Erfurter Becken (Abb. 19 in Kap. 4.6)
- Klimafunktionskarte der Ist-Situation (Abb. 57 in Kap. 7.2)
- Klimafunktionskarte Szenario Klimawandel (Abb. 66 in Kap. 8.3).



### 9.1.1 Thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte der Ist-Situation

#### Überwärmungsgebiete (Defizitbereiche, orange bis rot)

- Gebäudevolumen reduzieren und Bauhöhen gering halten
- GRZ und GFZ nach BauNVO einhalten und Verdichtung vermeiden
- Flächenversiegelung vermeiden und Entsiegelungsmaßnahmen fördern
- Grün- und Parkanlagen (Vegetationsflächen) erhöhen und vernetzen
- Fassaden-, Dach- und Hofbegrünung fördern
- Laubbaumbestand sichern und erweitern (u.a. zur Reduktion der Strahlungstemperatur durch Schattenwurf)
- Verminderung des Wärmeeintrags und Erhöhung der Albedo (z.B. helle Fassaden)
- Verdunstung und Versickerung ermöglichen

#### Ausgleichsflächen (Potentialbereiche, blau bis grün)

- Funktion sichern und Bestand gegen Flächennutzungsänderung schützen
- Baubeschränkung für Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete bei Relevanz für die Kernstadt
- Vernetzung fördern und funktional ausbauen (Grünachsen und Grüngürtel, hindernisarme Grünflächen als Belüftungsbahnen; Klimafunktionen beachten)

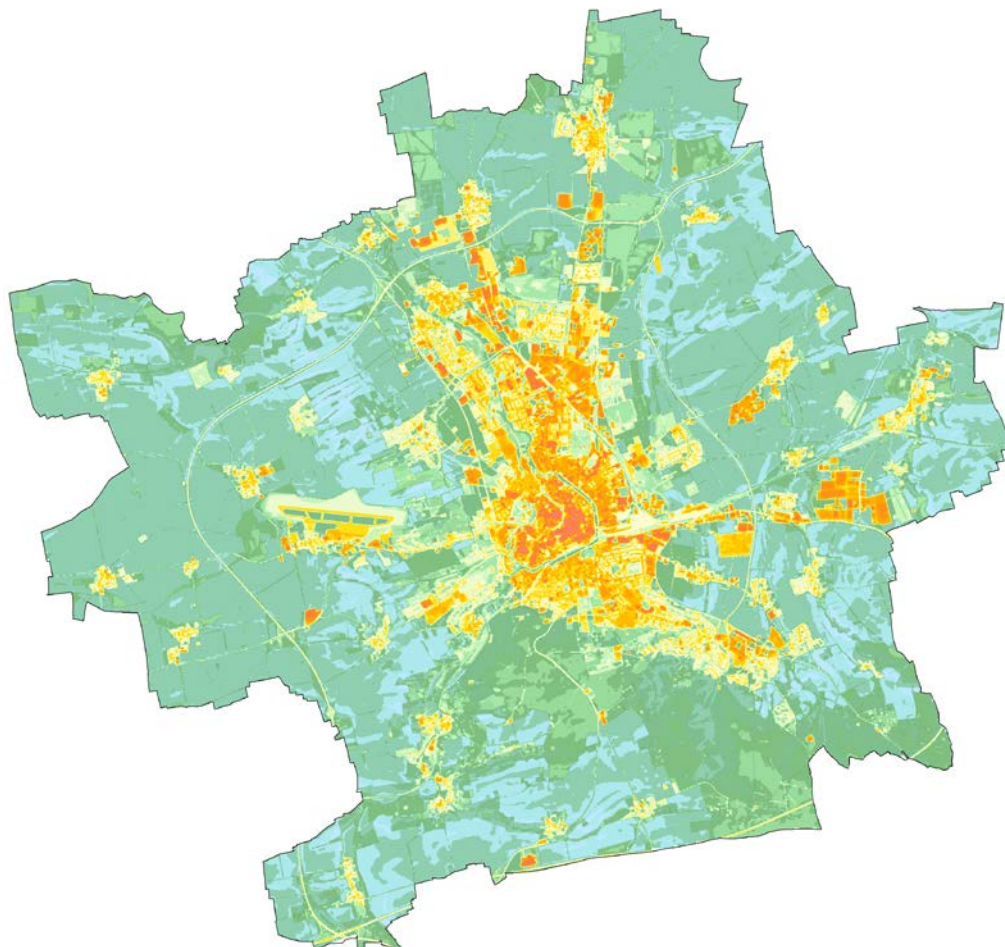


Abbildung 67: Thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte der Ist-Situation

### 9.1.2 Lokale Belüftung

#### Kaltluftabfluss (blaue Pfeile)

- Sicherung der Flächen und Baubeschränkungen bei Relevanz für die Kernstadt
- Eindringtiefen ausbauen, um Belastungsräume zu erreichen
- Rauigkeit erhalten/verringern; Strömungshindernisse beseitigen oder auflockern
- Vermeidung und Verringerung von Luftschadstoffemissionen

#### Luftleitbahnen (schraffierte Flächen)

- Sicherung/Aufweitung der (eingeschränkten) Flächen
- Eindringtiefen ausbauen, um Belastungsräume zu erreichen
- Orientierung an Strömungsrichtungen (Pfeilsymbolik)
- Gebäudestellung/-ausrichtung beachten; keine Riegelbildung zu lassen

#### Durchlüftungsbahnen (zweiseitige Pfeile klein)

- Sicherung der Flächen und des Strömungsquerschnittes
- Höhen-/Breitenverhältnis ausreichend dimensionieren
- Strömungsbarrieren vermeiden

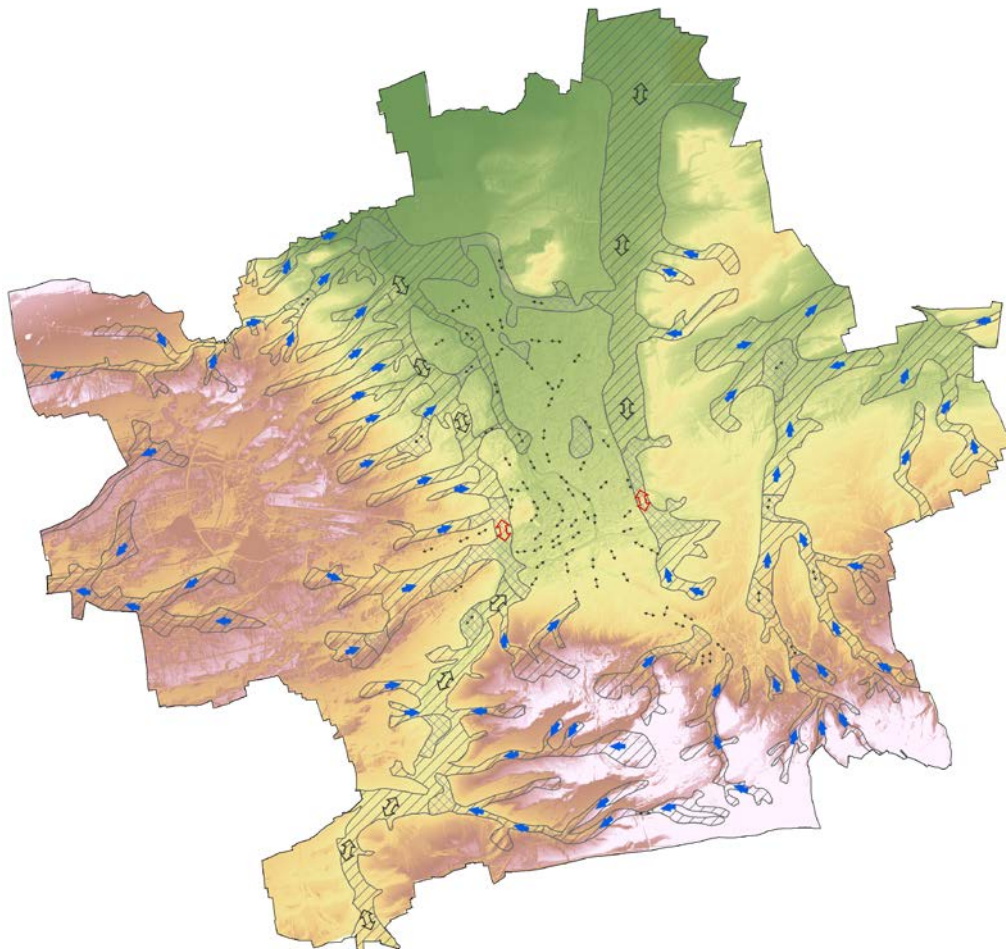


Abbildung 68: Lokale Belüftung

### 9.1.3 Regionale Belüftung

#### Wirkbereiche bei westlicher Anströmung (hellblau)

- keine weitere emittierende Nutzung, bestehende Emissionen reduzieren (Hausbrand, Kfz und Industrie)

#### Wirkbereiche bei östlicher Anströmung (hellrot)

- keine weitere emittierende Nutzung, bestehende Emissionen reduzieren (Hausbrand, Kfz und Industrie)

#### Hauptdurchlüftungsbahnen (rot)

- Sicherung der Flächen und des Strömungsquerschnittes
- Entsiegelung, Rückbau von Gebäuden und Aufweitung fördern
- Vernetzung der Grünstrukturen ("Grünachsen")
- Höhen-/Breitenverhältnis ausreichend dimensionieren
- Strömungsrichtung beachten und Strömungsbarrieren vermeiden

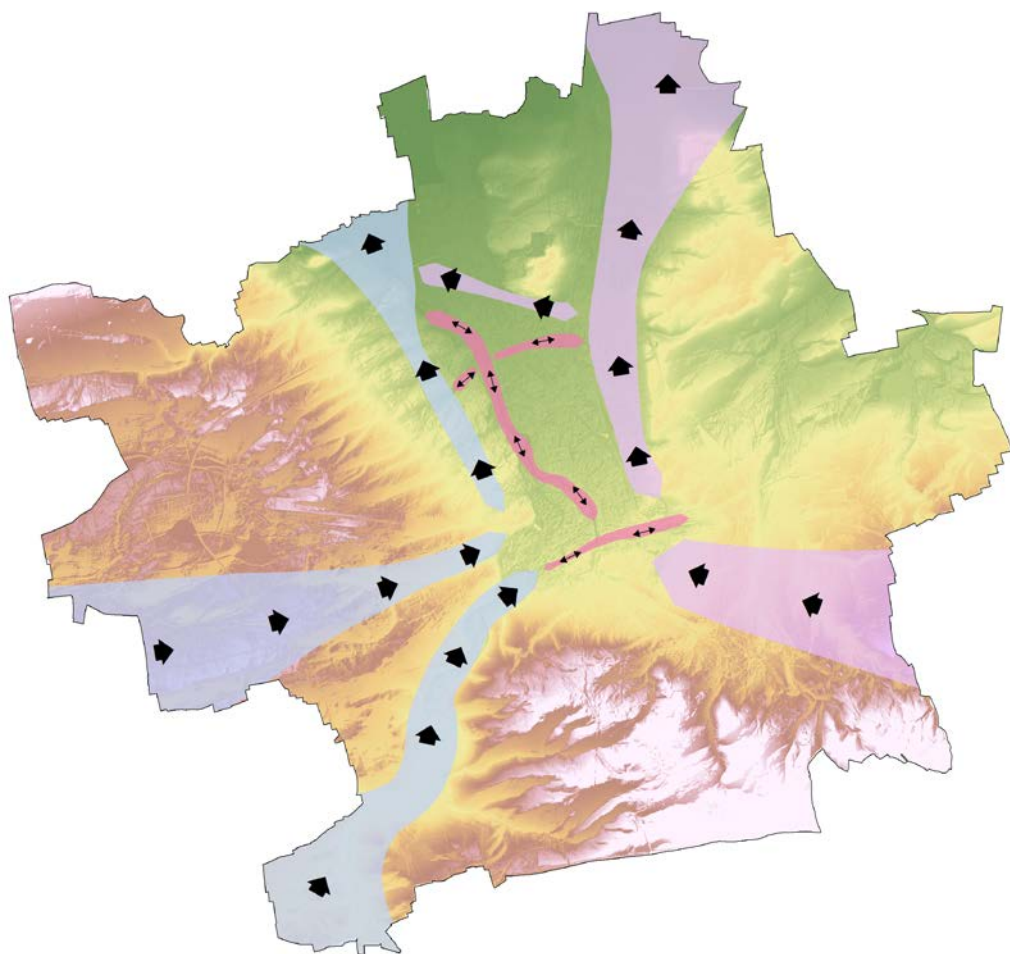


Abbildung 69: Regionale Belüftung

### 9.1.4 Flächen ohne direkten Einfluss auf die Erfurter Kernstadt

#### Flächen ohne direkten Einfluss (gepunktet) auf das Stadtklima der dichter bebauten Kernstadtgebiete

- Folgende Punkte gelten nur für den Bereich, der geringen Einfluss hat:
- Entwicklungen sind (auf den gepunkteten Flächen) aus klimatischer Sicht mit weniger Einschränkungen verbunden
- Entwicklung auf den Potentialflächen (Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete) unter klimatisch-sensitiver Planung möglich
- Entwicklung unter Berücksichtigung der dörflichen Siedlungen und der dortigen Überwärmung
- lokale Strömungen (Kalt- und Frischluftabflüsse) in den Ortsteilen beachten
- kein emittierendes Gewerbe auf den regionalen Belüftungsflächen
- Vermeidung neuer Hot Spots durch verbesserte Begrünung und Belüftung

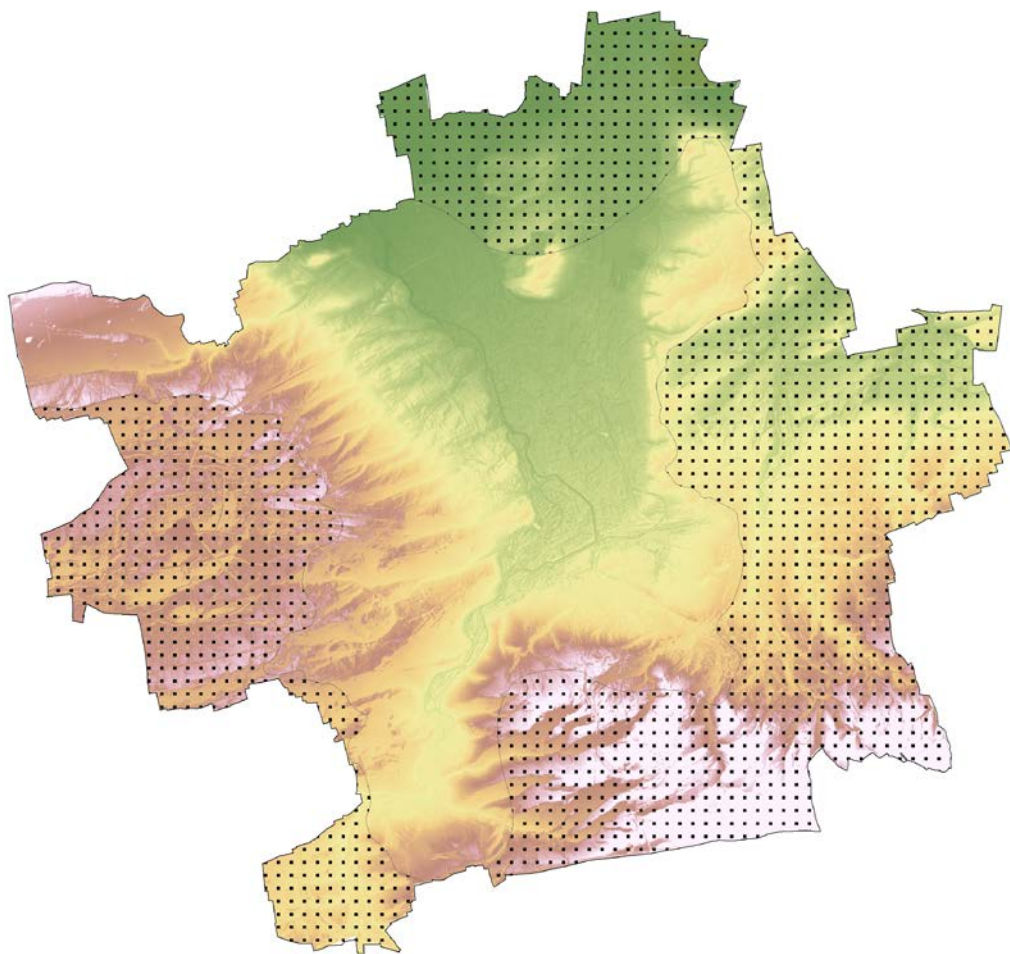


Abbildung 70: Flächen ohne direkten Einfluss auf die Erfurter Kernstadt

### 9.1.5 Thermische Klimatopklassifizierung der Klimafunktionskarte (Szenario Klimawandel)

Bereiche, die zukünftig (2041-2070) besonders zu berücksichtigen sind

- besondere Bedeutung der westlichen und östlichen Kaltluftentstehungsgebiete (blau) insbesondere die Gebiete der westlichen Hänge (Marbacher Hänge), Flächen südlich des Flughafens (Eselsgraben / Brühler Hohle), das südwestliche Geratal, die Dittelstedter Flur, Bereiche nördlich und südlich des Ringelbergs sowie des Katzenbergs)
- besondere Bedeutung der westlichen und östlichen Kaltluftabflüsse (blaue Pfeilsymbolik des lokalen Belüftungssystem Kapitel 9.1.2)
- Sicherung der durch die Umsetzung des Flächennutzungsplans gefährdeten Luftleitbahnen (vgl. Kapitel 8.2)
- präventive Aufwertung zukünftiger Hotspots durch Maßnahmen wie Entsiegelung und Erhöhung des Vegetationsanteils

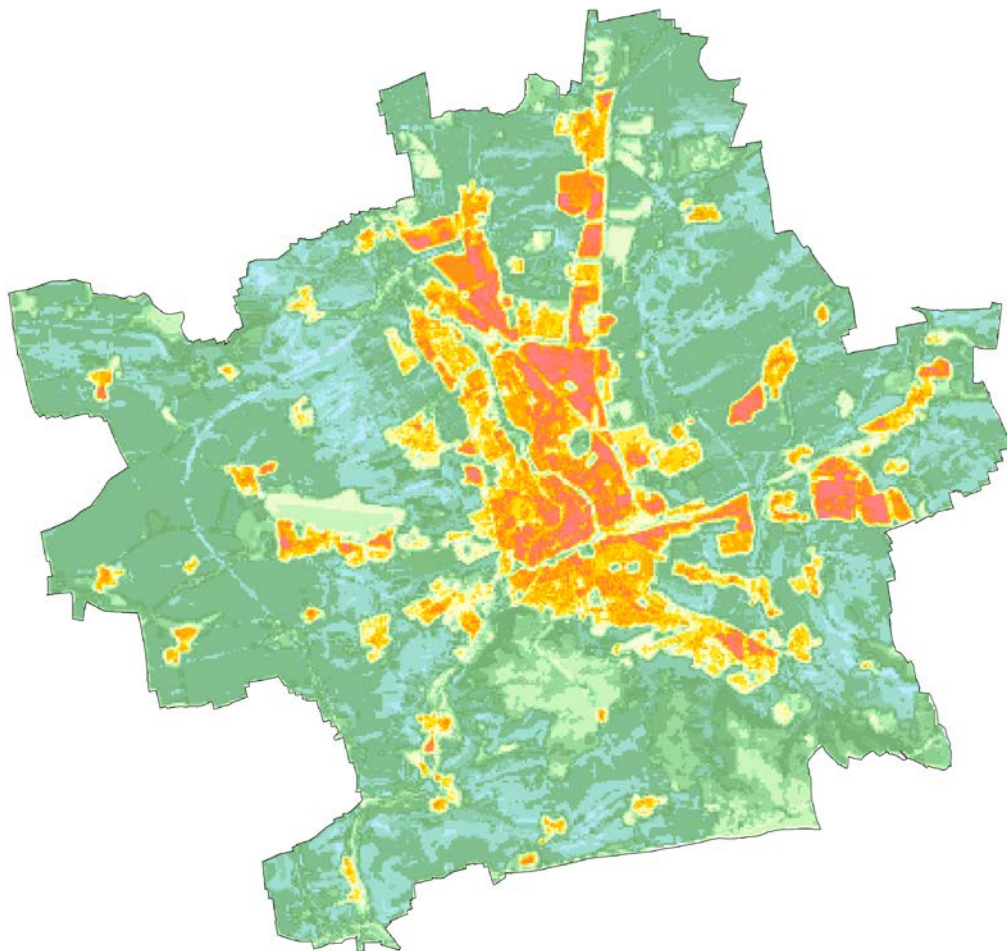


Abbildung 71: Thermische Klassifizierung der Klimafunktionskarte (Szenario Klimawandel)

## 9.2 Klimabewertungskarte

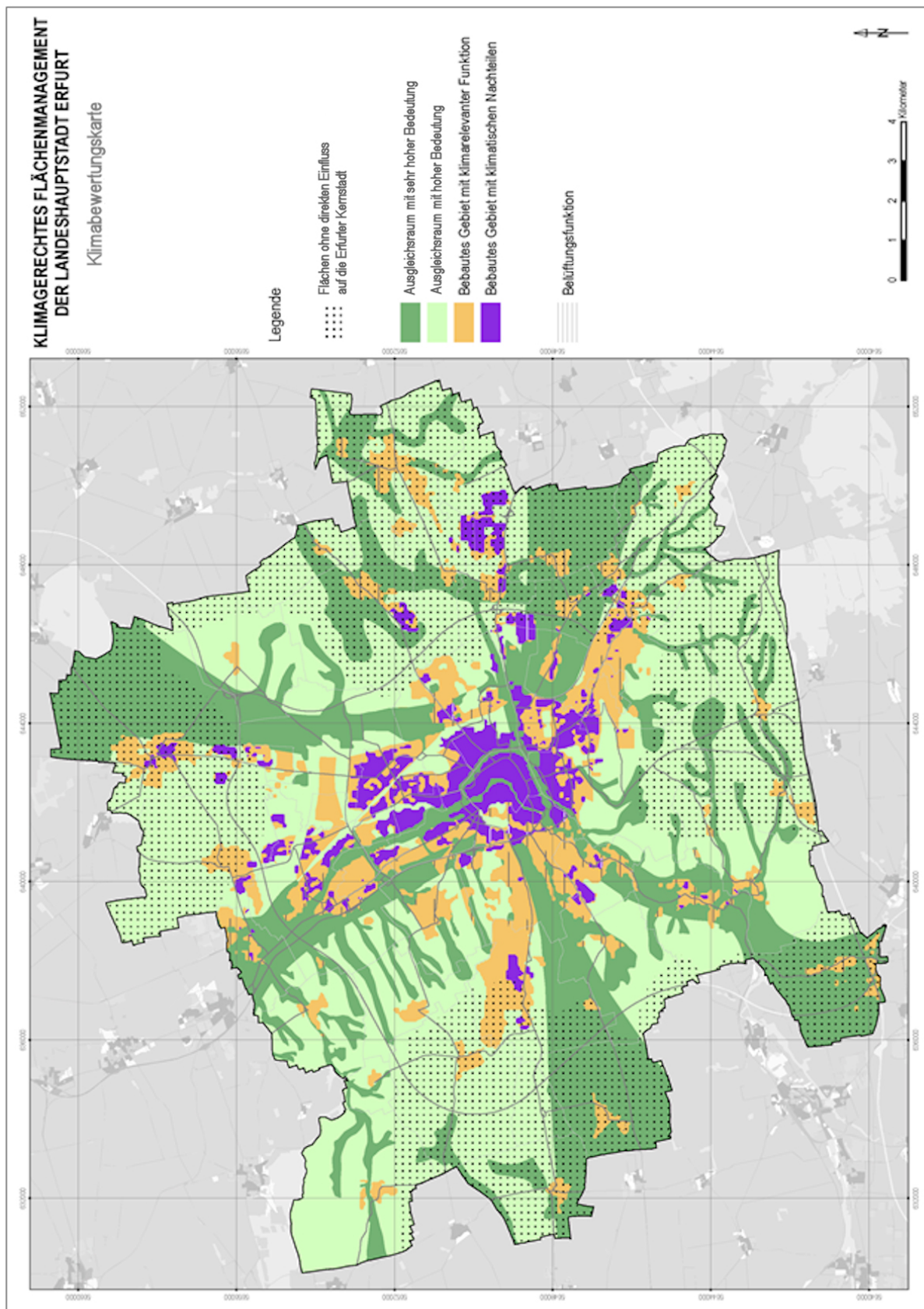


Abbildung 72: Klimabewertungskarte der Landeshauptstadt Erfurt.

## Beschreibung der Klimabewertungskarte

Die Klimabewertungskarte für die Landeshauptstadt zeigt die Klimaräume, denen Erhaltung einen klimatischen, lufthygienischen Zustand ermöglicht, der nicht zu hohen Belastungen führt und die bestehenden abbaut und Klimaräume, deren Änderung geringen Einfluss haben. Die Klimabewertungskarte dokumentiert die wichtigen Ausgleichsräume der Stadt Erfurt und ihre Wechselbeziehung mit den Belastungsräumen (d.h. die Klimafunktionen wie die Kaltluftabflüsse), die mit dem fortschreitenden Klimawandel einen noch größeren Stellenwert für zukünftige Planungen erhalten.

### Ausgleichsraum mit sehr hoher Bedeutung

Dies sind vor allem klimaaktive Freiflächen mit direktem Bezug zum Siedlungsraum, wie innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen oder solche, die im Einzugsgebiet eines Berg-/Talwindsystems bzw. der lokalen oder regionalen Belüftung liegen.

Dieser Ausgleichsraum umfasst des Weiteren nicht bebaute Täler, insbesondere deren Talsohlen und Geländeeinschnitte, in denen Kaltluft abfließt. Diese Gebiete sind mit sehr hohen Restriktionen gegenüber Bebauung zu belegen. Außerdem sind größere Freiflächen aus klimatisch-lufthygienischen Gründen für den Kernstadtbereich von sehr hoher Bedeutung.

Diese Ausgleichsräume werden mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet; das heißt bauliche und zur Versiegelung beitragende Nutzungen führen zu bedenklichen, klimatischen Beeinträchtigungen und sind zu verhindern. Dasselbe gilt für Maßnahmen, die den Luftaustausch behindern.

Sollten trotz klimatischer Bedenken in solchen Gebieten Planungen in Erwägung gezogen werden, sind dafür klimatisch-lufthygienische Detailgutachten unbedingt notwendig, um aus stadtklimatischer Sicht eine Optimierung zu erreichen.

### Ausgleichsraum mit hoher Bedeutung

Diese Freiflächen sind Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete, die nur zum Teil in Richtung bebauter Gebiete fließt, oder sie besitzen nur eine vergleichsweise geringe Kaltluftproduktionsrate. Für eine möglichst geringe klimatische Beeinträchtigung ist die Erhaltung von Grünflächen und Grünzügen im Kernstadtbereich aber auch in den Ortsteilen wichtig.

Sie sind mit hoher Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet. Auf derartigen Flächen ist aus klimatischer Sicht eine maßvolle Bebauung, die den regionalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, möglich.

### Bebaute Flächen mit klimarelevanter Funktion

Hierbei handelt es sich um bebaute Gebiete, die aufgrund ihrer Lage und ihrer Bebauungsart klimarelevante Funktionen übernehmen. Darunter fallen z. B. locker bebaute und durchgrünte Siedlungen oder Siedlungsränder, die nachts entsprechend abkühlen und relativ windoffen sind oder gut durchlüftete verdichtete Siedlungsbereiche (z. B. Kuppenlagen).

Diese Gebiete führen weder zu intensiver thermisch-lufthygienischer Belastung noch zu Beeinträchtigungen des Luftaustauschs und weisen im Allgemeinen geringe klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeiten gegenüber Nutzungsintensivierungen auf.

Damit sind z. B. Arrondierungen an den Siedlungsrändern und das Schließen von Baulücken gemeint, wobei die in diesem Gebiet vorhandene Dimension der Bebauung beibehalten werden sollte. Solche relativ geringfügigen und der Umgebung angemessenen Nutzungsänderungen ziehen keine wesentlichen klimatisch-lufthygienischen Änderungen nach sich.

Allerdings ist bei Planungen von Baumaßnahmen in diesen ausgewiesenen Flächen eine Beurteilung eines klimatisch-lufthygienischen Sachverständigen bezüglich der Dimensionierung und Anordnung von Bauwerken sowie der Erhaltung und Schaffung von Grün- und Ventilationsschneisen von Vorteil. Eine zusätzliche Versiegelung ist minimal zu halten und durch Schaffung von Vegetationsflächen sowie Dach- und Fassadenbegrünung auszugleichen.

### Bebaute Flächen mit klimatisch Nachteilen

Diese Ausweisung umfasst vornehmlich verdichtete Siedlungsräume, die klimatisch-lufthygienisch stark belastet sind; dazu zählen auch diejenigen bebauten Bereiche, in denen der Luftaustausch maßgeblich durch Bauwerke behindert ist.

Diese Gebiete sind unter stadtklimatischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftig.

Als Aufwertungs- oder Sanierungsmaßnahmen kommen infrage:

Erhöhungen des Vegetationsanteils, Verringerungen des Versiegelungsgrads und Verringerungen des Emissionsaufkommens, insbesondere des Verkehrs und der Feuerungsanlagen. Zudem wird eine Schaffung oder Erweiterung von möglichst begrünten Durchlüftungsbahnen empfohlen; damit ist u. U. die Entfernung oder Verlagerung störender Bauwerke verbunden.

## 9.3 Klimatische Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte (Abb. 73) mit der Klimazonenausweisung und den Planungsempfehlungen sollen der klimagerechten Flächennutzungs- und Bebauungsplanung dienen. Um die Ergebnisse in das bestehende Informationssystem und damit in die Anwendung im Planungsalltag der



Landeshauptstadt Erfurt zu überführen, wurde die klimatische Planungshinweiskarte im Layout der seit 1996 angewandten Karte Beiplan Nr. 15 Umwelt- Klima gestaltet.

Die Ausweisung der Klimaschutzzonen ist detaillierter auf Grund der genaueren Datengrundlage und den kleinmaßstäblicheren Berechnungsmethoden. Die Klimaschutzzonen haben sich in einzelnen Bereichen seit 1996 geändert, was an den zwischenzeitlich erfolgten Flächenumnutzungen liegt, aber auch an der bereits erfolgten und der zu erwartenden berechneten Klimaänderung. Dazu kommen die lufthygienischen anspruchsvolleren Grenzwerte, weshalb Be- und Durchlüftungsbahnen eine höhere Bedeutung im innerstädtischen Bereich erhalten.

Generell ist zu unterscheiden zwischen den Klimaräumen, die Einfluss auf das Kernstadtklima haben und Flächen, die ausschließlich das Klima einzelner Ortsteile mit vergleichsweise günstiger Ausgangssituation beeinflussen. Nur die Flächen, die innerhalb der Pfeillinie liegen, haben Einfluss auf die klimatische Situation im Kernstadtgebiet. Die Flächen außerhalb der Pfeillinie haben Einfluss auf das Klima der Ortsteile. Diese können aber auch Einfluss auf die lufthygienische Situation in der Kernstadt und den Ortsteilen haben.

#### Hinweise zur rechtssystematischen Einordnung

Die klimatisch-lufthygienischen Planungshinweise resultieren aufgrund der Systematik des Fachgutachtens ausschließlich aus der Sicht dieses Fachbelanges ohne Berücksichtigung anderer umweltbezogener und sonstiger Belange.

Da der Gesetzgeber dem Klimabelang keinen Abwägungsvorrang und keine normative Wirkung zugewiesen hat, sind aufgrund des gesetzlichen Abwägungsgebots im Rahmen der Bauleitplanung klimatische Belange im erforderlichen Detaillierungsgrad als Abwägungsmaterial zu ermitteln, zu gewichten und gegenüber anderen Belangen gerecht abzuwägen.

Untersuchungsmaßstab des vorliegenden Fachgutachtens ist die Flächennutzungsplanebene, so dass die Untersuchung der Wirkung kleinräumiger Bebauungspläne vertiefender klimatisch-lufthygienischer Detailgutachten bedarf.

#### **Klimaschutzzone 1**

Die Klimaschutzzone 1. Ordnung umfasst die Flächen der Luftleitbahnen (u.a. Kalt- und Frischluft, Durchlüftung) sowie deren bedeutendste Einzugsbereiche im stadtklimatischen Einflussbereich. Der Bereich bemisst sich auf unter 60 % des Stadtgebietes und versorgt das Kernstadtgebiet, in dem ca. 90 % der Erfurter Bevölkerung leben mit Kalt- und Frischluft in eigenbürtigen Wetterlagen, die auf Grund der Lage von Erfurt im Thüringer und im Erfurter Becken häufig auftreten.

Die Flächen besitzen eine sehr hohe Schutzbedürftigkeit.

Diese Flächen werden mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet, das heißt bauliche und zur Versiegelung beitragende Nutzungen führen zu bedenklichen, klimatischen Beeinträchtigungen. Eine Erhöhung der Oberflächenrauigkeit (z.B. durch Bebauung) sowie größere Versiegelungen und Querbebauungen müssen aus klimafunktionaler Sicht ausgeschlossen bleiben.

Strömungshindernisse in diesen Bereichen sind möglichst rückzubauen. Einzelbaumaßnahmen können zugelassen werden, wenn sie nachweislich nicht die klimatische Funktion mehr als bisher einschränken. Dies betrifft auch den Umbau bestehender Anlagen.

In Randbereichen zu anderen lokalen Klimazonen können kleinräumige Arrondierungsbebauungen nach vorheriger klimatischer Bewertung entwickelt werden.

Sollen größere unversiegelte Flächen der Klimaschutzzone 1 baulich entwickelt werden, ist zwingend vorab nachzuweisen, dass keine anderen Flächen zur Verfügung stehen und aufgrund höher zu gewichtender anderer Belange die Notwendigkeit der Inanspruchnahme besteht. Durch klimatisch-lufthygienische Detailgutachten ist eine Optimierung zu erreichen, so dass sich die klimatischen- und lufthygienischen Bedingungen möglichst gering verschlechtern. Dazu können Bauhöhenbegrenzungen, Gebäudeausrichtungen, Überbauungsgrad und Freihaltebereiche gehören. Bei allen Planungen innerhalb dieser Flächenausweisungen sind sehr umfangreiche stadtklimatische Ausgleichsmaßnahmen (Begrünung, Entsiegelung, etc.) notwendig um zumindest einen Teilausgleich zu erreichen. In diesen Baugebieten sind die lufthygienischen Emissionen zu begrenzen.

### **Klimaschutzzone 1a**

Die Klimaschutzzone 1a sind die Flächen mit hoher Schutzbedürftigkeit außerhalb des stadtklimatischen Einflussbereiches. Sie umfasst die wichtigsten Belüftungsbereiche für die Kernstadt und die wichtigsten Kaltluftentstehungsgebiete und Luftleitbahnen für die Ortsteile. Die Kaltluft fließt nicht in die Kernstadt, daher ist der klimatische Einfluss auf die Ortsteile beschränkt.

Die Flächen besitzen eine hohe Schutzbedürftigkeit.

In diesen Bereichen sind lufthygienische Emissionen zu begrenzen, um den Schadstoffeintrag in dem Kernstadtgebiet zu gering wie möglich zu halten. Da die Kaltluftentstehungsgebiete groß sind im Verhältnis zu den zu versorgenden Ortteilen, können Flächen (Arrondierungsbebauungen, Lückenschließungen) baulich in Anspruch genommen, die keine wesentliche nachteilige klimatische Änderungen in den Ortsteilen nach sich ziehen. Selbst größere Baugebiete können geplant werden, ohne nachteilige klimatische Auswirkungen für die Ortsteile zu erzeugen, sofern für die Ortsteile wichtigen Belüftungsbahnen frei gehalten werden. Dafür sind

klimate Einzelgutachten erforderlich. In diesen Baugebieten sind lufthygienische Emissionen auch für den Schutz der Ortsteile zu begrenzen.

### **Klimaschutzzone 2**

Die Klimaschutzzone 2 umfasst die hoch aktiven Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete, land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen in stark geneigten Hangbereichen, sowie größerer innerstädtische Grünflächen mit hoher bioklimatischer Ausgleichswirkung im stadtklimatischen Einflussbereich.

Die Flächen besitzen eine hohe Schutzbedürftigkeit.

Diese Flächen versorgen die Bevölkerung in der Kernstadt mit Kalt- und Frischluft. Eine großflächige Erhöhung der Oberflächenrauigkeit (z.B. durch Bebauung) sowie großflächige Versiegelungen sollten daher aus klimafunktionaler Sicht ausgeschlossen bleiben. Einzelbaumaßnahmen und kleinräumige Bebauungen bzw. Arrondierungen sind möglich. In Randbereichen zu anderen lokalen Klimazonen können Bebauungen vorgenommen werden.

Sollten größere Freiflächen in der Klimaschutzzone 2 einer Bebauung zugeführt werden, sind klimatische Einzelgutachten erforderlich. Bauliche Entwicklungen sind mit Auflagen aus klimafunktionaler Sicht möglich. Umfangreiche stadtklimatische Ausgleichsmaßnahmen sind erforderlich. In diesen Baugebieten sind lufthygienische Emissionen zu begrenzen.

### **Klimaschutzzone 2a**

Die Klimaschutzzone 2a umfasst die hoch aktiven Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete, land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen in stark geneigten Hangbereichen. Die Flächen versorgen die Ortschaften mit Kaltluft- und Frischluft. Die Flächen der Klimaschutzzone 2a sind im Verhältnis zu den Flächen, die mit Kalt- und Frischluft versorgt werden können, sehr groß.

Die Klimaschutzzone 2a besitzt eine mittlere Schutzbedürftigkeit.

Baulichen Entwicklungen sind möglich. Nur bei sehr großen Bauflächenentwicklungen sind im Einzelfall klimatischen Gutachten erforderlich. Die notwendigen Kaltluftentstehungsflächen zur Versorgung der Ortsteile mit Kalt- und Frischluft sind freizuhalten. Lufthygienische Emissionsbegrenzungen sollten zur Aufrechterhaltung der lufthygienischen Qualität erfolgen.

### **Übergangszone**

Die Übergangszone umfasst Flächen verschiedener klimatischer Eigenschaften. Die Flächen haben nur einen geringen oder gar keinen Einfluss auf andere Siedlungsflächen. Sie besitzen selbst keine klimatischen Defizite.

Die Flächen besitzen eine geringe Schutzbedürftigkeit.

Eine Erhöhung der Oberflächenrauigkeit (z.B. durch Bebauung) sowie Versiegelungen können vorgenommen werden. Klimatische Gutachten sind nicht erforderlich. Im stadtrelevanten Einflussbereich sind in der Übergangszone lufthygienische Emissionen zu begrenzen um die Zusatzbelastung in der Kernstadt so gering wie möglich zu halten. In den Bereichen mit eingeschränkten Belüftungsfunktionen sollten Maßnahmen ergriffen werden, die die Belüftungsfunktion verbessert. Dazu sollten nach Möglichkeit Strömungsbarrieren reduziert und Bauungen oder Heckenpflanzungen strömungsparallel errichtet werden.

In den Bereichen mit eingeschränkter Belüftung sollte die Rauigkeit reduziert werden oder strömungsfördernde Bebauung oder Bepflanzung realisiert werden.

### **Sanierungszone**

Die Flächen in der Sanierungszone besitzen thermische und/oder lufthygienische Defizite.

Die Flächen müssen klimatisch saniert werden.

Die Zone umfasst versiegelte bzw. dicht bebaute Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen. Unter dem klimaökologischen Sanierungsaspekt sollten überwärmungsmindernde bzw. durchlüftungsfördernde Maßnahmen besonders in den Wohngebieten erfolgen. Entsiegelungsmaßnahmen sind anstrebenswert, Begrünungsmaßnahmen sollten zwingend erfolgen. Alle lufthygienischen Minderungsmaßnahmen sollten ergriffen werden. Bauungen in Sanierungsbereichen im stadtrelevanten Einflussbereich und in Wohngebieten innerhalb der Ortschaften sind nur mit kompensatorischen Maßnahmen möglich. In den Bereichen mit eingeschränkten Belüftungsfunktionen sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die Belüftungsfunktion zu verbessern. Dazu sollten Strömungsbarrieren besonders im Kernstadtbereich reduziert und Bauungen oder Heckenpflanzungen strömungsparallel errichtet werden.

In den Bereichen mit eingeschränkter Belüftung sollte die Rauigkeit reduziert werden oder strömungsfördernde Bebauung oder Bepflanzung realisiert werden. Vollversiegelt Flächen sollten zurückgebaut und begrünt werden um die Kaltluftzufuhr nicht aufzulösen. Wand- und Dachflächen sind zu begrünen um "klimatische Trittsteine" zur Verbindung klimatisch aktiver Flächen zu bilden.

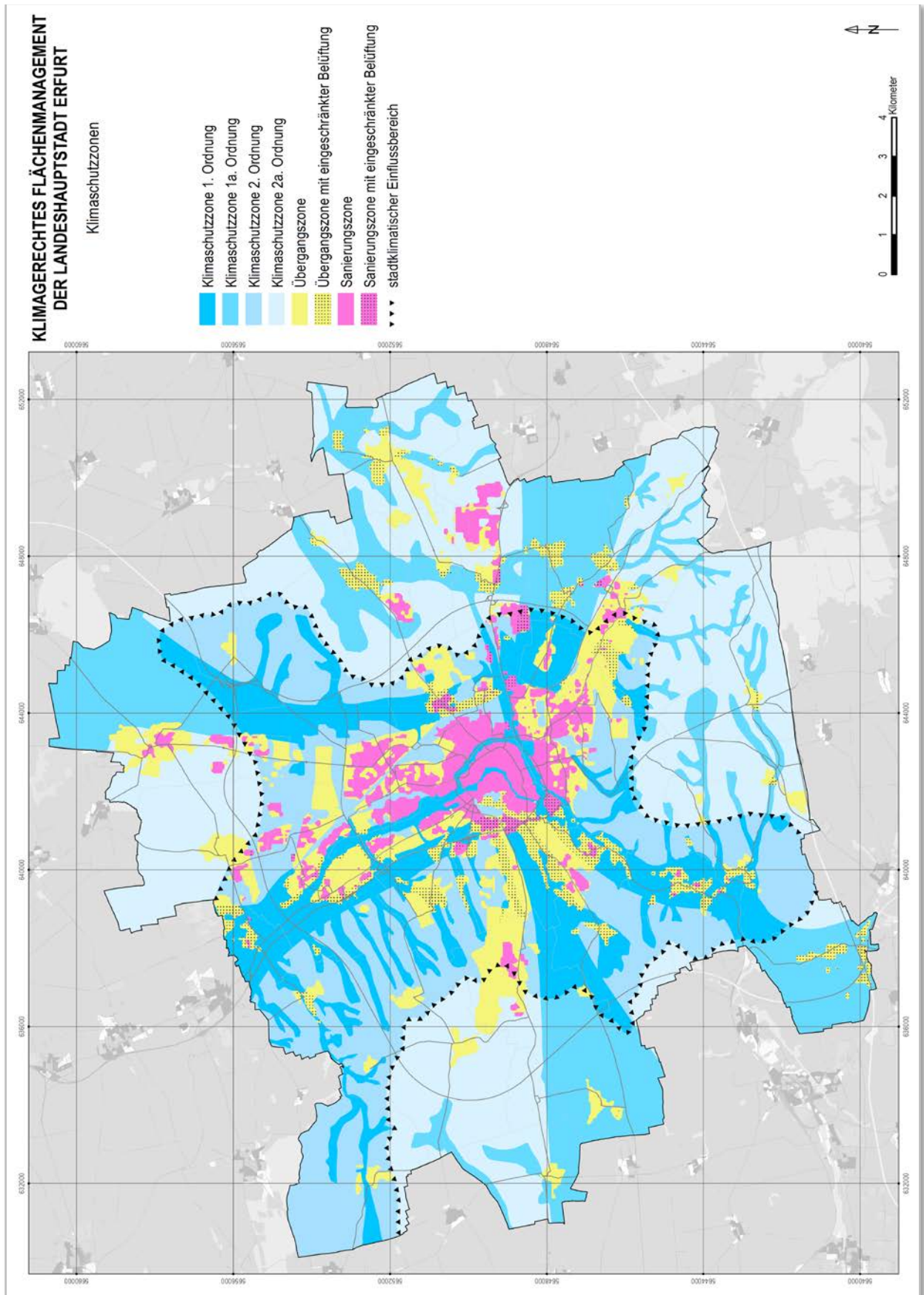


Abbildung 73: Klimatische Planungshinweiskarte der Landeshauptstadt Erfurt.

### Klimaschutzzone 1 (Kernstadt)



- **Sehr hohe Schutzwürdigkeit**
- kernstadtrelevante Durchlüftungs-, Kalt- und Frischluftbahnen sowie deren bedeutendste Einzugsbereiche
- Bebauung und Versiegelung, Erhöhung der Rauigkeit und Querbebauung führen zu klimatisch bedenklichen Beeinträchtigungen
- Funktionsfähigkeit aufrechterhalten und bioklimatische Verschlechterungen ausschließen

### Klimaschutzzone 1 a (Ortsteile)



- **Hohe Schutzwürdigkeit**
- ortsteilrelevante Durchlüftungs-, Kalt- und Frischluftbahnen sowie deren bedeutendste Einzugsbereiche; kein signifikanter Einfluss auf das Klima der Kernstadt
- Bebauung und Versiegelung unter Beachtung der für die Ortsteile relevanten Klimafunktion möglich; marginal emittierende Nutzung in den regionalen Belüftungsbahnen
- Funktionsfähigkeit aufrechterhalten und bioklimatische Verschlechterungen ausschließen

### Klimaschutzzone 2 (Kernstadt)



- **Hohe Schutzwürdigkeit**
- hoch aktive Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Grünflächen mit hoher bioklimatischer Ausgleichswirkung
- Schaffung von Luftleitbahnen
- Erhaltung von Grünflächen und Grünachsen
- windoffene Gebäudeanordnung und Begrünung
- Funktionsfähigkeit aufrechterhalten und bioklimatische Verschlechterungen ausschließen

### Klimaschutzzone 2 a (Ortsteile)



- **Mittlere Schutzwürdigkeit**
- hoch aktive Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Grünflächen mit hoher bioklimatischer Ausgleichswirkung
- größere Bauvorhaben unter Beachtung der für die Ortsteile relevanten Klimafunktion möglich
- Schaffung von Luftleitbahnen
- Erhaltung von Grünflächen und Grünachsen
- Gebäudeanordnung beachten und Begrünung

Abbildung 74: Zusammengefasste Planungsempfehlungen der Planungshinweiskarte im Maßstab 1 : 10 000

### Übergangszone



- **Geringe Schutzwürdigkeit**
- Gebiete ohne stadtklimatische Ausgleichsfunktion und ohne Defizite
- Bebauung und Versiegelung unter Berücksichtigung der Belüftungsstrukturen und Emissionsbegrenzungen möglich

### Übergangszone mit Belüftungsfunktion



- **Förderungsbedarf**
- Reduzierung der Rauigkeit zur Verbesserung und Wiederherstellung des Belüftungssystems
- bei Nachverdichtungen die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte nachweisen und bioklimatische Ausgleichsmaßnahmen durchführen

### Sanierungszone



- **Sanierungsbedarf**
- Maßnahmen zur Minderung der Überwärmung und Förderung der Durchlüftungen durchführen
- Entkernung, Entsiegelung und Begrünung
- Verringerung des Emissionsaufkommens
- bei nutzungsändernden Planungen bioklimatische Ausgleichsmaßnahmen durchführen

### Sanierungszone mit Belüftungsfunktion



- **Sanierungs- und Förderungsbedarf**
- Reduzierung der Rauigkeit zur Verbesserung und Wiederherstellung des Belüftungssystems
- bei Nachverdichtungen bioklimatische Ausgleichsmaßnahmen durchführen

Abbildung 75: Zusammengefasste Planungsempfehlungen der Planungshinweiskarte im Maßstab 1 : 10 000

## 10. Kommunikation und Controlling

### 10.1 Akteursbeteiligung und Öffentlichkeitsarbeit

Um die Ergebnisse des Konzeptes „Klimagerechtes Flächenmanagement der Landeshauptstadt Erfurt“ in Umsetzungsprozesse einbinden zu können, ist die Kommunikation und Einbindung kommunaler Akteure und Verbände, der Fachöffentlichkeit sowie von Privatpersonen vorgesehen.

Während der Bearbeitungszeit wurden Zwischenergebnisse der Stadtverwaltung und dem Ausschuss für Stadtentwicklung und Umwelt vorgestellt, um die entsprechenden Ämter und politischen Gremien zu informieren und zu beteiligen. Neben der Zusammenarbeit mit dem Amt für Geoinformation und Bodenordnung wurde ein weiterer Austausch mit dem Amt für Stadtentwicklung und Stadtplanung durchgeführt, was eine **ressortübergreifende Bearbeitung** ermöglichte.

Um die Öffentlichkeit zu informieren und um eine breite Akzeptanz zu schaffen, wurden Präsentationsvorschläge (z.B. **Handlungsleitfaden, Flyer**) entwickelt, so dass die Inhalte des Projektes schnell und verständlich vermittelt werden. Der entwickelte Entwurf eines Handlungsleitfadens fasst die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse des Klimagerechten Flächenmanagements zusammen und erläutert die Klimafunktions- und Planungshinweiskarte. Ziel ist es, übersichtsartig die Resultate des Projektes darzustellen und das methodische Vorgehen zu erörtern, um die Umsetzung zu initiieren und zu fördern.

Auch ein **zentraler Internetauftritt** zum Thema Stadtklima wurde bereits auf den Seiten der Landeshauptstadt Erfurt aufgebaut. Hier können Informationen rund um das Projekt und zukünftiger Arbeiten abgerufen werden. Über eine Anbindung an das erneuerte Geoportal lassen sich die generierten Klimakarten visualisieren und für Interessenten in Form eines Informationssystems einsehbar gestalten.

Desweiteren liefern städtisch betriebene Messstationen permanent Daten verschiedener meteorologischer Parameter, die zeitnah zur Verfügung stehen. Aktuell vorliegende Messwerte könnten online dargestellt und langzeitige Messreihen statistisch ausgewertet werden (z.B. Anzahl Sommertage pro Monat).

Ein **Hitzewarnsystem** wird seit dem Hitzesommer 2003 vom Deutschen Wetterdienst betrieben und bietet ein Warnmodul an, in dem Stadt/Landkreis bezogene, amtliche Warnung zur Verfügung gestellt wird. Die ständig aktualisierten Warnungen können problemlos implementiert werden.



## 10.2 Controlling

Die Auswirkungen des Klimawandels (z.B. in Form von zunehmender Hitzebelastung) sind nicht nur durch Maßnahmen zum Klimaschutz sondern insbesondere durch Maßnahmen zur Klimaanpassung zu begrenzen. **Klimaanpassung im Rahmen der Kommunalplanung** bedeutet, bereits heute die Aspekte des Stadtklimas in aktuellen Planungen zu berücksichtigen. Auf Basis der klimatischen Grundlagen und insbesondere der Planungshinweiskarte sind die Planungsvorhaben klimatisch zu bewerten und Anpassungsmaßnahmen zum Erhalt oder zur Verbesserung der thermischen oder lufthygienischen Situation zu evaluieren. Konkrete Baumaßnahmen, die in die entsprechende Kategorie der Planungshinweiskarte fallen, benötigen eine detaillierte Klimauntersuchung.

Es bestehen **rechtliche Anforderungen sowie Instrumente** der Stadt- und Regionalentwicklung, um die Umsetzung der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Stärkung der Behandlung der Umwelt- und damit auch der Klimabelange in der Bauleitplanung sind im BauGB verankert. Im Rahmen des Flächennutzungsplan oder des Integrierten Stadtentwicklungskonzeptes als gesamtgemeindliche Planungsinstrumente können Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden. Auch das Festlegen von Umweltzielen (z.B. Anteil der Neuversiegelung, Erhalt von Parkanlagen, Mindestanteile unversiegelter Flächen, gemäßigte Innenverdichtung) als strategische Planung kann der Klimaanpassung dienen.

Zudem ist ein **dauerhaftes Monitoring** der Klimatope und insbesondere der städtischen Wärmeinsel empfehlenswert. Die verwendeten Messdaten der Messstationen der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, des Deutschen Wetterdienstes und der Landeshauptstadt Erfurt stammen aus kontinuierlichen Erhebungen, die in Zukunft weitergeführt werden. Die Temperaturdatensätze können genutzt werden, um mögliche stadtklimatische Änderungen analysieren zu können. Kenngrößen wie Hitze- und Sommertage oder die Andauer von Hitzeperioden können ausgewertet werden. Durch Vergleiche von Klimastationen in der Innenstadt und im Freiland kann die Intensität der städtischen Wärmeinsel verfolgt werden. In sommerlichen Strahlungswetterlagen können die größten Unterschiede zwischen diesen beiden Stationen auftreten. Die Häufigkeit von Tropennächten ist zu überwachen.

Auch Klimasimulationsdatensätze können von Nutzen sein, um zukünftige Trends abzuschätzen. Zentrale Service- und Informationsinstitution Thüringens ist hierfür die **Thüringer Klimaagentur** der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. Gebündelt werden hier zahlreiche Erfahrungen aus Aktivitäten und Projekten (auch anderer Kommunen) zu den Themen Klimawandel, Klimafolgenmonitoring, Klimaanpassung und Klimakommunikation.

Eine weiterführende **Bilanzierung der Flächenumwandlung**, z. B. landwirtschaftliche Flächen hin zu Siedlungs- oder Industrieflächen, kann die klimaökologischen Veränderungen über die Zeit darstellen. Die Berechnung einer Klimafunktionskarte sollte mit aktualisiertem Datenmaterial ca. alle 10 Jahre durchgeführt werden. Über diesem Zeitraum haben sich die Flächennutzung und die Bebauung meist so deutlich geändert, dass diese klimawirksam werden.

## 11. Zusammenfassung

### Erfurter Stadtklima

Die unvermeidbaren Folgen des fortschreitenden Klimawandel sind durch Anpassungsmaßnahmen zu begrenzen. Insbesondere für Städte sind wirksame Maßnahmen frühzeitig zu entwickeln, da sich der Klimawandel hier stärker auswirkt als auf dem freien Land. Der Grund dafür sind die erheblichen Unterschiede im Lokalklima zwischen Kernstadt und Umland bzw. dörflich geprägten Ortsteilen. Das Erfurter Stadtklima ist u.a. geprägt durch einen herabgesetzten Luftaustausch (geringe Windgeschwindigkeiten und Inversionen) und einer städtischen Wärmeinsel in Form von höheren Lufttemperaturen und häufigeren Wärmebelastungen. Die durchgeführte Analyse zeigt dazu folgende Ergebnisse:

Mehr als Dreiviertel der Erfurter wohnen in städtisch geprägten Ortsteilen in der Kernstadt, in denen z.B. im Sommer 2015 mehr als doppelt so viele "heiße Tage" (Tag mit einem Höchstwert der Lufttemperatur von mindestens 30°C) als in den umliegenden dörflich geprägten Ortsteilen gemessen wurden. Durch die hohe Wärmespeicherung bebauter und versiegelter Flächen waren in der Kernstadt auch vielfach "Tropennächte" (Nacht mit einem Tiefstwert der Lufttemperatur von mindestens 20°C) aufgetreten, bei denen die Regenerationsfähigkeit des Körpers erheblich sinkt. Während dem Auftreten von Hitzeperioden wird das Anpassungsvermögen von empfindlichen Personen, älteren und kranken Menschen, Schwangeren und Kindern häufig überfordert. Die Wirkung von Hitze auf Morbidität (Ziffer für die Häufigkeit von Erkrankungen) und Mortalität (Sterbeziffer) sind bekannt, finden aber häufig zu wenig Beachtung. Hitzebedingte Ereignisse stellen neben der direkten Wirkung auf die Gesundheit auch eine massive Beeinflussung der Lebensqualität und Leistungsfähigkeit der Menschen dar, was zu Belästigungen und Beeinträchtigungen oder subklinischen Veränderungen führt. Lang anhaltende Wärmebelastungen führen nicht nur zu gesundheitlichen Problemen, sondern können auch volkswirtschaftliche Schäden bewirken. In naher Zukunft werden mit fortschreitendem Klimawandel ungünstige Witterungsbedingungen (wie heiße Tage und Tropennächte) immer häufiger und intensiver auftreten und nicht nur die Sommermonate betreffen.

Auch die Emissionslast ist aufgrund der dichteren Nutzung (Verkehr, Heizbedarf) in der Kernstadt höher. Gegenüber dem Umland wird der Wind durch die Stadtstrukturen stark reduziert. Die Erfurter Mulde schränkt durch die windgeschützte Lage die Belüftungsbedingungen zusätzlich stark ein. Damit treten im Erfurter Becken Schwachwinde bzw. Windstillen mehr als dreimal so häufig auf. Der horizontale Luftaustausch wird dadurch deutlich reduziert. Eine weitere Besonderheit des Erfurter Beckens ist die Förderung von innerstädtischen Inversionen innerhalb der Mulde, die den vertikalen Luftaustausch verhindern. Die Belüftung mit frischer, kühler, unbelasteter Luft ist für das Wohlbefinden und die

Gesundheit der Bevölkerung von entscheidender Bedeutung und ist in Erfurt von höherer Bedeutung in planerischen Entscheidungsprozessen als in anderen Städten.

Die Aspekte des Stadtklimas sind durch die Stadtplanung beeinflussbar und deshalb frühzeitig zu berücksichtigen. Im Jahr 1993 wurde bereits eine gesamtstädtische Klimaanalyse durchgeführt. Abgeleitete Empfehlungen wurden daraufhin in die städtischen Planungen eingebracht. Seitdem hat sich vieles an der städtischen Struktur (durch Bautätigkeiten, Flächenumnutzung sowie Rückbaumaßnahmen) entwickelt, so dass eine Neubewertung immer drängender wurde. Damit Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in Städten zukünftig gesichert sind, muss die Stadtplanung schon heute städtebauliche Planungen so optimieren, dass die thermischen und lufthygienischen Belastungen auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Aufgrund der Folgen des Klimawandels müssen Städte mittel- bis langfristig umgestaltet werden (BMVBS 2013).

### Stadt- und lokalklimatische Informationen aus der Klimafunktionskarte

Eine Klimafunktionskarte ist eine Synthese der lokalklimatischen Eigenschaften und stellt das Ergebnis eines klimaökologischen und lufthygienischen Gutachtens dar. Die Erstellung der Klimafunktionskarte basiert auf einer Analyse der Komponenten des Stadtklimas: Thermik (z.B. Wärmeinsel, Kaltluftproduktionsflächen) und Dynamik (z.B. Kaltluftabflüsse, Durchlüftungskorridore). Grundlage ist stets die Beurteilung der Ist-Situation, also eine möglichst präzise Abbildung der realen Klimafunktionen im Untersuchungsraum. Die flächendeckende Auswertung konnte in einer sehr hohen, horizontalen Auflösung von 10 Metern durchgeführt werden, wodurch auch sehr feingliedrige Strukturen (wie versiegelte Parkplätze, begrünte Innenhöfe) in ihrer klimatischen Wirksamkeit abgebildet werden. Die Vorgehensweise entspricht genormten VDI Richtlinien, was u.a. auch eine Vergleichbarkeit zu anderen Städten ermöglicht. Die Klimafunktionskarte erleichtert dem Planer stadtklimatische und lufthygienische Belange zu berücksichtigen und mögliche lokalklimatische Auswirkungen einer potentiellen Flächennutzungsänderung zu bewerten.

Innerhalb der administrativen Grenzen der Landeshauptstadt Erfurt bewirken vor allem die großzügigen landwirtschaftlichen Flächen eine positive Bilanzierung der Ausgleichsräume im Verhältnis zu den Belastungsbereichen. Allerdings weisen die urbanen Gebiete den typischen Effekt der städtischen Wärmeinsel sowie höheren Konzentration von Luftschadstoffen auf. Hauptsächlich sind dies dicht bebaute Kernstadtbereiche mit hohem Bebauungs- und Versiegelungsgrad, geringem Vegetationsanteil und hoher Emissionslast (Plattenbaugebiete sowie die Altstadt und Gründerzeitbebauung). Daneben treten die Gewerbe- und Industriegebiete mit den ausgedehnten versiegelten Flächen hervor. Auch hier wird die höchste Belastungskategorie erreicht.

Ausgleichende oder abmildernde Wirkungen gehen von klimatisch wertvollen Flächen aus. Vor allem die Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete im Westen, Osten und Süden der bebauten Gebiete Erfurts können über die analysierten Belüftungsbahnen eine positive Wirkung auf die Belastungsgebiete ausüben. Die lokale Belüftung ist dabei besonders wichtig, denn nur über geeignete Bahnen mit geringer Rauigkeit, ausreichendem Querschnitt und entsprechender Nutzung kann eine Belüftung an windschwachen Tagen, die im Mittel an 30% der Tage im Jahr auftreten, wirken.

Über Luftleitbahnen wird frische, unbelastete Luft vom Umland in die Stadt transportiert. Großräumige Belüftungskorridore mit hoher Relevanz für die Kernstadt sind das Geratal und das Tal, in dem der Brühler Hohlweg verläuft, als auch die Flächen entlang der Hannoverschen Straßen sowie die Dittelstedter Flur und die Flächen zwischen der Bahnstrecke Richtung Stotternheim und der Ostumfahrung. Die Hauptdurchlüftungsachsen innerhalb der Kernstadt sind die Gleisanlagen, der Flutgraben und die nördliche Geraaue sowie die nördliche Querverbindung.

### Planerische Empfehlungen aus der Planungshinweiskarte

Der Gesetzgeber hat den Städten bei der Aufstellung von Bauleitplänen vorgegeben, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürliche Lebensgrundlage zu schützen und zu entwickeln und dabei auch die Belange der Klimaanpassung zu fördern (§1 Abs. 5 BauGB). Das Ziel ist die Schaffung und Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsbedingungen und die Sicherheit der Bevölkerung. Klimatische Fachinformationen und abgeleitete Planungshinweise sind bei der Aufstellung von Bauleit- und Stadtentwicklungsplänen zu berücksichtigen.

Die Planungshinweiskarte enthält eine integrierte Bewertung der stadtklimatischen und lufthygienischen Belange. Die Flächenkennzeichnung der Karte geben Planungshinweise bezüglich der klimatischen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen. Aus diesen Hinweisen lassen sich klimatisch begründete Anforderungen und Maßnahmen ableiten.

Die Kernstadt zeigt neben einer hohen Einwohnerdichte auch einen überdurchschnittlichen Überwärmungsgrad. Die Belastungsbereiche der Plattenbaugebiete, der Innenstadt und der dichten Blockbebauung sowie der Industrie- und Gewerbeflächen sind aus stadtklimatischer Sicht zu sanieren (Sanierungszone). Maßnahmen wie Entsiegelung, Begrünung und die Vermeidung von hohen Emissionslasten durch Verkehr und Energieerzeugung sind zu fördern. Innerstädtische Ausgleichsflächen wie z.B. der Flutgraben oder der Stadtpark müssen erhalten und geschützt werden, ein Ausbau und eine Vernetzung der Grünräume sind anzustreben. Dazu sollte z.B. die Geraaue begrünt werden und ein Rückbau erfolgen. Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete mit hoher Relevanz für überwärmte Stadtgebiete sind zu erhalten (z.B. durch Baubeschränkungen). Kaltluftabflussbahnen sind in ihrer Funktionsfähigkeit zu sichern und deren Eindringtiefe in überwärmte Gebiete ist funktional (in Form von Grünachsen und

Grüngürtel) auszubauen. Diese Flächen mit höchster bzw. hoher Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen sind den Klimaschutzzonen 1 bzw. 2 zu geordnet.

Durch die eingeschränkten Luftaustauschverhältnisse in der Kernstadt können sich Luftschadstoffe anreichern. Städtische Flächen sowie Naturräume mit besonderen Belüftungseigenschaften, die positive Wechselwirkungen hervorrufen, müssen in ihrer Qualität und Funktion geschützt werden. Unter Berücksichtigung der klimatischen Lage sind die Belüftungsverhältnisse generell zu verbessern, ggf. sind Rückbau- und Entsiegelungsmaßnahmen und mehr Vegetationsflächen einzuplanen. Luftschadstoffkonzentrationen sind durch die Nutzung von emissionsarmer Energieversorgung (z.B. Fernwärme, emissionsfreie Quellen), Verkehrsberuhigung, Stärkung des Umweltverbundes u.a. Maßnahmen zu reduzieren. Flächen mit hoher Relevanz für die städtische Belüftung bzw. den Luftaustausch sind in der Planungshinweiskarte explizit gekennzeichnet.

Neben diesen schützenswerten Arealen stehen auch Flächen zur Verfügung, auf denen unter besonderer Berücksichtigung der klimatischen Belange eine baulichen Entwicklung verträglich ist. Zum einen sind es städtische Bereiche, die weder zu intensiver thermisch-lufthygienischer Belastung noch zu Beeinträchtigungen des Luftaustauschs führen. In der Karte sind diese als Übergangszone gekennzeichnet. Zum anderen betrifft es Flächen außerhalb des Erfurter Beckens, die sich großflächig anbieten. Diese entfernter liegenden Flächen der Dorfgebiete, die häufig mit dem Geländegefälle nach außen zu den Stadtgrenzen orientiert sind, haben einen unerheblichen Einfluss auf die klimatische und lufthygienische Situation innerhalb des Erfurter Beckens und damit auf die Belastungsbereiche der Kernstadt. Lokal können diese Flächen jedoch in den dörflichen Ortsteilen wirksam sein. Im Allgemeinen weisen die Flächen außerhalb des Erfurter Beckens und die Flächen in der Übergangszone geringe klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeiten gegenüber Nutzungsintensivierungen auf.

### Erkenntnisse aus den Szenarien

Um in den heutigen Planungsprozessen eine klimabewusste und zukunftsfähige Ausrichtung zu realisieren, müssen Kenntnisse vorhanden sein, wie sich der klimatologische Trend fortsetzt und welche Auswirkungen dieser auf den konkreten Planungsraum haben kann.

Um die wahrscheinlich eintretenden Veränderungen zu veranschaulichen, wurden zwei Szenarien entwickelt. Neben der geplanten baulichen Entwicklung in der vorbereitenden Bauleitplanung (Flächennutzungsplan) wurden die Änderungen durch den Klimawandel betrachtet. Das Szenario (Umsetzung des Flächennutzungsplans) zeigt großflächige Hotspots durch die neu geplanten Gewerbe- und Industrieflächen nördlich und südlich der A71. Zudem gehen in einigen Teilbereichen die Funktionen der Luftleit- und Kaltluftabflussbahnen verloren, was die Belüftungsverhältnisse reduzieren wird. Außerdem wird sich die Überwärmung

qualitativ und quantitativ ausdehnen, sowohl durch die Innenentwicklung im Kernstadtbereich als auch durch die Erweiterung verschiedener Gewerbegebiete.

Um explizit die klimatischen Veränderungen der Zukunft abzubilden, wurde der mittlere Trend des Klimawandels in der Region in die Betrachtung integriert (Szenario Klimawandel). Die Ergebnisse zeigen, inwieweit sich die unterschiedlichen klimatischen Flächen erwärmen und wo zukünftige weitere Hotspots verortet sein werden. Die Gebiete der Kaltluftentstehung und Kaltluftabflüsse nehmen aufgrund der verdichteten Stadt und des Klimawandels eine größere Bedeutung ein und sind zu schützen und zu erweitern.

Die Szenarienanalyse dient als Grundlageninformation, um in Zukunft planerische Ansätze einordnen zu können, Empfehlungen aus stadtklimatischer Sicht zu geben und somit eine klimabewusste Entwicklung zu etablieren. Maßnahmen zur Klimaanpassung tragen zur Resilienz Erfurts gegenüber einem sich wandelnden Stadtklima bei. Speziell der Trend zu einer Verschiebung der extremen Wetterlagen führt zu einer Prioritätenverschiebung hinsichtlich der planerischen Abwägung von Flächennutzung und Klimawirkung. Belüftungsflächen für Kalt- und Frischluft nehmen an Bedeutung zu, sowohl für die thermische als auch für die lufthygienische Situation in Erfurt.

## 12. Literatur

Baugesetzbuch (BauGB):

Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), zul. geändert 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474).

Baumüller, J., Hoffmann, U., Reuter, U. 1995:

Städtebauliche Klimafibel, Hinweise für die Bauleitplanung Folge 2. Stuttgart: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.

BMVBS/BBSR 2013:

Wie kann Regionalplanung zur Anpassung an den Klimawandel beitragen?

Ergebnisbericht des Modellvorhabens der Raumordnung

"Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel" (KlimaMORO), Forschungen Heft 157

BMVBS 2013:

Bewertung und Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen. Leitfaden zur Entscheidungsunterstützung bei der urbanen Klimaanpassung. BMVBS-Online-Publikation 11/2013

Brandenburg C., Matzarakis, A., 2007:

Das thermische Empfinden von Touristen und Einwohnern der Region Neusiedler See.

In: Matzarakis, A., Mayer, H. (Eds.), Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET. Ber.

Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 16, 67-72.

Gibbs, W. M., J. V. Maher. 1967:

Rainfall deciles as drought indicators. Australia. Bureau of Meteorology, Bulletin no. 48. Melbourne.

Häckel H. 1985:

Meteorologie. UTB – Ulmer, Stuttgart.

Hupfer P., Kuttler, W. 1998:

Witterung und Klima B.G. Teubner Stuttgart.

Höppe, P. 1999:

The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. J. Biometeorol. 43, 71-75.

IPCC 2007:

Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Uk, 976pp.

Katzschner, L. 2004:

Beitrag der Stadtklimatologie zu den Zielen einer neuen Urbanität UVP Report, Nr. 1/2004, Hamm.



- Katzschner, L.; Katzschner, A.; Kupsi, S. 2010:  
Abschlussbericht des BMBF Verbundprojekts KLIMES. Teilvorhaben Planerische  
Bewertung der kleinräumigen Stadtklimaanalyse zur Umsetzung der Maßnahmen  
„Anpassung an Klimaextreme“, Universität Kassel.
- Katzschner, L 2011:  
Urban Climate Strategies Against Future Heat Stress Conditions. Resilient Cities:  
Cities and Adaptation to Climate Change. Proceedings of the Global Forum 2010. K.  
Otto-Zimmermann. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer: 79-89.
- Klimaanalyse Erfurt 1993:  
Klimaanalyse Erfurt 1993 – Abschlussbericht, Taraxacum / GhK – AG Luft
- Kuttler, W. 2011:  
Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate change in urban areas,  
Part 1, Effects. In: Environmental Sciences Europe (ESEU), Springer open, DOI:  
10.1186/2190-4715-23-11, S. 1-12.
- Lohmeyer, A. 2008:  
Klimafunktions- und Klimaplanungskarten, Lohmeyer Aktuell, 20/2008, Karlsruhe.
- Luftreinhalteplan Erfurt 1995:  
Teil 1, Klima Immissionskataster, Min. Landwirtsch., Naturschutz und Umwelt des  
Freistaates Thüringen, Erfurt.
- Mayer, H., Beckröge, W., Matzarakis, A. 1994:  
Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report 5/94, S. 265-268
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen (ehem. MUNLV NRW) 2010:  
Handbuch Stadtklima– Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und  
Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf.
- Müller, Kuttler, Düttemeyer und Barlag 2011:  
Messung und Modellierung zur Verbesserung des Stadtklimas – Untersuchungen der  
Modellstadt Oberhausen. Universität Duisburg, [www.dynaklim.de](http://www.dynaklim.de)
- Oke, T. R. 2006:  
Boundary layer climates. Routledge. London. New York.
- Robel F., Hoffmann U., Riekert A., 1978:  
Daten und Aussagen zum Stadtklima von Stuttgart auf der Grundlage der Infrarot  
Thermographie Beiträge zur Stadtentwicklung Nr. 15, Landeshauptstadt Stuttgart.
- TA Luft 2002:  
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz  
(Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) vom 24.07.2002 (GMBL. S. 511).
- Sozialministerium Baden Württemberg 2004:  
Gesundheitliche Auswirkungen der Hitzewelle im August 2003. Stuttgart
- UBA (Umweltbundesamt) 2005:  
Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien  
klimasensitiver Systeme

VDI 2008:

Richtlinie 3785 Blatt 1 Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

VDI 2012:

Richtlinie 3786, Blatt 2 Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen – Wind

VDI 2012:

Richtlinie 3786, Blatt 3 Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen – Lufttemperatur

VDI 2015:

Richtlinie 3787 Blatt 1 Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

VDI 2008:

Richtlinie 3787 Blatt 2 Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.