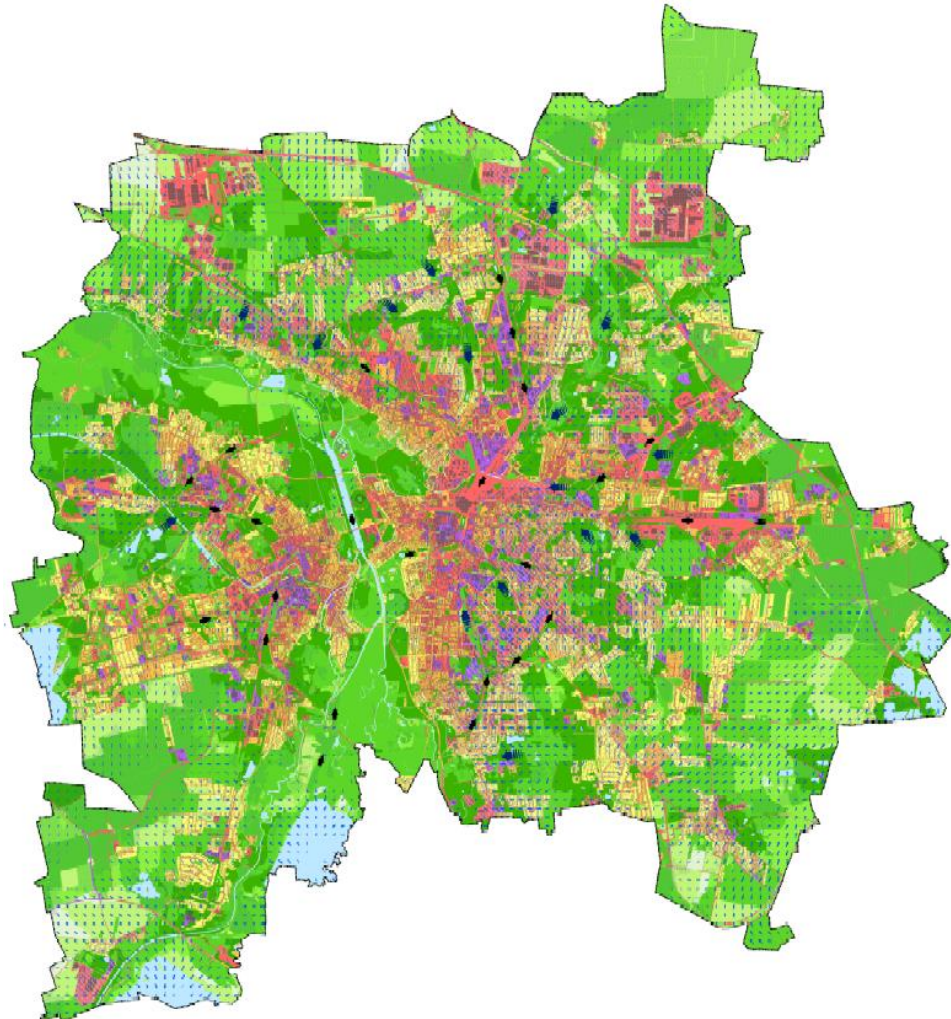




Stadtklimaanalyse Leipzig 2019



Abschlussbericht (Phase I)

Vorgelegt von:

Josephine Förster & Cornelia Burmeister
GEO-NET-Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover

Amt für Umweltschutz, Stadtplanungsamt



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	III
Glossar	IV
Zusammenfassung	7
1 Stadtklimatische Untersuchung: Fachliche Grundlagen	8
1.1 Der Wärmeinseleffekt	8
1.2 Untersuchungsgebiet	9
1.3 Bisherige Klimastudien	10
2 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	16
2.1 Gewählter Analyseansatz	16
2.2 Betrachtete Wetterlage	16
2.3 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	17
2.4 Grundlagen meso- und mikroskaliger Modelle	18
2.5 Eingangsdaten	19
3 Erläuterung der Modellergebnisse ausgewählter Parameter	25
3.1 Nächtliches Temperaturfeld	25
3.2 Kaltluftströmungsfeld	29
3.3 Kaltluftvolumenstrom	32
3.4 Thermische Belastung am Tage	35
4 Klimaanalysekarten	38
4.1 Nachtsituation	38
4.1.1 Bioklimatische Belastung in den Siedlungs- und Gewerbeflächen	38
4.1.2 Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen	39
4.2 Tagsituation	40
5 Planungshinweiskarte	41
5.1 Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen (Wirkungsraum)	41
5.1.1 Bewertung der Nachtsituation	41
5.1.2 Bewertung der Tagsituation	42
5.2 Bewertung der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	42
5.2.1 Bewertung der Grünflächen in der Nacht	43
5.2.2 Bewertung der Grünflächen am Tage	44
5.3 Verknüpfung der Planungshinweiskarten Tag und Nacht zu einer gesamten Karte	45
5.4 Ergebnisse	46
5.4.1 Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	46
5.4.2 Siedlungsraum (Wirkungsraum)	47
5.4.3 Verkehrswege und Plätze (Wirkungsraum)	49
5.4.4 Kaltlufthaushalt	49
Literaturverzeichnis	51
Anhang	53



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze Flurwind	8
Abbildung 2: Das Untersuchungs- bzw. Modellrechengebiet für die Stadtklimaanalyse Leipzig (Hintergrundkarte: DOP 2015)	10
Abbildung 3: Relative Häufigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit [in % der Jahresstunden] in Leipzig/Halle(2009/2015, links) und Leipzig-Holzhausen (2006/2015, rechts); Quelle: Behrens & Hoffmann (2016)	11
Abbildung 4: Vergleich der nächtlichen Lufttemperatur zwischen einer Profilmessfahrt (links, Behrens & Hoffmann 2016) und den Modellierungsergebnissen FITNAH 3D (rechts)	12
Abbildung 5: Klassifizierte Thermalkarte der Stadtklimauntersuchung Leipzig 2010 (Steinicke & Streifeneder 2010)	13
Abbildung 6: Modellierte Windgeschwindigkeiten: Vergleich zwischen FITNAH 3D (links) und KLAM_21 (rechts)	15
Abbildung 7: Modellierter Kaltluftvolumenstrom: Vergleich zwischen FITNAH 3D (links) und KLAM_21 (rechts)	15
Abbildung 8: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen.....	17
Abbildung 9: Digitales Geländemodell für das Stadtgebiet von Leipzig	19
Abbildung 10: Klassifizierung der Landnutzung für das Stadtgebiet von Leipzig.....	22
Abbildung 11: Vorgehensweise zur Erfassung der finalen, rasterbasierten Strukturhöhe	23
Abbildung 12: Arbeitsschritte zur Identifikation von Baumstandorten anhand von NDVI-Werten und Strukturhöhen	24
Abbildung 13: Lufttemperatur (°C) in 2 m ü. Grund um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet von Leipzig.....	26
Abbildung 14: Nächtliche Lufttemperaturen (°C) in vier verschiedenen Wohngebieten Leipzigs	27
Abbildung 15: Nächtliche Lufttemperaturen (°C) von vier verschiedenen Grünarealen in Leipzig	28
Abbildung 16: Bodennahes Windfeld (2 m ü. Grund) um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet von Leipzig.....	29
Abbildung 17: Ausgewählte lokale Strömungssysteme im Nordwesten von Leipzig	30
Abbildung 18: Strömungsfeld in einem Ausschnitt südlich des Bayerischen Bahnhofs (Legende zur Windgeschwindigkeit s. vorherige Abbildungen).....	31
Abbildung 19: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom	32
Abbildung 20: Kaltluftvolumenstrom um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet von Leipzig	33
Abbildung 21: Kaltluftvolumenstrom um 4 Uhr nachts im Zentrum von Leipzig	34
Abbildung 22: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in 1,1 m ü. Grund um 14 Uhr im Stadtgebiet von Leipzig	36
Abbildung 23: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in 1,1 m ü. Grund um 14 Uhr nordwestlich der Leipziger Innenstadt	37
Abbildung 24: Planungshinweiskarte: Bewertung des Siedlungsraumes (Nachtsituation)	41
Abbildung 25: Planungshinweiskarte: Bewertung des Siedlungsraumes (Tagsituation)	42
Abbildung 26: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht	43
Abbildung 27: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage	44
Abbildung 28: Grün- und Freiflächen in der Planungshinweiskarte: Beschreibung der Klassen und Flächenanteile	47
Abbildung 29: Siedlungsraum in der Planungshinweiskarte: Beschreibung der Klassen und Flächenanteile	48
Abbildung 30: Verkehrswege und Plätze in der Planungshinweiskarte: Beschreibung der Klassen und Flächenanteile	49



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung	20
Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der Nutzungsklassen des Stadtklimamodells FITNAH-3D	21
Tabelle 3: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 3787, Blatt 2 11/2008)	35
Tabelle 4: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerberaum (einschließlich Verkehrswege und Plätze)	38
Tabelle 5: Flächenanteile der Wärmebelastung am Tage im Siedlungsraum und auf den Grün- und Freiflächen	40
Tabelle 6: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Grünflächen	45
Tabelle 7: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Gewerbe- und Verkehrsflächen	46
Tabelle 8: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Siedlungsflächen	46

Abkürzungsverzeichnis

CIR	Colored InfraRed
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOP	Digitales Orthophoto
DWD	Deutscher Wetterdienst
FITNAH 3D	Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat sources
GIS	Geografische Informationssysteme
KAK	Klimaanalysekarte
KLAM 21	Kaltluftabflussmodell
KVS	Kaltluftvolumenstrom
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PET	Physiologisch Äquivalente Temperatur
PHK	Planungshinweiskarte
SODAR	Sound / Sonic Detecting And Ranging



Glossar

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

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

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

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

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

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht.



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

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

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

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

Kaltluftvolumenstrom (KVS): Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow *Kaltluft* in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer \rightarrow *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das \rightarrow *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht. In dieser Arbeit ist der betrachtete Querschnitt die Breite der Gitterzellen des Modellrasters (10 m).

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

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

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

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

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

Planungshinweiskarte (PHK): Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (\rightarrow *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als \rightarrow *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

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

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

SODAR (Sound / Sonic Detecting And Ranging): Hierbei handelt es sich um ein akustisches Fernmessverfahren, bei dem hörbare Schallimpulse gebündelt in die Atmosphäre abgestrahlt werden. Mit diesem



Verfahren können Windrichtung und Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Höhen berechnet werden.

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

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

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

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

Synoptischer Wind: Synoptische Winde werden nach der Größenordnung der Luftbewegungen eingeteilt. Der Begriff bezeichnet alle Winde bis auf den → *geostrophischen Wind*. Unter synoptischen Winden wird der großräumige Wind verstanden, der über längere Zeiträume anhält.

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



Zusammenfassung

Die aktuelle Stadtklimaanalyse für Leipzig schreibt die bisherigen Untersuchungen verschiedener Methoden der Jahre 1997, 2010 und 2014/15 fort (vgl. Kapitel 1.3) und konzentriert sich auf den thermischen Wirkkomplex. Das verwendete 10 m x 10 m-Raster entspricht einem mikroskaligen Ansatz und erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Zusammen mit der kleinräumigen Erfassung von Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld getroffen werden (vgl. Kapitel 2.1 und 2.5). Der Maßstabsbereich erlaubt es, Aussagen für die Ebene der Flächennutzungsplanung zu treffen.

Vor dem Hintergrund des bereits eingesetzten Klimawandels ist es essentiell aktuelle und hoch aufgelöste Grundlagen für die Bewertung des Stadtklimas zur Verfügung zu haben, mit denen die aktuellen Wärmeinseln identifiziert werden können, die unter fortschreitendem Klimawandel eine noch stärkere thermische Belastung erfahren werden. Für eine vorausschauende und nachhaltige Stadtplanung ist es wichtig, die heutige Bebauung, die größtenteils mehrere Jahrzehnte in ihrem Ausmaß und Ausgestaltung bestehen bleibt, so umzusetzen, dass keine Beeinträchtigung der bereits bestehenden Stadtstrukturen erfolgt und dass es zu keiner weiteren mikroklimatischen Verschlechterung kommt.

Mittels des Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation berechnet (vgl. Kapitel 3). Der Simulation liegt eine durchschnittliche sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel, vgl. Kapitel 2.2). Zur Innwertsetzung und Erstellung der Planungshinweiskarte wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen.

Die Klimaanalysekarten (vgl. Kapitel 4) spiegeln die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen für das gesamte Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulichen die Auswirkungen der strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeinseleffekt, bilden die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab und identifizieren 11 für die Durchströmung des Stadtgebiets besonders wichtige Kaltluftleitbahn-Prozessräume. Die Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 5) quantifiziert die Belastung in den Siedlungsflächen (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume im Stadtgebiet Leipzigs. In der Nacht ist ein erholsamer Schlaf von besonderer Bedeutung, sodass in der Bewertung der Wohngebiete die Nachtsituation etwas stärker gewichtet wird als die Tagsituation. Auf unbewohnten Flächen, wie in Gewerbegebieten und im Straßenraum, ist die Aufenthaltsqualität im Freien maßgeblicher für die Bewertung.

In der Stadt Leipzig gibt es Grünflächen, die eine sehr wichtige Rolle für den nächtlichen Kaltlufthaushalt spielen, gleichzeitig eine hohe Aufenthaltsqualität am Tage haben und sich in fußläufiger Erreichbarkeit zu wärmebelasteten Siedlungsflächen befinden. Unter den Grünflächen machen diese 27,2 % der Fläche aus. Beispiele sind u. a. der Friedenspark, der Lene-Voigt-Park, der Johannapark und der Leipziger Auwald. Fast jede zweite Grünfläche erfüllt immer noch eine hohe Funktionalität, dagegen machen Grünflächen mit einer sehr geringen Funktionalität nur 1,2 % der Ausgleichsräume aus. Knapp ein Zehntel der Siedlungsflächen sind durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. Dazu zählen einige Zentrumsbauten in der Innenstadt (Höfe am Brühl, Mädler Passage) und das Gewerbegebiet zwischen Berliner Straße, Theresienstraße und Gleisbett. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und/oder eine mangelnde Verschattung. Es ist also nicht allein die Innenstadt von einer sehr ungünstigen thermischen Situation betroffen. Dem stehen über ein Drittel der Leipziger Siedlungsflächen gegenüber, die durch eine günstige thermische Situation gekennzeichnet sind. Beispiele hierfür sind die Einzel- und Reihenhaussiedlungen in den Ortsteilen Leutzsch, Mockau, Großwiederitzsch und Meusdorf. Eine lockere Bebauung begünstigt zum einen die nächtliche Durchlüftung und sorgt mit einem hohen Grün-(insbesondere Baum-) anteil für ein thermisches Wohlbefinden am Tag (vgl. Kapitel 5.4).

Aus den bisherigen Ergebnissen der Stadtklimaanalyse kann festgehalten werden, dass es in Leipzig thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt, deren bioklimatische Situation, insbesondere durch die stetige Zunahme der Hitzebelastung durch die Folgen des Klimawandels, mindestens erhalten, möglichst



durch geeignete Maßnahmen verbessert werden sollte. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Kaltluftleitbahnen – deren Funktion durch Bebauung nicht eingeschränkt werden sollte – bzw. kleinräumige Ausgleichsströmungen durchströmt, doch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtkerns ab und fällt in der Innenstadt nur noch gering aus bzw. ist teilweise nicht mehr gegeben. Eine ausreichende Belüftung kann nicht nur die thermische Belastung mildern, sondern sich auch positiv auf, die in dieser Untersuchung nicht näher betrachtete, Luftqualität auswirken. Entsprechend sollten der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen. Wo diese jedoch aufgrund der Baustruktur oder Orographie nicht mehr wirksam werden können, sind gezielt Maßnahmen zu entwickeln, die die Überwärmung im Gebiet reduzieren. Im Vordergrund stehen dabei Baumpflanzungen.

1 Stadtklimatische Untersuchung: Fachliche Grundlagen

1.1 Der Wärmeinseleffekt

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als *Städtische Wärmeinsel* bezeichnet (Oke et al. 2017).

Solch belastende Situationen entstehen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt (autochthone Wetterlagen). Durch lokal unterschiedliche Abkühlungsraten entstehen Temperatur- und damit Dichteunterschiede, die Ausgleichsströmungen hervorrufen (Flurwinde; Abbildung 1).

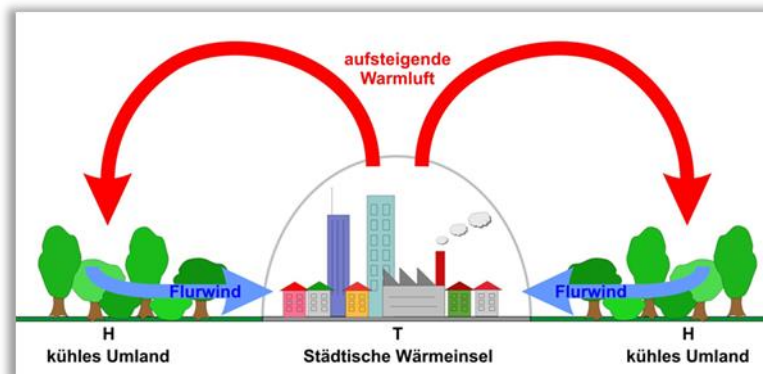


Abbildung 1: Prinzipskizze Flurwind

Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen in Form eines bodennahen Zuströmens von Luft aus dem Umland über gering bebaute Flächen hin zum Stadtgebiet auf. Das Aufsteigen von Warmluftblasen verursacht zusätzlich eine Böigkeit der bodennah nachströmenden Luft, sodass die Ausgleichsströmungen am Tage weniger sensibel auf Strömungshindernisse reagieren als in der Nacht. Während der Tagsituation führen sie aufgrund eines meist ähnlichen Temperaturniveaus im Umland nicht zum Abbau von Wärmebelastungen in den Siedlungsflächen, tragen aber zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht und damit zur Verdünnung von Luftschadstoffen bei.

In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen dagegen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine



ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld. Während der nächtlichen Abkühlung fließt kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und ggf. innerstädtischen Grün- bzw. Freiflächen in das wärmere Stadtgebiet ein. Da der bodennahe Zustrom mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, kann dieser Luftaustausch nur entlang von Flächen ohne blockierende Strömungshindernisse erfolgen, insb. über sogenannte Kaltluftleitbahnen.

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme, kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo¹, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012; Malberg 1985; Oke et al. 2017). Aufgrund der starken Versiegelung und geringeren Wasserverfügbarkeit ist der Energieverbrauch zur Verdunstung herabgesetzt, sodass der latente Wärmestrom in der Stadt geringer, der fühlbare Wärmetransport dagegen höher ausfällt. Beide Aspekte haben höhere Temperaturen des Stadtgebiets im Vergleich zum Umland zur Folge (Schönwiese 2013), sodass die Bevölkerung nachts einer größeren thermischen Belastung ausgesetzt ist.

Verkehr, Industrie und Heizungen bewirken nicht nur einen anthropogenen Wärmefluss, sondern führen auch zu vermehrten Emissionen. Entsprechend weist die Luft in der Stadt erhöhte Verunreinigungen durch Schadstoffe und Staub auf, die sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken können. Da die Windgeschwindigkeiten in der Stadt in der Regel herabgesetzt sind, kann kein ausreichender Luftaustausch stattfinden, um die Luftqualität merklich zu verbessern (Kuttler 2009). Vor allem bei wind-schwachen Hochdruckwetterlagen ist das oftmals ein Problem in der Stadt. Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas, insb. da ein Großteil der Bevölkerung in Städten wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

1.2 Untersuchungsgebiet

Das Stadtgebiet Leipzigs erstreckt sich über eine Fläche von 297,8 km² (Statistisches Landesamt Sachsen 2019). Um die im Umland gelegenen Strukturen mit Einfluss auf das Leipziger Stadtklima zu erfassen, spannt das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet (Abbildung 2) eine Fläche von ca. 515 km² auf. In Ost-West-Richtung beträgt die Ausdehnung etwa 22,6 km, in Nord-Süd-Richtung ungefähr 22,8 km. Bei einer Rasterauflösung von 10 m ergeben sich daraus insgesamt 5.157.185 Rasterzellen. Die vertikale Auflösung ist im bodennahen Bereich höher und nimmt mit zunehmender Höhe ab. Folgende Höhenlevel sind in FITNAH hinterlegt: 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 15 m, 20m, 40 m, 70 m, 100 m, 150 m, 200 m, 300 m, 400 m, 600 m, 800 m, 1000 m, 1400 m und 2000 m.

Für jede Rasterzelle liegen flächendeckend Modelleingangsdaten (vgl. Kapitel 2.5) sowie Ergebnisdaten (vgl. Kapitel 3) vor. Trotz der rechteckigen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes wird in den nachfolgenden Karten nur der Ausschnitt des Leipziger Stadtgebiets dargestellt.

¹ Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

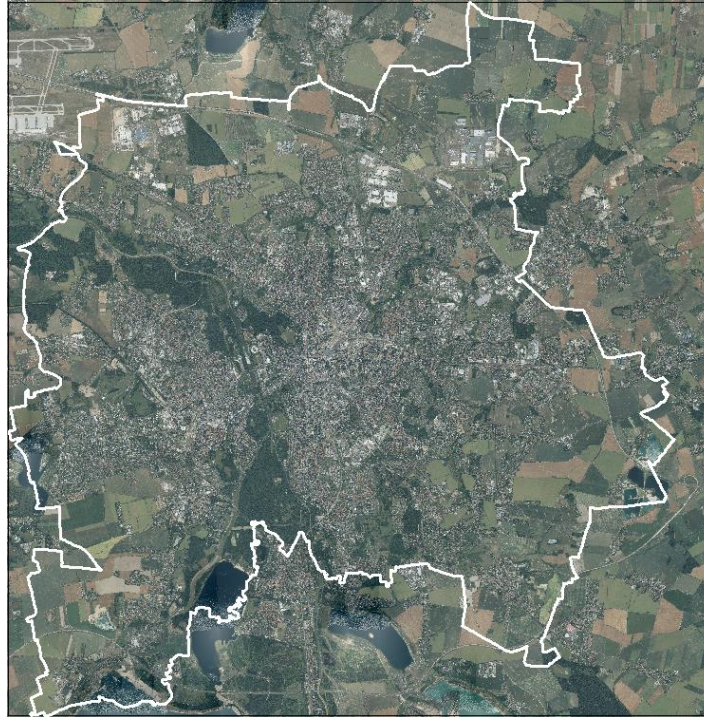


Abbildung 2: Das Untersuchungs- bzw. Modellrechengebiet für die Stadtklimaanalyse Leipzig (Hintergrundkarte: DOP 2015)

1.3 Bisherige Klimastudien

Das Klima charakterisiert gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt – so wurde z. B. die für die langjährige Klimaentwicklung angegebene internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt (DWD; WMO 1996). Bisherige Klimauntersuchungen für das Leipziger Stadtgebiet basieren vorrangig auf Luft- und Oberflächentemperaturmessungen sowie Windmessungen (Behrens & Hoffmann 2016, Steinicke & Streifeneder 1997, 2010), aber auch eine Kaltluftmodellierung mit dem Modell KLAM_21 liegt für Leipzig und seine Umgebung vor (DWD 2017).

Langjährige Messreihen seit den 1970er Jahren wurden von Behrens & Hoffmann (2016) ausgewertet und zeigen u. a. eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur. Auswertungen längerer Datenreihen, beispielsweise an den Stationen Leipzig/Halle und Leipzig Holzhausen verdeutlichen, dass allgemein südwestliche und westliche Winde vorherrschen. Bevorzugte Windrichtungen decken den Bereich von 180 ° bis 240 ° ab. Am seltensten treten Strömungen aus nördlicher Richtung auf (Abbildung 3).

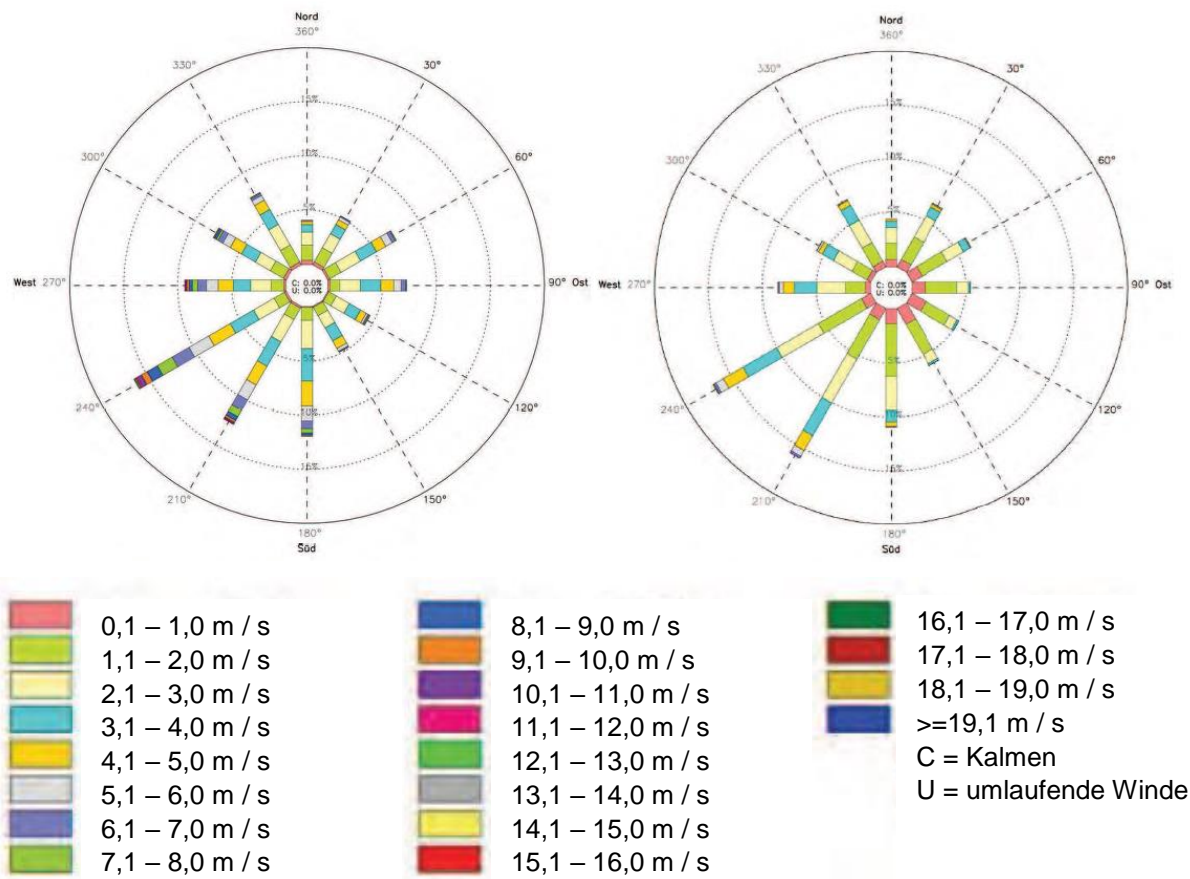


Abbildung 3: Relative Häufigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit [in % der Jahresstunden] in Leipzig/Halle(2009/2015, links) und Leipzig-Holzhausen (2006/2015, rechts); Quelle: Behrens & Hoffmann (2016)

Temporäre Messungen an verschiedenen Stationen Leipzigs haben ergeben, dass die Hauptwindrichtungen auch stark durch die lokale Orographie bzw. Rauigkeiten der Stationsumgebung und Topografie determiniert werden. Um jedoch die Ergebnisse dieser umfassenden Studie mit den Ergebnissen der vorliegenden Stadtklimaanalyse vergleichen zu können, muss eine sommerliche, austauscharme Strahlungsnacht betrachtet werden.

Die Analyse von SODAR-Daten lässt vermuten, dass sich während solcher Wetterlagen sehr schwach ausgeprägte Kaltluftströmungen in den Flussniederungen der Weißen Elster, Neuen Luppe und Pleiße einstellen können. Dies kann anhand der vorliegenden Ergebnisse der FITNAH-Simulation nicht bestätigt werden (s. autochthones Strömungsfeld in Kapitel 3.2). Eine Ausnahme stellt der Bereich im Zusammenfluss von Elsterflutbett und Pleiße dar: Von dort aus sind tatsächlich Kaltluftströmungen bis hinein ins Zentrum-Süd zu beobachten. Ansonsten stellen, wie bereits von Behrens & Hoffmann (2016) festgestellt, ein leichter Geländeanstieg von den Niederungs- und Auenbereichen zur Innenstadt und die Bebauung selbst, Barrieren für die Kaltluftströmung dar. An den anderen beiden SODAR-Standorten, dem Leipziger Hauptbahnhof und dem MDR-Gelände, konnten durch ungünstige Witterungsbedingungen keine entsprechenden Kaltluftströmungen gemessen werden. Auch das von FITNAH 3D modellierte Strömungsfeld zeigt am Hauptbahnhof keine ausgeprägte Strömung, da die umgebenden Baukörper die vorherrschenden Winde (z. B. aus Südosten) bereits stark ausbremsen. Im Gegensatz zu den Messungen zeigen sich im Bereich des MDR-Geländes jedoch in der FITNAH-Simulation bodennahe Kaltluftströmungen von über 0,3 m/s, welche sowohl thermisch als auch orographisch angetrieben werden. Die Brachfläche im Bereich des MDR-Geländes ist relativ hindernisarm, sodass bereits geringe Höhen- und Temperaturunterschiede ausreichen, um ein entsprechendes Strömungssystem auszubilden.

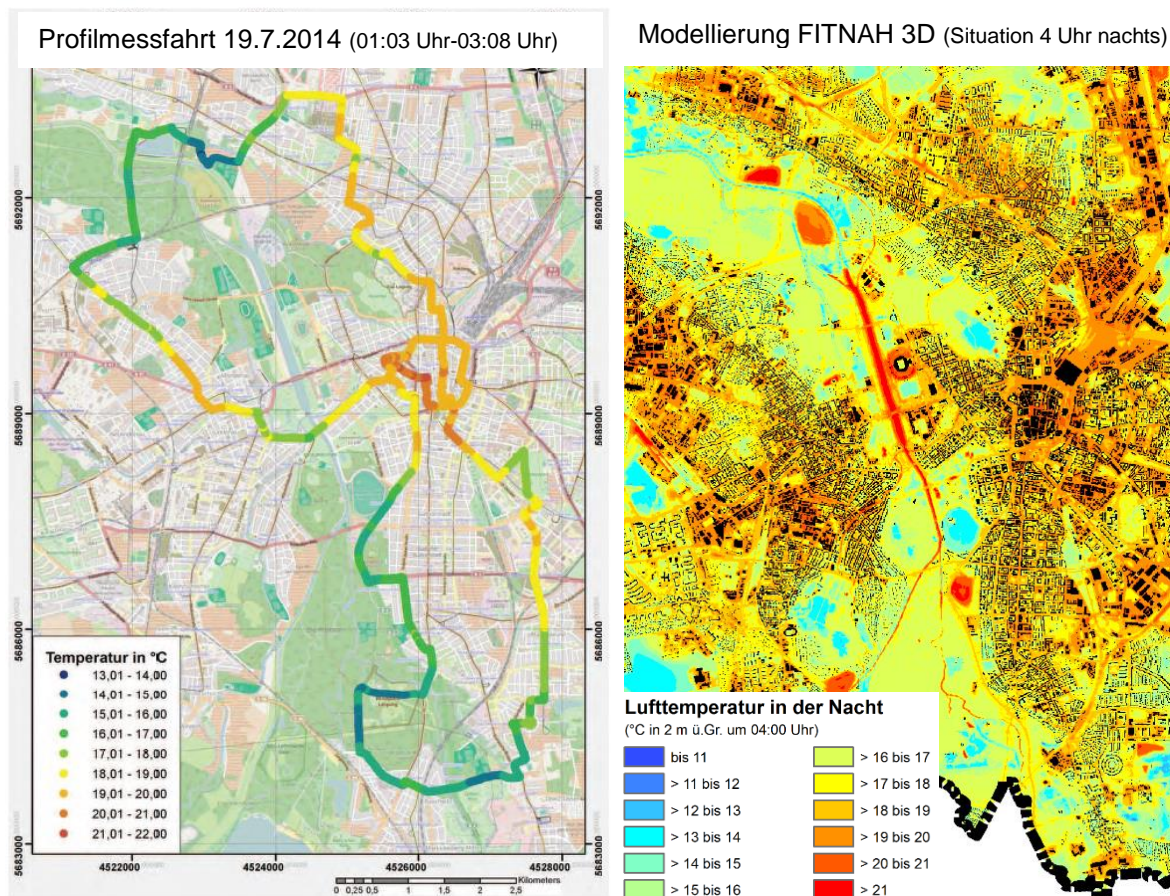


Abbildung 4: Vergleich der nächtlichen Lufttemperatur zwischen einer Profilmessfahrt (links, Behrens & Hoffmann 2016) und den Modellierungsergebnissen FITNAH 3D (rechts)

Des Weiteren wurden Temperaturmessfahrten von Behrens & Hoffmann 2016 durchgeführt. In der Abbildung 4 wird eine nächtliche Profilmessfahrt mit den Ergebnissen aus FITNAH verglichen. Die Profilmessfahrt wurde während einer austauscharmen Strahlungswetterlage am 19.7. zwischen 1:03 Uhr und 3:08 Uhr nachts durchgeführt (Behrens & Hoffmann 2016), sodass näherungsweise eine Vergleichbarkeit mit der FITNAH-Modellierung (Situation 4 Uhr nachts) gegeben ist. Es werden jedoch nicht die absoluten Werte miteinander verglichen, sondern deren Relation zwischen Freiflächen und Siedlungsflächen, da der Zeitpunkt der Messungen nicht mit dem kältesten Zeitpunkt im Modell um 4 Uhr übereinstimmt. Im Rahmen der nächtlichen Profilmessfahrt wurden Temperaturdifferenzen von bis zu 10,7 K innerhalb des Stadtgebiets ermittelt, wobei das Gebiet zwischen Auensee und Am Luppedeich den kältesten Bereich darstellte. Auch in der FITNAH-Modellierung liegt die Spanne zwischen kühleren Grünflächen und wärmeren Siedlungsflächen in dem dargestellten Ausschnitt im Bereich von 10 K. Temperaturen von über 20 °C in der Innenstadt zeigen sowohl die Ergebnisse der Messfahrt als auch die FITNAH-Simulation. Die vergleichende Abbildung 4 demonstriert, dass sich im Hinblick auf die nächtliche Lufttemperatur wiedererkennbare Muster ergeben. Die Straße „Am Luppedeich“ ist mit Temperaturen im Bereich von 13 bis 15 °C sowohl in der Messung als auch im Modell ausgesprochen kühl. Ursache für die niedrigen Temperaturen sind zum einen die von der Deponie Möckern ausgehenden Kaltluftströmungen in Richtung Luppedeich. Zum anderen grenzen südlich vom Luppedeich kaltluftproduzierende Sportplätze an.

Auf der Basis zweier Thermalscannerbefliegungen in der Nacht vom 22. zum 23.9.2010 und weiteren meteorologisch-lufthygienischen Datenreihen wurde die Leipziger Klimafunktionskarte sowie die Bewertungskarte Klima/Luft abgeleitet (Steinicke & Streifeneder 2010). Die mit dieser Arbeit vorliegende Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 4 und 5) ist als Fortschreibung und Detaillierung der Klimaanalyse aus dem Jahr 2010 zu verstehen. Grundsätzlich sind Klimafunktions- und Bewertungskarte aus der Stadtklimaanalyse 2010 geeignet, eine überschlägige Ersteinschätzung zu den Auswirkungen von städtebaulichen Eingriffen auf das thermische Wohlbefinden der Stadtbevölkerung zu



machen. Die Klassifizierte Thermalkarte (Abbildung 5) bildet das nächtliche Abkühlungsverhalten der Oberflächen während einer windschwachen Strahlungswetterlage ab.

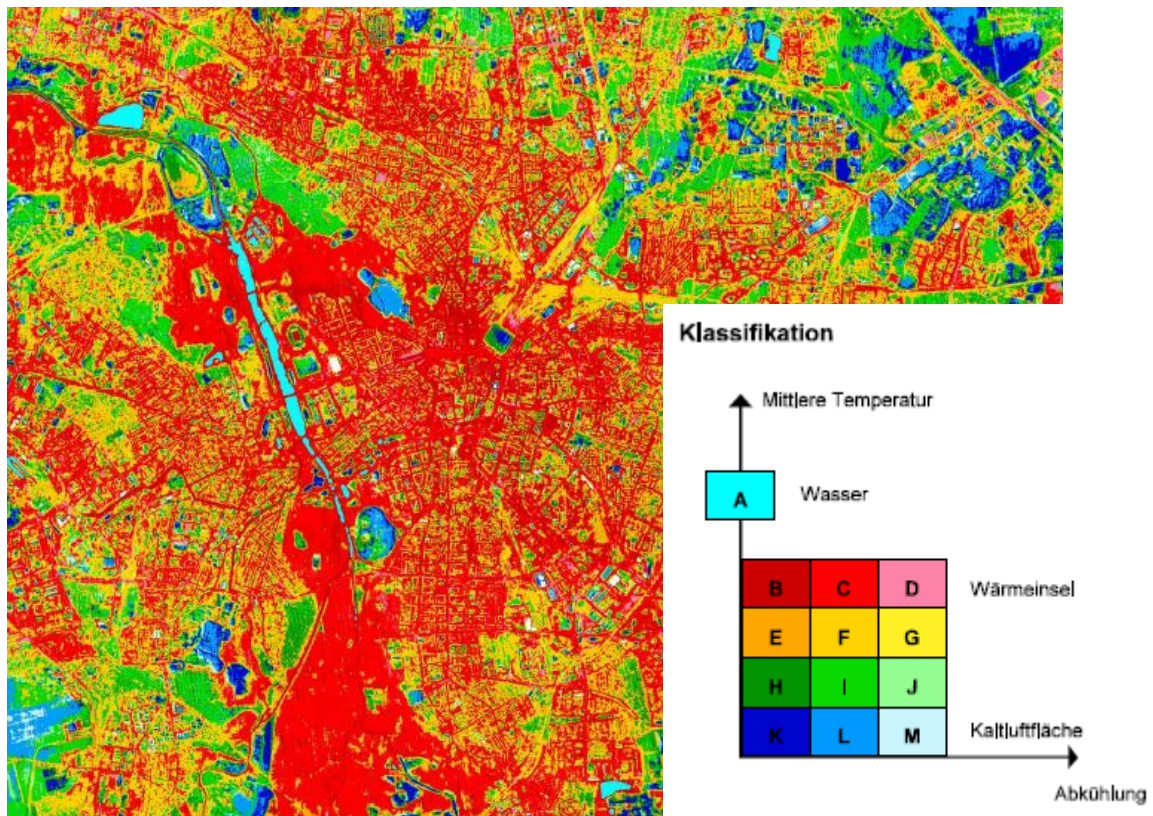


Abbildung 5: Klassifizierte Thermalkarte der Stadtklimauntersuchung Leipzig 2010 (Steinicke & Streifeneder 2010)

Es zeigt sich, dass sich nachts insbesondere die versiegelten Flächen (größtenteils rot) nicht so stark abkühlen und zum nächtlichen Wärmeisoleffekt beitragen. Aber auch Wälder (ebenfalls rot) wirken als Wärmespeicher und bleiben in der Nacht noch relativ warm, sind jedoch keinesfalls mit Wärmeinseln gleichzusetzen. Demgegenüber stehen Ackerflächen als Kaltluftgebiete, welche in der Klassifizierten Thermalkarte in Blau dargestellt sind. Die entsprechenden physikalischen Eigenschaften (z. B. Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherkapazität) verschiedener Oberflächen finden auch im FITNAH-Modell ihre Berücksichtigung (vgl. Abbildung 8 in Kapitel 2.2 und Tabelle 2 in Kapitel 2.5). Auch wenn näherungsweise ein Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und bodennaher Lufttemperatur besteht, ist die Lufttemperatur in 2 m ü. dem Grund (Aufenthaltsbereich des Menschen) deutlich geeigneter, um die thermische Situation einer Stadt zu beschreiben und anschließend zu bewerten. Insofern ist die Aussagekraft der Stadtklimaanalyse 2010 hinsichtlich der thermischen Komponente für die Wirkung auf den Menschen nur begrenzt. So beschränkt sich die Klimafunktionskarte von Steinicke & Streifeneder u. a. auf die Ausweisung von Klimatopen (z. B. intensiver städtischer Überwärmungsbereich, gemäßigt städtischer Überwärmungsbereich, Kaltluftgebiete mit guten bis sehr guten Kaltluftentstehungsbedingungen, etc.). Die Leipziger Strömungsdynamik wurde in Steinicke & Streifeneder (2010) anhand des Reliefs, der Bodenrauigkeit und meteorologischer Daten abgeleitet. Die Klimafunktionskarte zeigt eine Reihe von Luftleitbahnen, welche durch eine geringe Bodenrauigkeit, eine ausreichende Länge und Breite sowie einen verhältnismäßig geradlinigen Verlauf gekennzeichnet sind. Ein Großteil dieser Luftleitbahnen wurde in der neuen Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte als „Ventilationsbahn“ nachrichtlich übernommen.

Die Kaltluftabflusssimulationen mit KLAM_21 liefern erste Modellergebnisse für die Stadt Leipzig und Umgebung (DWD 2017). Mit dem dynamischen Modell KLAM_21 wurde ein 58 km x 68 km großes Untersuchungsgebiet in einer Rasterauflösung von 25 m betrachtet. Die Untersuchung umfasst u. a. eine Quantifizierung der Kaltluftfließgeschwindigkeit und des Kaltluftvolumenstroms.



In der Abbildung 6 sind die modellierten Strömungsgeschwindigkeiten von FITNAH im Vergleich zu KLAM_21 dargestellt. Der Zeitpunkt „8 Stunden nach Sonnenuntergang“ in KLAM_21 kann näherungsweise als 4 Uhr-Situation in FITNAH betrachtet werden. In den Ergebnissen zeigen sich einerseits Gemeinsamkeiten (höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Südosten der Stadt, fehlende Belüftung der Innenstadt), aber auch Unterschiede (z. B. Strömungsmuster im Osten der Stadt). Abweichende Ergebnisse ergeben sich u. a. aufgrund der unterschiedlichen Modellphysik. So handelt es sich bei KLAM_21 lediglich um ein 2D-Modell. Während in FITNAH Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhenstufen berechnet werden (in Abbildung 6 ist die Strömungsgeschwindigkeit von FITNAH in 2 m ü. Grund dargestellt), handelt es sich bei KLAM_21 aufgrund der fehlenden z-Komponente um die mittlere Fließgeschwindigkeit der Kaltluftsäule. Bei entsprechender Bodenrauigkeit fallen die Strömungsgeschwindigkeiten in KLAM_21 somit tendenziell höher aus als im FITNAH-3D modellierten Strömungsfeld in 2 m über dem Grund. Hinzu kommt, dass in FITNAH die thermische Komponente (z. B. Berechnung der Lufttemperatur verschiedenster Bebauungstypen, Grünstrukturen und Verkehrsflächen) sehr detailliert berücksichtigt wird, was bei KLAM_21 jedoch nicht der Fall ist. Somit können thermisch-induzierte Flurwinde in FITNAH sehr genau erfasst werden, während in KLAM_21 die Winde vorrangig durch das Relief determiniert sind. Dies erklärt auch, warum die in FITNAH simulierten Winde im Südosten Leipzigs – hierbei handelt es sich nämlich um thermisch-orographische Winde – stärker ausgeprägt sind als in KLAM_21.

Die Unterschiede im Hinblick auf die Strömungssituation machen sich auch im Kaltluftvolumenstrom (Abbildung 7) bemerkbar. Um die Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, wurde die in KLAM_21 berechnete Kaltluftvolumenstromdichte (in $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$) mit 10 multipliziert und damit in den rasterbasierten² Kaltluftvolumenstrom (in m^3/s) überführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Kaltluftvolumenstrom in KLAM_21 deutlich höhere Werte erreicht als in FITNAH. Zum einen könnte dies mit der Höhenabhängigkeit des Windes zusammenhängen, welcher zwar in FITNAH, aber nicht in KLAM_21 abgebildet wird. Die Auflösung der KLAM_21 Modellierung löst mit 25 m x 25 m (im Gegensatz zur Fitnah-Modellierung mit 10 m x 10 m) nicht mehr Gebäude und Bäume auf und erfasst diese damit als Strömungshindernisse nur sehr grob. Somit wird in KLAM_21 eine deutlich bessere Belüftung der Leipziger Innenstadt berechnet als in FITNAH (vgl. 4 Uhr-Situation in FITNAH mit 8 h nach Sonnenuntergang in KLAM). Weitere Unterschiede sind zum anderen: Es wird die Kaltluftproduktionsrate in KLAM_21 vorgegeben, während sie in FITNAH u. a. auch in Abhängigkeit von Exposition und DGM berechnet wird. Die sich unterscheidenden Auflösungen der Modelleingangsdaten für KLAM_21 und die FITNAH-3D Simulation führen ebenso zu Unterschieden in den Ergebnissen und können nicht eins zu eins verglichen werden. Das Untersuchungsgebiet der KLAM-Modellierung ist deutlich größer und kann den überregionalen Input, insbesondere aus dem Süden, sehr gut abbilden. Das FITNAH-Modellgebiet endet direkt an der südlichen Stadtgrenze und erfasst nicht die direkt anliegenden Kaltluftproduktionsflächen. Der Input an Kaltluft aus dem Süden wird in FITNAH daher möglicherweise unterschätzt.

Die KLAM-Modellierung bietet eine gute Ersteinschätzung für größere Regionen, liefert aber für feingliedrige, städtische Strukturen keine detailgetreuen Aussagen. Demzufolge ist FITNAH-3D besser geeignet, um den Kaltlufthaushalt der Stadt zu beschreiben. Die Ergebnisse der KLAM_21-Modellierung wurden dennoch zum Teil in der in diesem Rahmen erstellten Planungshinweishinweiskarte (vgl. Abbildung 26 in Kapitel 5.2.1) mitberücksichtigt.

² auf ein 10 m-Raster basierend

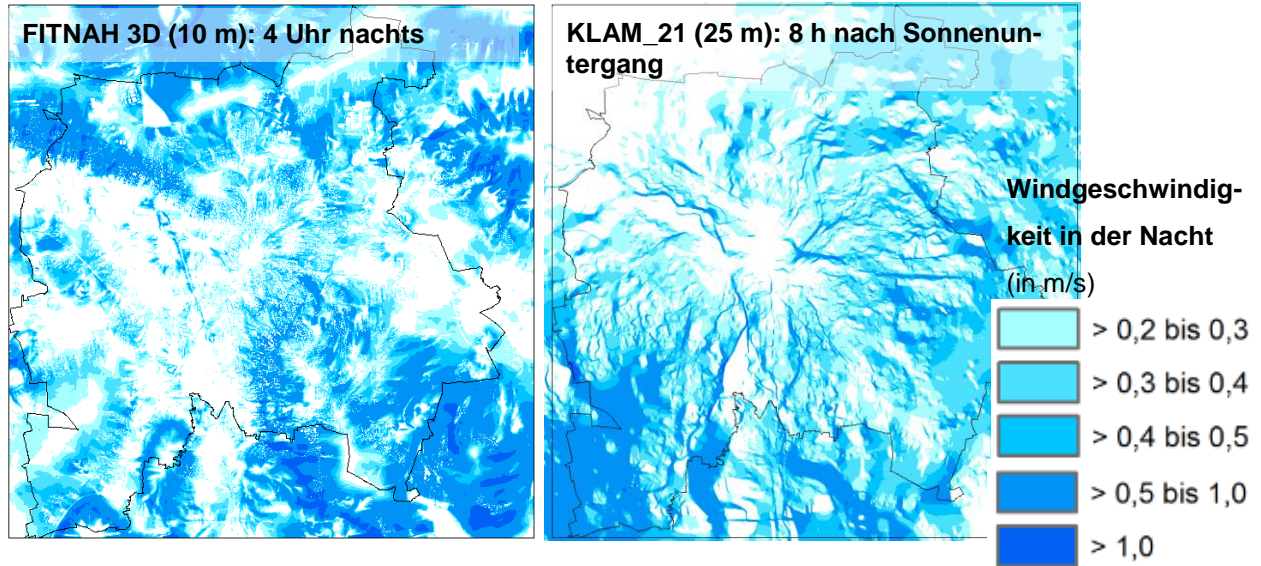


Abbildung 6: Modellierte Windgeschwindigkeiten: Vergleich zwischen FITNAH 3D (links) und KLAM_21 (rechts)

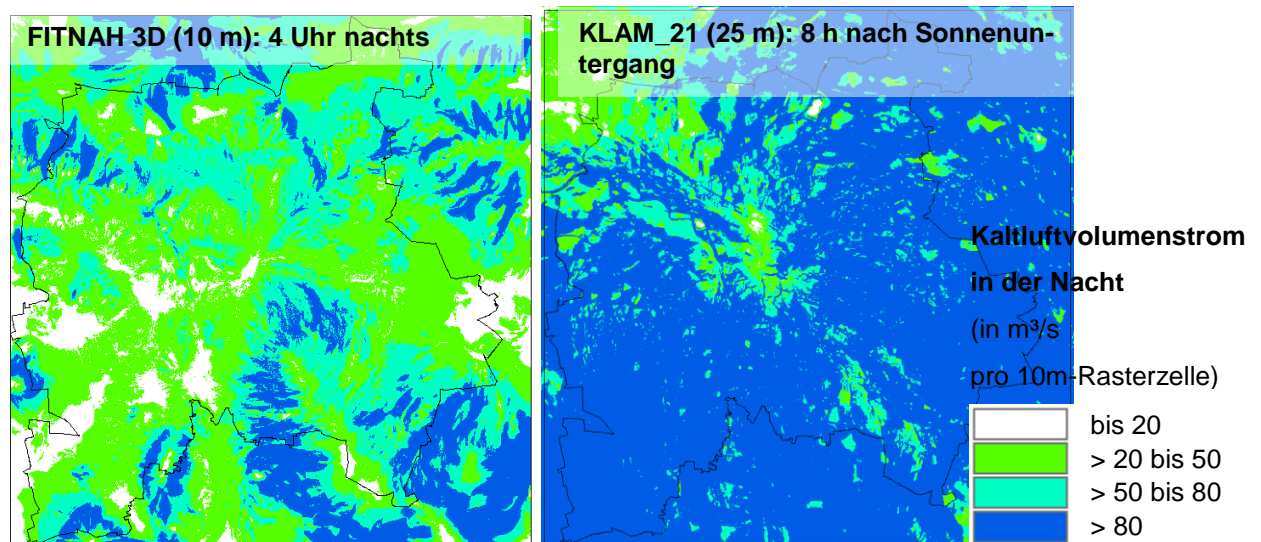


Abbildung 7: Modellierter Kaltluftvolumenstrom: Vergleich zwischen FITNAH 3D (links) und KLAM_21 (rechts)



2 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

2.1 Gewählter Analyseansatz

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas, die dadurch mitbestimmte lufthygienische Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch auf die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Die Stadtklimaanalyse stützt sich auf eine hochaufgelöste gebäudescharfe 10 m-Modellierung für die Stadt Leipzig und berücksichtigt dabei individuelle Grünstrukturen wie Bäume im Stadtgebiet mit ihren Strukturhöhen. Die mit dem Modell FITNAH durchgeführte Klimaanalyse ist methodisch aktueller und liefert eine höhere Auflösung als die bisherigen Untersuchungen. Sie wird den heutigen und kommenden Anforderungen u. a. im Rahmen von Planungsprozessen besser gerecht. Allerdings betrachtet die mit diesem Gutachten vorliegende Klimaanalyse lediglich die thermische Belastung eines durchschnittlichen Sommertages. Eine weitere Verschlechterung der Situation ist bei längeren Hitzeperioden zu erwarten. Diese werden durch die Folgen des Klimawandels stetig in Intensität und Häufigkeit zunehmen.

Die Modellierung erlaubt eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht im Vergleich zum bisher verwendeten Klimatop-Ansatz (Steinicke & Streifeneder 2010) und der Kaltluftabflussmodellierung mit KLAM_21 (DWD 2017). Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider (Klimaanalysekarten; Kapitel 4). Darüber hinaus wird eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (Planungshinweiskarte; Kapitel 5).

Der vorliegende Bericht stellt zunächst die Stadtklimaanalyse dar und geht auf die Methodik der Modellrechnung ein. Nach der Darstellung ausgewählter meteorologischer Parameter wird die Klimaanalysekarte beschrieben. Abschließend wird die Planungshinweiskarte erläutert.

2.2 Betrachtete Wetterlage

Die durchgeführte numerische Simulation mit FITNAH 3D legt eine autochthone Wetterlage zugrunde. Diese wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Entsprechend wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermaßen festgelegt:

- ◆ Lufttemperatur 22 °C über Freiland um 21:00 Uhr
- ◆ Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- ◆ Bedeckungsgrad 0/8
- ◆ Kein überlagernder geostrophischer Wind

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten während der austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitig hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische Belastungsräume ausbilden (Darstellung eines worst case-Szenarios). Charakteristisch für diese (Hochdruck-)Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

Die Ergebnisse der FITNAH-Simulation zeigen die Situation vom 21. Juni (Tagsituation) und 22. Juni (Nachtsituation). Am 21. Juni werden das solare Maximum (Sonnenhöchststand von 62.10° am Mittag) und damit verbunden die minimale Schattenlänge erreicht. In Bezug auf die Strahlungsintensität wurde demnach eine Extremsituation betrachtet. Gleichzeitig ist die Atmosphäre zu Sommerbeginn noch nicht so stark aufgeheizt wie etwa im Juli und August. In der Modellsituation handelt es sich demnach um



einen Fall, der eine durchschnittliche Sommersituation an einem Tag (keine extreme Sommerhitze über mehrere Tage) bei wolkenlosem Himmel repräsentieren soll. Die sich ausprägenden Lufttemperaturen entsprechen einem moderaten sommerlichen Niveau, um eine Situation abzubilden, die verhältnismäßig häufig auftreten kann.

In Abbildung 8 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z. B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien deutlich geringer ist. Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird, sich aber auch tagsüber nicht so stark erwärmen. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

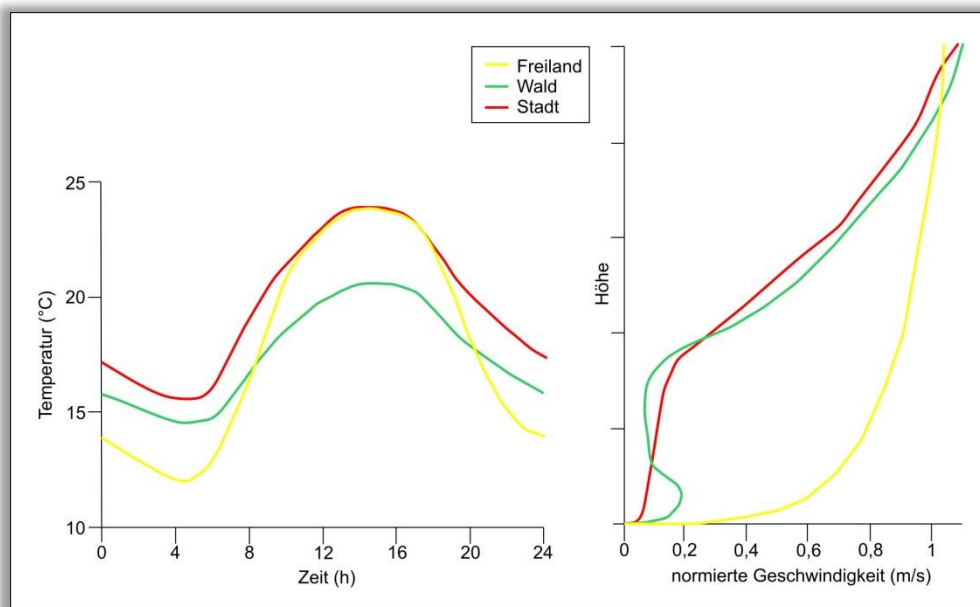


Abbildung 8: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen

2.3 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom DWD für die tägliche Wettervorhersage routinemäßig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen).



Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert (Deutsche Forschungsgemeinschaft 1988). Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen stehen neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien universell einsetzbare Werkzeuge zur Bearbeitung umwelt-meteorologischer Fragestellungen in stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

Sofern ausreichend detaillierte Eingangsdaten zur Verfügung stehen, ist das Modell FITNAH 3D (Gross 1989, 1993, 2002) in der Lage, räumlich hoch aufgelöste Berechnungen in einem 10 x 10 m-Raster durchzuführen und ermöglicht damit mikroskalige Stadtklimaanalysen.

2.4 Grundlagen meso- und mikroskaliger Modelle

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Größen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Stadtklimamodelle wie FITNAH 3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Planungslösungen gefunden werden können.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*).

Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z. B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung stadtklimatisch wichtiger Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 10 m. Die vertikale Gitterweite (z-Richtung) ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).



2.5 Eingangsdaten

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- ◆ Geländedaten (z. B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- ◆ Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Digitales Landschaftsmodell)
- ◆ Strukturhöhe (z. B. Höhe von Gebäuden und Vegetation)
- ◆ Baumstandorte (Vegetationshöhe ≥ 2 m, mind. 60 % Baumkronenanteil pro Rasterzelle)
- ◆ Versiegelungsgrad (Bodenversiegelung durch Gebäude, Straßen, Plätze, Gleise, etc.)

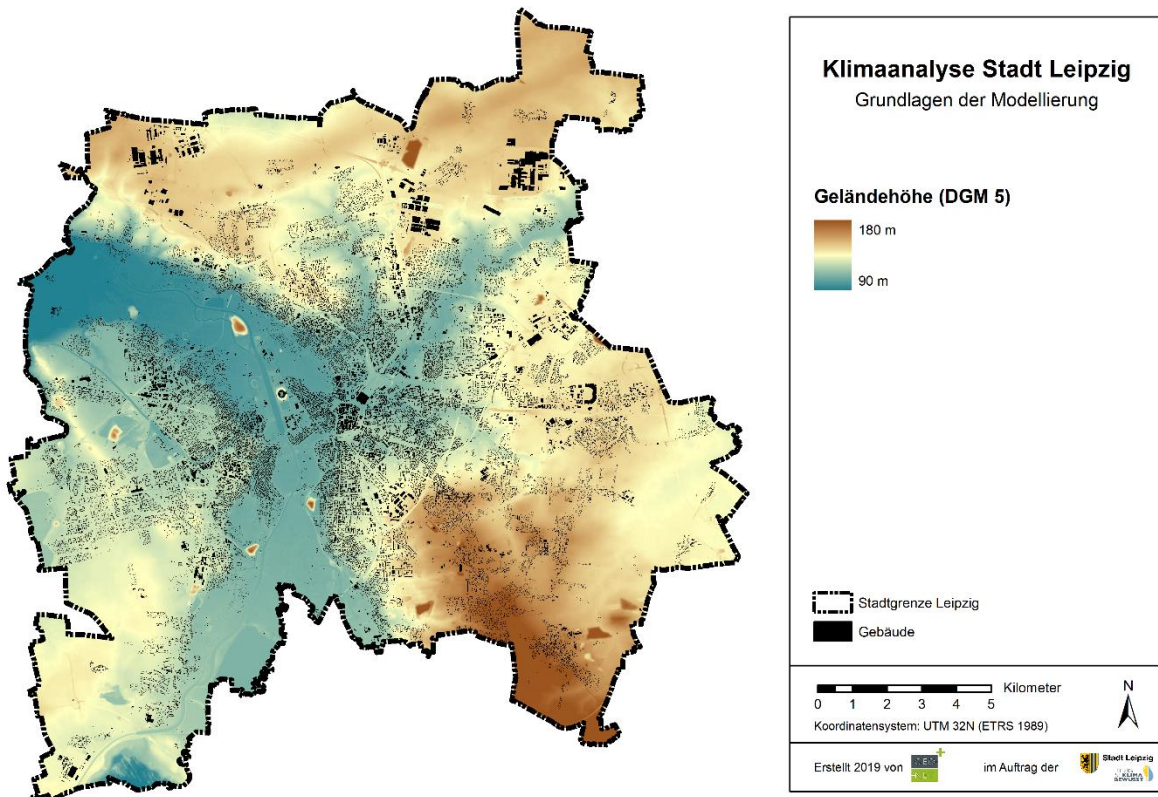


Abbildung 9: Digitales Geländemodell für das Stadtgebiet von Leipzig

Als Grundlage für die Ermittlung der Geländestruktur dient das Digitale Geländemodell (DGM) in 5 m Bodenauflösung aus dem Jahr 2010 (Abbildung 9). Dieses wurde auf eine Auflösung von 10 m gemittelt, um der Auflösung der Modellrechnung zu entsprechen. Die Höhenunterschiede reichen von knapp über 90 m (Leipziger Tieflandsbucht, Zusammenfluss Weiße Elster, Pleiße und Parthe) bis zu 180 m (Deponie Seehausen). Die höheren Bereiche der Stadt liegen im Südosten (höchste Punkte: Monarchenhügel und Galgenberg) und im Norden. Vereinzelt Erhebungen stellen neben der Deponie Seehausen u. a. der Fockeberg, die Deponie Möckern und die Deponie Kleinzschocher dar.

Die Leipziger Landnutzung wird über 16 verschiedene Strukturtypen (Tabelle 1), welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Tabelle 2), beschrieben.



Tabelle 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Strukturtyp	Beschreibung	Versiegelungsgrad
Zentrumsbebauung	Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist.	90 %
Block- und Blockrandbebauung	Vergleichsweise dicht bebaute und häufig auch stark versiegelte Siedlungsfläche. Baustrukturell ist sie meist durch geschlossene Blockinnenhöfe geprägt. Sie umfasst sowohl Vorkriegs- als auch Nachkriegsbauten.	25 - 78 %
Industrie- und Gewerbefläche	Sie weist einen ähnlich hohen Versiegelungsgrad wie die Zentrumsbebauung auf, gleichzeitig ist der versiegelte Flächenanteil oft größer als der mit Gebäuden bestandene.	85 %
Zeilen- und Hochhausbebauung	Zu diesem Flächentyp zählen sowohl freistehende Punkthochhäuser als auch halboffene Blockrandbebauung und Zeilenbebauung. Gemeinsames Merkmal ist ein relativ hoher Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt.	25 %
Einzel- und Reihenhausbebauung	Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbebauung und einer Zeilenbebauung ist fließend.	20 %
Straßenraum	Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.	95 %
Gleisfläche	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe.	25 %
Baulich geprägte Grünfläche	Unter diesem Flächentyp sind vegetationsgeprägte Flächen zusammengefasst, welche zugleich auch einen gewissen Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen) und/oder Bebauung aufweisen. Dazu zählen z. B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze. Es überwiegt aber letztlich die Eigenschaft als Grünfläche.	25 %
Freiland	Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.	5 %
Gehölz	Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün.	5 %
Wald (3 Typen)	Waldflächen (unterschieden nach Laub-, Nadel- und Mischwald) sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.	5 %
Wasserfläche	Still- und Fließgewässer.	0 %
Gebäude	Gebäudeflächen.	100 %
Kunstrasen/Hartplatz	Sportflächen mit Kunstrasen bzw. Hartplätzen.	60 %

Die in der Tabelle 2 aufgelisteten Größen wurden vorwiegend entnommen aus Hupfer & Kuttler (2006) und Groß (1993). Die Rauigkeitslänge beschreibt eine fiktive Höhe über dem Erdboden, bei der die mittlere Windgeschwindigkeit zu Null wird. Die Größe repräsentiert die Rauigkeit der Erdoberfläche, die je nach Strukturtyp variabel ist. So ist die Rauigkeitslänge von Wäldern und bebauten Arealen am höchsten, während Straßen, Gleise, Freiland und Hartplätze die geringsten Rauigkeitslängen aufweisen. Die Albedo drückt das Rückstrahlvermögen von Oberflächen aus und entspricht dem Anteil der reflektierten Strahlung an der einfallenden Strahlung. In FITNAH-3D werden vegetationsgeprägte Strukturen mit einer etwas geringeren Albedo definiert als bebaute Flächen. Die Wärmeleitfähigkeit definiert das Vermögen eines Stoffes, thermische Energie mittels Wärmeleitung in Form von Wärme zu transportieren. Anthropogen geprägte Oberflächen (Straßen, verdichtete Böden) haben in der Regel eine höhere Wärmeleitfähigkeit als natürliche Oberflächen. Der menschliche Eingriff auf den natürlichen Wärmehaushalt wird durch den anthropogenen Wärmefluss beschrieben. Anthropogene Wärme wird u. a. im Verkehr (s. Nutzungsklassen Straße und Gleis) sowie in Industrieanlagen und auch in Wohngebieten (im Sommer vorrangig durch Klimaanlagen und Stromverbrauch) produziert. Das Bowen-Verhältnis



drückt die Relation zwischen dem fühlbaren Wärmestrom und dem latenten Wärmestrom aus. Der fühlbare Wärmestrom stellt den Energiefluss bei der Erwärmung bzw. Abkühlung von Luft an der Erdoberfläche dar. Der Transport von Wärme in Form von Wasserdampf wird durch den latenten Wärmestrom beschrieben; bei der Verdunstung wird Energie aufgenommen und durch Kondensation wieder freigesetzt. Die Verdunstung ist über anthropogenen Oberflächen geringer als über natürlichen, vegetationsgeprägten Strukturen. Dies schlägt sich auch in einem erhöhten Bowen-Verhältnis in den Bebauungsklassen nieder.

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der Nutzungsklassen des Stadtklimamodells FITNAH-3D

Nutzungsklasse FITNAH	Rauigkeitslänge (m)	Albedo (%)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Anthropogener Wärmefluss (W/m ²)	Bowen-Verhältnis
Zentrum	0.3	20	2.0	40	10
Block/Blockrand	0.3	20	1.8	30	3.33
Industrie	0.3	20	2.0	60	10
Zeilen/Hochhaus	0.3	20	1.8	30	3.33
Einzel-/Reihenhaus	0.1	15	1.5	5	1.25
Straße	0.01	20	2.0	20	0.0
Gleis	0.03	15	1.5	5	0.0
baulich geprägte					
Grünfläche	0.10	18	0.8	-	-
Freiland	0.03	20	0.7	-	-
Gehölz	0.3	18	0.8	-	-
Laubwald	0.5	15	1.0	-	-
Nadelwald	0.5	15	1.0	-	-
Mischwald	0.5	15	1.0	-	-
Gebäude	0.3	20	2.0	20	0.0
Hartplatz	0.03	20	1.0	-	0.0

Die Oberflächentemperaturen der Leipziger Gewässer wurden entsprechend der vorliegenden Messungen (z. B. von Weiße Elster, Neue Luppe, Parthe, Pleiße, Kulkwitzer See und Cospudener See) mit 20 °C vorgegeben. Bei hohem Bewuchs wird zudem nutzungsabhängig die vertikale Verteilung der Blattflächendichte berücksichtigt. Bäume werden über die Strukturhöhe definiert. Aus dieser Information wird der Baum in der Regel mit einem 4 m hohen Stamm und einer darüber befindlichen Krone generiert. In der Baumkrone wird eine Blattflächendichte von 0,8 m²/m³ angenommen. Bei den Hartplatzflächen geht man davon aus, dass der Boden stärker als Freilandflächen verdichtet ist und aufgrund einer Drainage kein Wasser tagsüber für eine Verdunstung zur Verfügung steht.

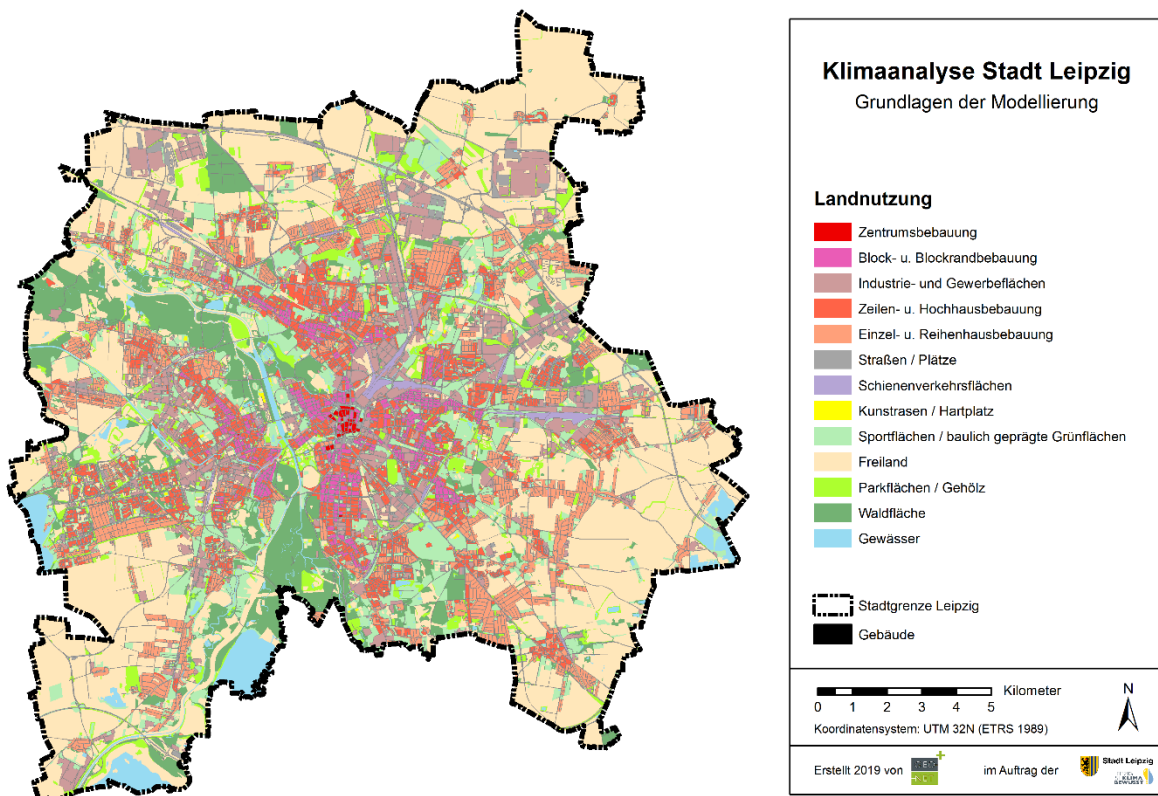


Abbildung 10: Klassifizierung der Landnutzung für das Stadtgebiet von Leipzig

Das Ergebnis der Landnutzungsklassifizierung ist in Abbildung 10 festgehalten (für eine bessere Übersicht erfolgt die Darstellung ohne Gebäudekörper, eine detailliertere Abbildung ist im A0-Format im Anhang zu finden). Die Landnutzungsgeometrie basiert zum Großteil auf der Strukturtypenkartierung, wurde jedoch auf der Basis aktueller Luftbilder (DOP 2017 und 2015³) abgeglichen und gründlich überarbeitet. Demnach entspricht die Landnutzungsklassifizierung für die Stadt Leipzig dem Stand von 2017. Die Zuweisung der Strukturtypen erfolgte rein auf der Basis der physikalischen Eigenschaften, unabhängig von der tatsächlichen Nutzung. So kann es u. a. vorkommen, dass gewerblich genutzte Flächen als Zeilen- und Hochhausbebauung definiert wurden, wenn diese z. B. einen sehr geringen Versiegelungsgrad aufwiesen. Hinzu kommt, dass die Bauklassen (Zentrumsbebauung, Blockrandbebauung, Industrie/Gewerbe, Zeile/Hochhaus sowie Einzel- und Reihenhausbauung) lediglich das Umfeld der Gebäude beschreiben. Der reine Baukörper als solcher wird im Raster als Gebäude klassifiziert.

Im Unterschied zur mesoskaligen Modellierung wurden darüber hinaus für Gebäude deren Grundriss und ihre Höhe erfasst, sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Dies erfolgte auf der Basis des 3D-Stadtmodells LoD1⁴ aus dem Jahr 2013. Weiterhin wurden zwei Digitale Oberflächenmodelle (DOM), das DOM 2010 und 2017 mit einer Gitterauflösung von jeweils 2 m verwendet. Aus der Differenz von DOM und DGM ergibt sich die Strukturhöhe, die damit flächendeckend für die Stadt Leipzig vorlag. Das DOM 2010 stammt aus dem Sommerhalbjahr und war demnach gut für die Erfassung der Vegetation geeignet. Das DOM 2017 aus dem Winterhalbjahr ist zwar aktueller, war jedoch weniger geeignet für die Berechnung der Höhe von Laubbäumen. Für die Strukturhöhe wurde jeweils der maximale Wert aus DOM 2010 und DOM 2017 gewählt. Lärmschutzwände (schmale Strömungshindernisse, die nicht im DOM erkennbar sind) konnten anhand einer Lärmkartierung abgebildet werden. Die finale, rasterbasierte Strukturhöhe ergab sich aus der Verknüpfung

³ Da es sich beim DOP 2017 um eine Aufnahme aus dem Winterhalbjahr handelt, wurde zusätzlich das DOP 2015 aus dem Sommerhalbjahr herangezogen, um Laubbäume besser erkennen zu können.

⁴ Gebäude außerhalb des Leipziger Stadtgebiets wurden über Open Street Map-Daten erfasst.



beider DOMs, dem LoD1-Modell, der Lärmschutzkartierung und zum Teil den Ergebnissen aus der Landnutzungs- und Baumkartierung (Abbildung 11).

Die räumliche Auflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne kleinkronige Bäume auf dieser Maßstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden. Es lagen hochaufgelöste CIR-Luftbilder (Colored Infrared) aus dem Jahr 2015 in einer Auflösung von 20 cm x 20 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von 0,1 war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Abbildung 12).

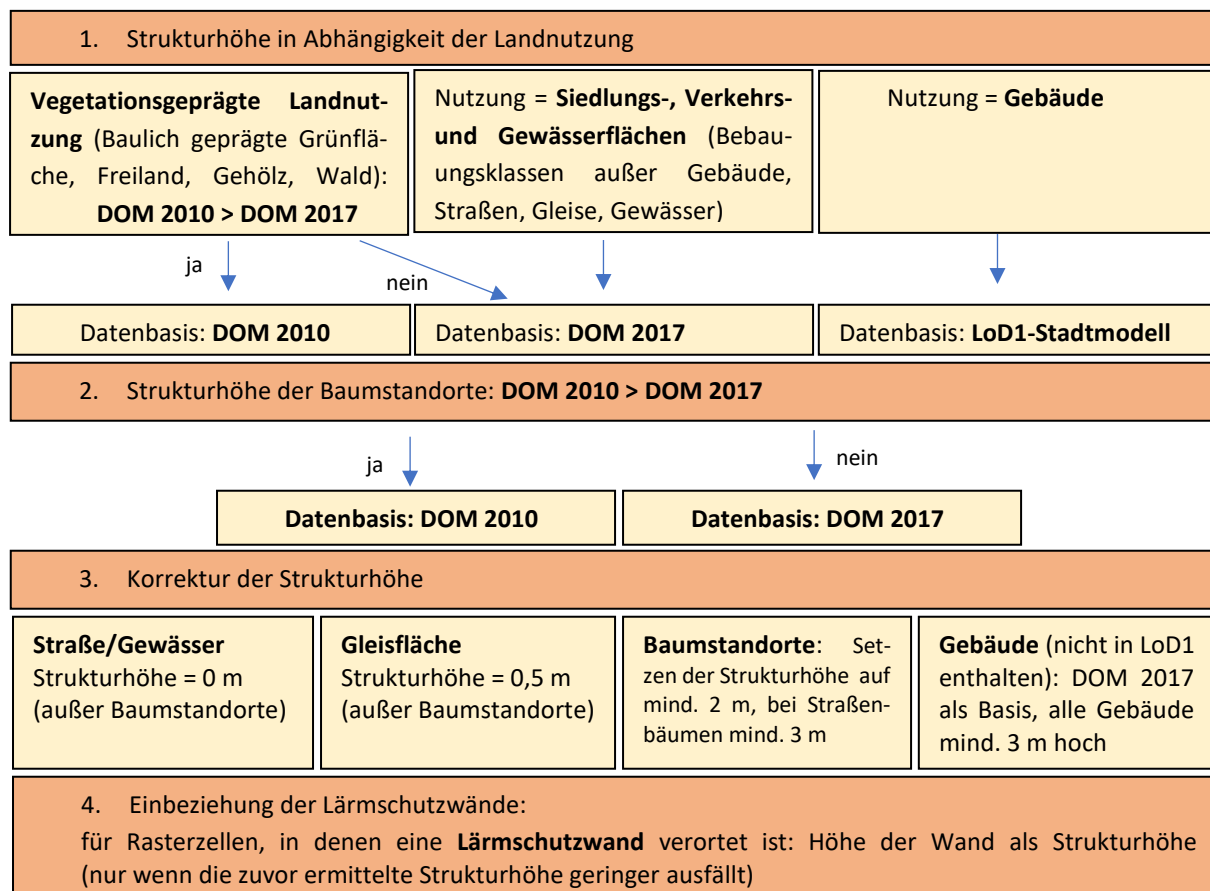


Abbildung 11: Vorgehensweise zur Erfassung der finalen, rasterbasierten Strukturhöhe

Das Ergebnis der automatisierten Baumkartierung wurde anhand aktueller Luftbilder (DOP 2017 aus dem Winterhalbjahr und DOP 2015 aus dem Sommerhalbjahr) abgeglichen, auf Plausibilität geprüft und ggf. korrigiert.

Der Versiegelungsgrad wurde anhand der FITNAH-Nutzungsklassen parametrisiert (vgl. Tabelle 1, Spalte „Versiegelungsgrad“). Da die (offene, halboffene und geschlossene) Blockrandbebauung sehr unterschiedliche Versiegelungsgrade aufweisen kann, erfolgte für diesen Strukturtyp eine Schätzung des Versiegelungsgrades anhand des Baumanteils in dem entsprechenden Block. Dieses Verfahren wurde für alle Baublöcke angewendet, die entweder nach der Realnutzungskartierung (2009) als „Blockrand- und Blockbebauung“ sowie „offener Blockrand“ definiert sind oder dem FITNAH-Strukturtypen der Block- und Blockrandbebauung entsprachen. Für jeden betreffenden Hofbereich wurde der Baumanteil



berechnet und als unversiegelte Fläche definiert. Die übrigen Flächen repräsentieren die versiegelten Bereiche. Diese Annäherung kann in der folgenden Formel zusammengefasst werden:

$$\text{Versiegelungsgrad}_{\text{Blockfläche}} = 100 - \text{Baumanteil} [\%]$$

Somit ergibt sich beispielsweise ein Versiegelungsgrad von 52 % bei einem Baumanteil von 48 %. Jedoch war nur eine Wertespanne von 25 % bis 78 % zulässig, sodass bei zu hohen (niedrigen) Baumanteilen der Versiegelungsgrad nach oben (unten) korrigiert wurde.

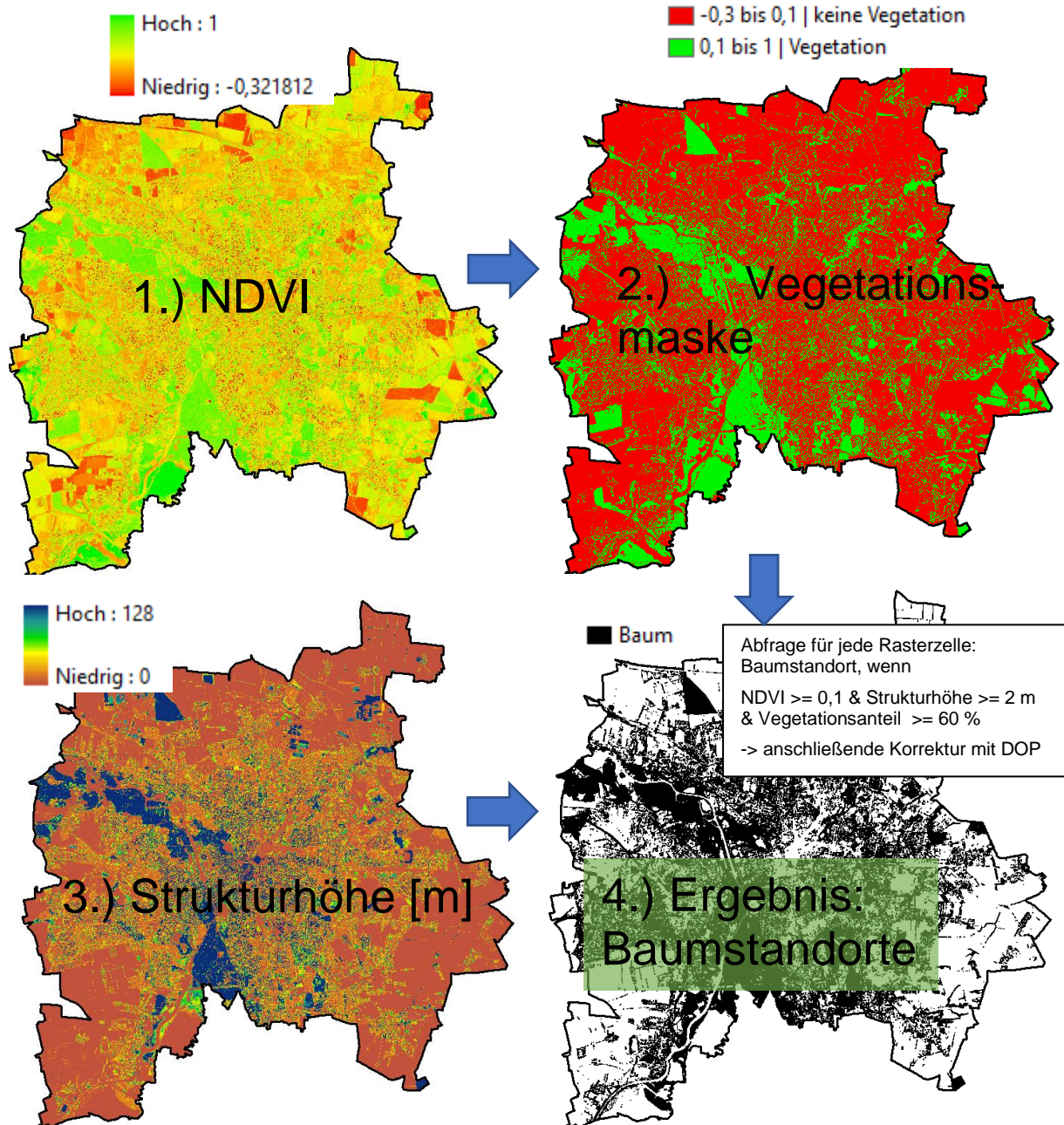


Abbildung 12: Arbeitsschritte zur Identifikation von Baumstandorten anhand von NDVI-Werten und Strukturhöhen



3 Erläuterung der Modellergebnisse ausgewählter Parameter

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Sie basieren auf einer räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen (Lufttemperatur und Windfeld in 2 m ü. Gr. PET in 1,1 m ü. Gr.) sowie eine autochthone Sommerwetterlage (vgl. Kap. 2.2). Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Klimaanalysekarten vorgenommen (z. B. die Ableitung von Kaltluftleitbahnen).

3.1 Nächtliches Temperaturfeld

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Rückgang während der Abend- und Nachtstunden. Kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages wird das Temperaturminimum erreicht. Das Ausmaß der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, große Unterschiede aufweisen. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im **Siedlungsbereich** ist vor allem von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über **Grün- oder grün dominierten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insb. von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weiteren Einfluss aus. Es macht bspw. einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder im dicht versiegelten Bereich befindet.

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im **Wald** beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion in 2 m Höhe dagegen geringer aus als über Freiflächen. Höhere Kaltluftproduktionsraten sind erst *über* dem Kronendach zu finden. Der Wald stellt ein Strömungshindernis dar. Die hohe spezifische Wärmekapazität von **Wasser**, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte Temperaturamplitude im Tagesgang über größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken größere Gewässer auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern können.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb des Stadtgebiets bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitestgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung etwa der Planungshinweiskarten auf diesen beruht (vgl. Kap. 5).

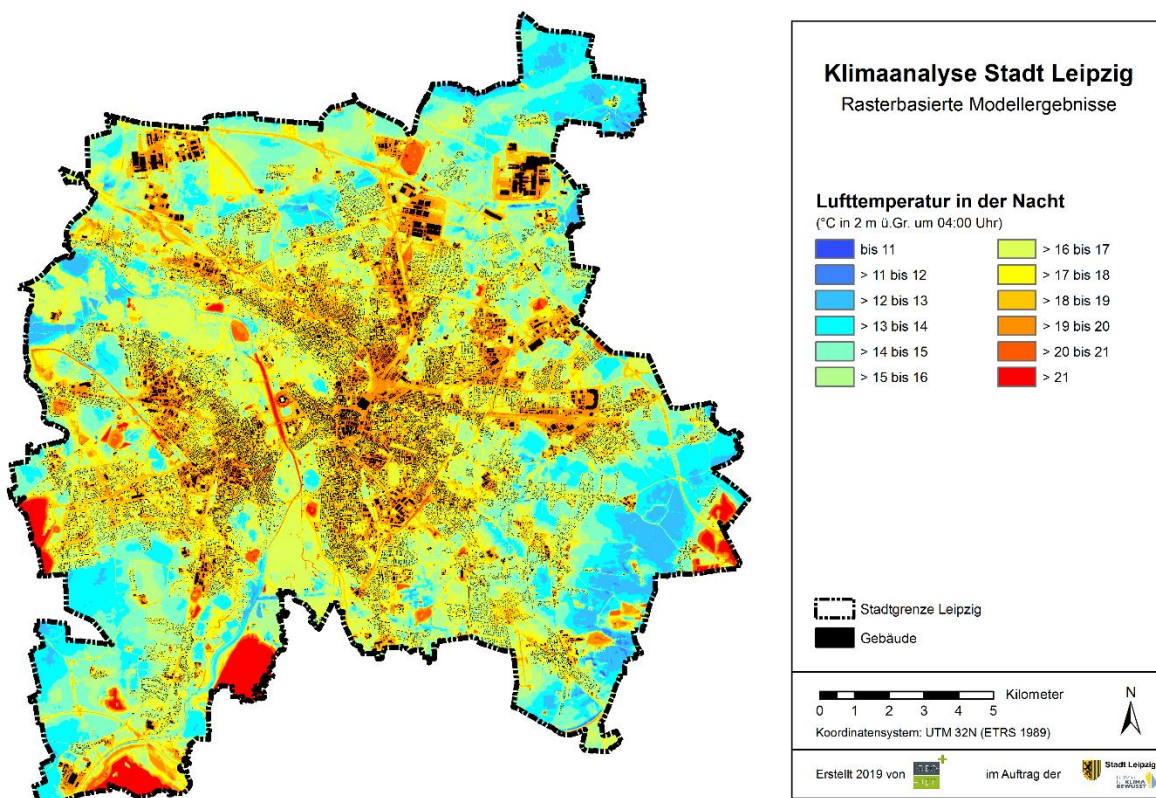


Abbildung 13: Lufttemperatur (°C) in 2 m ü. Grund um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet von Leipzig

In der Stadt Leipzig ergeben sich um 4 Uhr nachts Spannweiten der Temperatur von etwa 12,2 Kelvin (Abbildung 13). Dem Temperaturmaximum von 22,3 °C steht ein Temperaturminimum von 10,1 °C gegenüber. Die mittlere Temperatur im gesamten Stadtgebiet liegt bei 16,4 °C. Die kühleren Grün- und Freiflächen zeichnen sich im Temperaturfeld sichtbar von den wärmeren Siedlungsflächen ab. Grün- und Freiflächen sind im Leipziger Stadtgebiet durchschnittlich 15,5 °C warm. Die durchschnittliche Siedlungsflächentemperatur (ohne Verkehrsflächen) beträgt dagegen 17,2 °C, die mittlere Temperatur von Verkehrsflächen und Plätzen sogar 18,6 °C. Ebenso ist die Luft über Gewässern (z. B. dem Elsterbecken, dem Cospudener See und dem Kulkwitzer See) mit über 20 °C verhältnismäßig warm. Sie stellen mitunter die wärmsten Bereiche in der Stadt dar. Daneben gibt es aber auch weitere sehr warme Bereiche, insbesondere natürliche und künstliche Erhebungen wie etwa die Deponie Seehausen, der Fockeberg und die Deponie Möckern am Luppedamm⁵.

Im bebauten Bereich treten stark versiegelte Bereiche wie die Innenstadt, das Gleisareal am Hauptbahnhof sowie größere Gewerbeflächen (z. B. BMW, Porsche) mit warmen Temperaturen im Bereich von 19 bis 21 °C deutlich hervor. Auch die geschlossene und halboffene Blockrandbebauung, wie etwa in Gohlis-Mitte, ist mit Temperaturen zwischen 18 und 19 °C noch relativ warm. Ein moderates Temperaturniveau mit 16 bis 18 °C ist zum Großteil in den Wohngebieten von Mockau, Gohlis-Süd, Stötteritz und im Musikviertel vorzufinden. Kühlere Wohnareale von unter 16 °C befinden sich lediglich am Siedlungsrand, u. a. in Wiederitzsch, Seehausen und Mölkau.

Die Grünflächen sind wie zu erwarten kühler als bebaute beziehungsweise versiegelte Flächen. Die Grünflächen östlich von Liebertwolkwitz erreichen mit minimalen Werten im Bereich von 10 °C die niedrigsten Temperaturen. Frei- und Ackerflächen kühlen sich in der Nacht am stärksten ab und weisen die geringsten Temperaturen (in Leipzig 14,6 °C im Mittel) auf. Sie spielen demnach in der Nacht eine wichtige Rolle als kaltluftproduzierende Flächen. In Wäldern, wie etwa dem Leipziger Auwald und dem Elster-Pleiße-Auwald, herrschen vergleichsweise milde Temperaturen von durchschnittlich

⁵ Die Hochflächen bleiben nachts relativ warm, da zum einen die kalte Luft hangabwärts fließt und zum anderen über den Hochflächen (wärmere) Höhenluft vertikal nach unten nachströmt.



16,9 °C. Innerstädtische Parks weisen je nach Größe, Ausstattung (insb. Baumanteil) und Lage unterschiedliche Temperaturniveaus auf. So ist der Friedenspark etwa 17 bis 18 °C, der Clara-Zetkin-Park 16 bis 17 °C und die große Rasenfläche des Rosentals 14 bis 15 °C kühl.

Die Abhängigkeit der Lufttemperatur vom jeweiligen Stadtstrukturtyp veranschaulichen die Abbildung 14 und die Abbildung 15. Je dichter die Bebauung und je höher der Versiegelungsgrad, desto wärmer sind die entsprechenden Siedlungsflächen. So werden in der dicht bebauten Leipziger Innenstadt und bei der Blockrandbebauung höhere Temperaturen erreicht als bei einer lockeren Bebauung, wie etwa der Zeilen- und Einzelhausbebauung (Abbildung 14 mit Fallbeispielen). Weiterhin ist zu sehen, dass der zur Straße gerichtete Teil in der Regel wärmer ist als der Bereich in Richtung des durchgrünten Innenhofs bzw. Gartens.

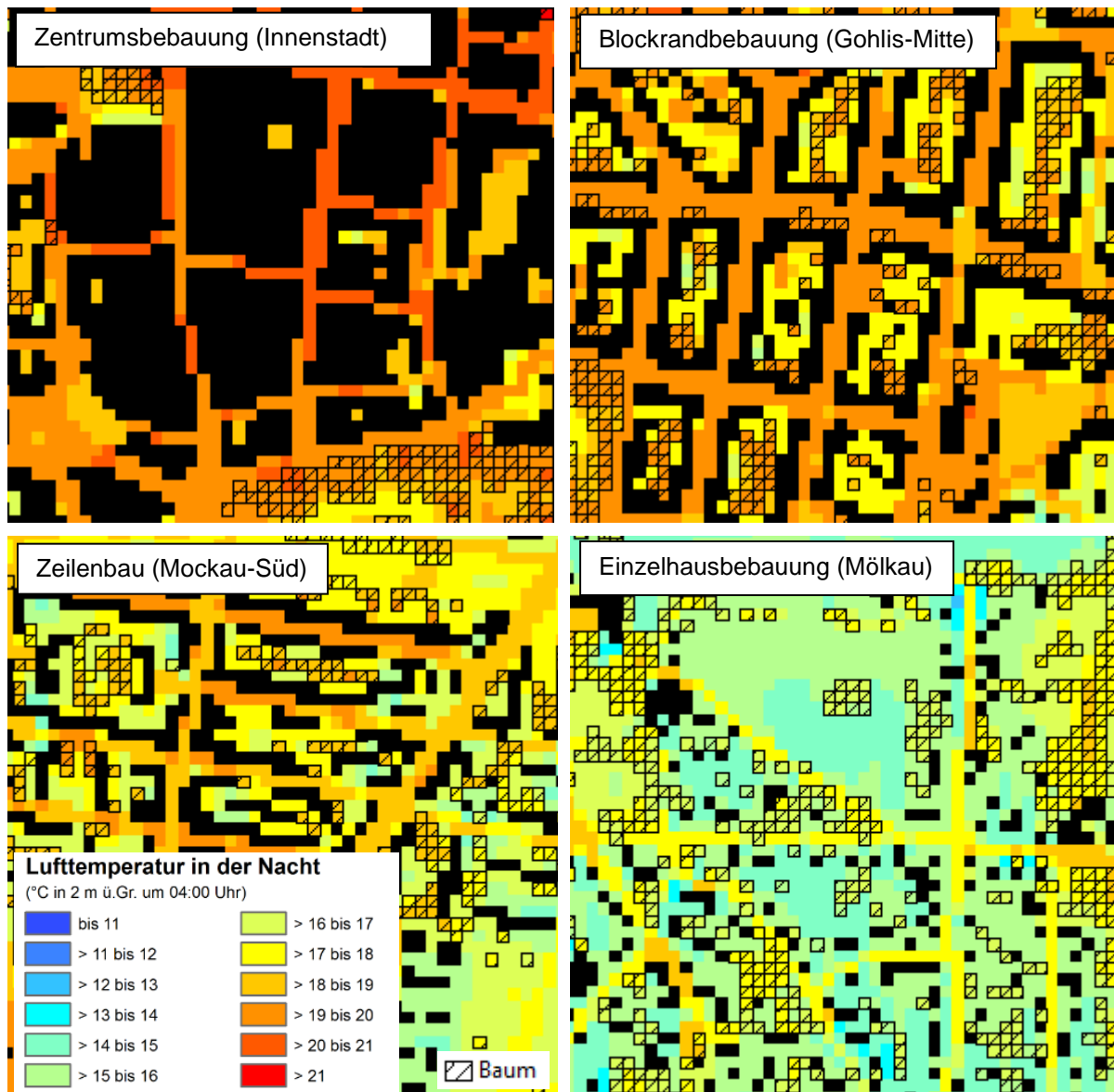


Abbildung 14: Nächtliche Lufttemperaturen (°C) in vier verschiedenen Wohngebieten Leipzigs

Bei den Grünflächen treten die größten Unterschiede zwischen baumbestandenen Arealen und einfachen Rasenflächen (bzw. allgemein niedrigem Bewuchs) auf (Abbildung 15). Da Bäume in der Nacht die Auskühlung des Bodens durch das darüber liegende Kronendach verhindern, sind Rasen- und Ackerflächen in der Regel kühler als Baumbestände. So bestehen deutliche Temperaturunterschiede zwischen Wäldern (s. Leipziger Auwald) und offenen Rasen- und Ackerflächen (s. Rosental, Ackerflächen bei Wiederitzsch). Neben diesem extremen Gegensatz (Wald vs. Freifläche) ist die Wirkung von Bäumen auch bei anderen Grünflächen zu erkennen: So ist beispielsweise der Friedenspark mit seinem



hohen Baumanteil etwas wärmer als die Kleingärten an der Parthe und der Mariannenpark, welche einen geringen Baumanteil aufweisen.

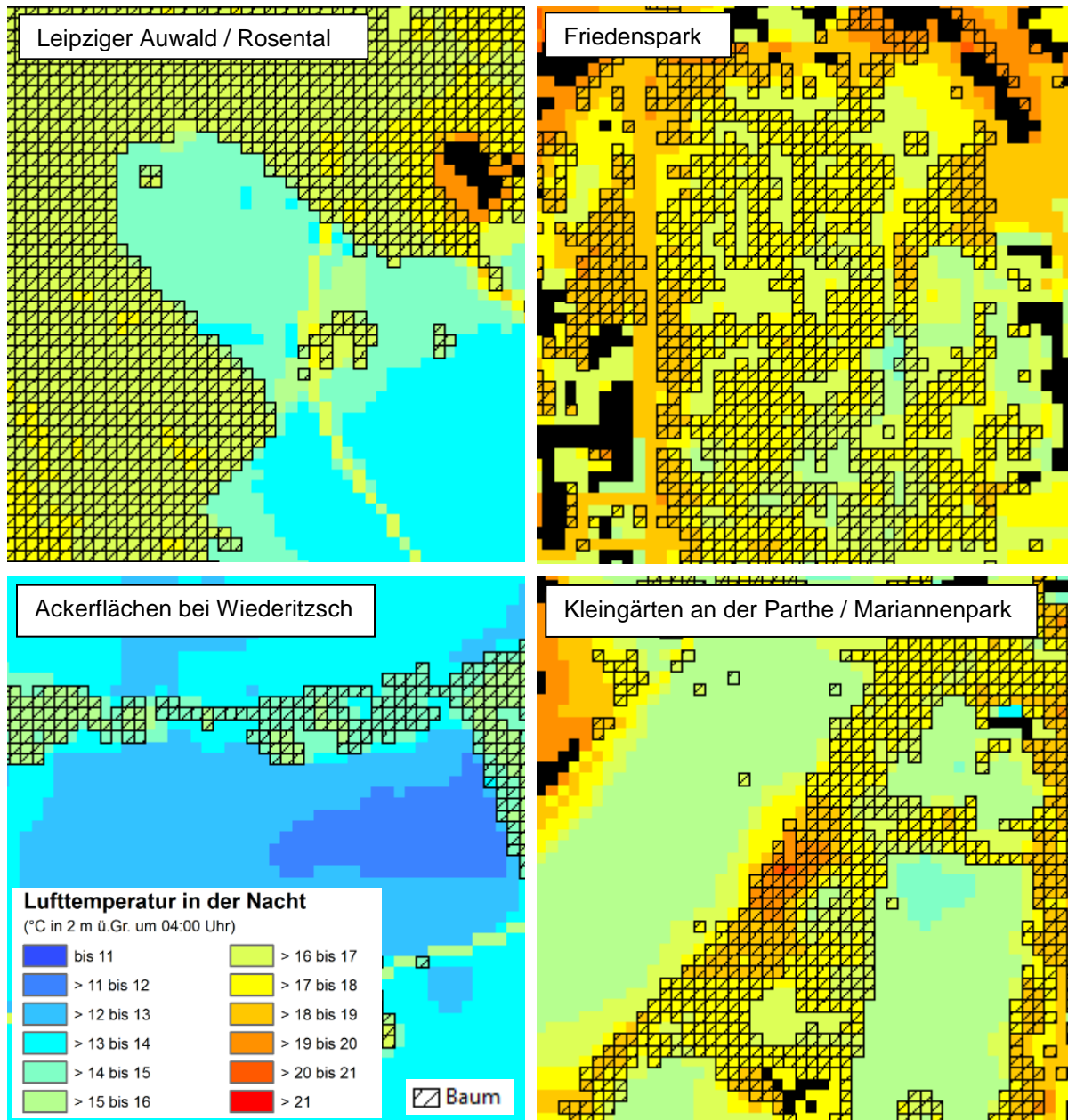


Abbildung 15: Nächtliche Lufttemperaturen ($^{\circ}\text{C}$) von vier verschiedenen Grünarealen in Leipzig

Das Temperaturmuster von Leipzig kann demnach zum Großteil anhand der verschiedenen Stadtstrukturtypen erklärt werden. Letztere sind aber nicht alleinige Komponenten, die die Temperaturen beeinflussen. So spielt u. a. auch die Höhenlage und Neigung eine Rolle: Die kalte („schwere“) Luft fließt nachts entlang des Gefälles in Richtung der Täler, sodass diese tendenziell kühler sind als die Hochflächen. Dies erklärt zum Beispiel, warum die Deponie Möckern wärmer ist als das benachbarte Tal der Neuen Luppe und Nahle. Auch die relative Lage ist entscheidend: So könnten der Lene-Voigt-Park und der Friedenspark beispielsweise kühler sein, wenn diese nicht von dichter Bebauung umgeben wären. Umgekehrt betrachtet, entfalten diese Parks eine kühlende Wirkung in ihre Umgebung, was den umliegenden Wohngebieten zu Gute kommt. Ebenso ist die Größe eines Stadtstrukturtyps bei der Temperaturausprägung von Belang: Eine große Gewerbefläche wie (z. B. BMW-Gelände) heizt sich stärker auf als eine kleine Gewerbefläche. Weit ausgedehnte Ackerflächen wie etwa nördlich des Ortsteils Wiederitzsch kühlen nachts deutlich intensiver aus als z. B. die kleinen Rasenflächen am Johannisplatz.



3.2 Kaltluftströmungsfeld

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickeln. Diese Windsysteme können Kaltluft transportieren.

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, welche wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind Hangabwinde und Flurwinde – erstgenannte treten im Untersuchungsgebiet aufgrund der vergleichsweise geringen Reliefenergie seltener auf.

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Kuttler 2009). **Hangabwinde** erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m/s, ihre vertikale Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (Kuttler 2009; Schönwiese 2013). In ebenen Lagen bilden sich unter günstigen Bedingungen sogenannte **Flurwinde** aus, die radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet sind. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden. Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur gering ausgeprägte Strömungsphänomene (Geschwindigkeit i.d.R. deutlich < 2 m/s.), die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Kleinräumige Strömungsphänomene, die zwischen einzelnen strukturellen Elementen innerhalb der Stadt auftreten, werden **Strukturwinde** genannt.

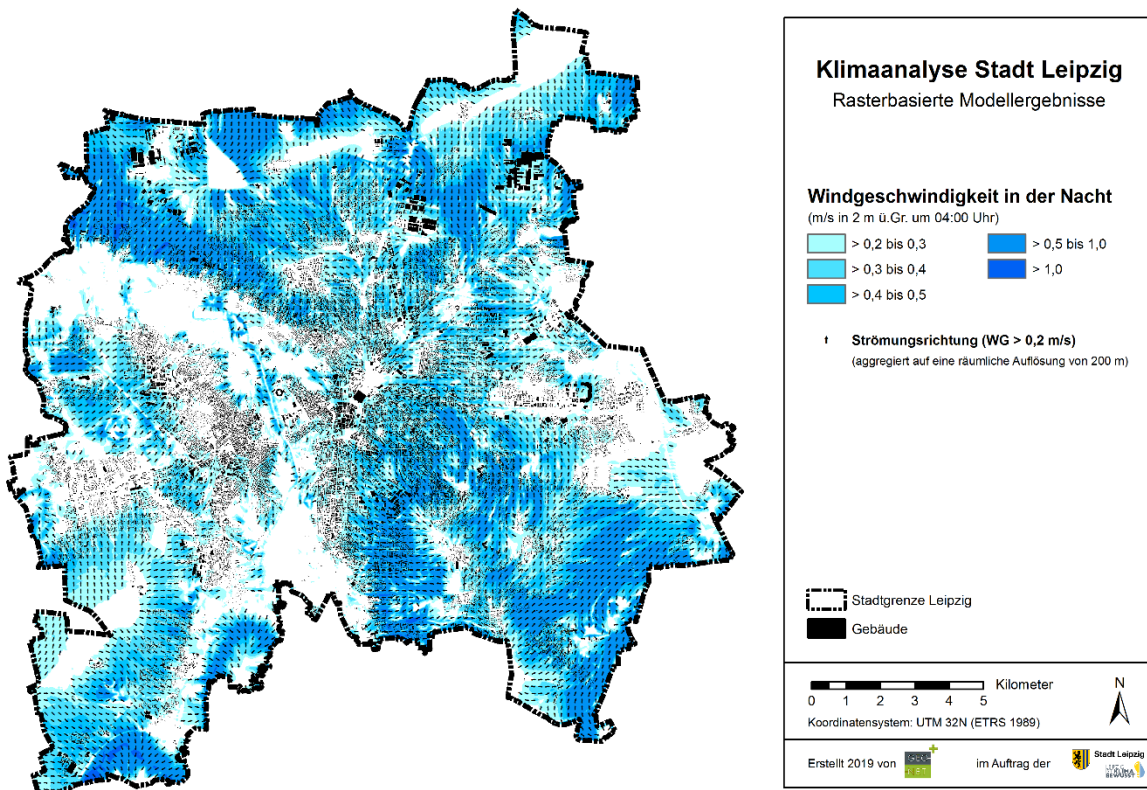


Abbildung 16: Bodennahes Windfeld (2 m ü. Grund) um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet von Leipzig

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu. Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis.



Aus diesem Grund sind die Durchlüftung des Stadtkörpers und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Die Ergebniskarte (Abbildung 16) stellt das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld, das sich während einer sommerlichen Strahlungswetternacht ausbildet, in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 200 m aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von 0,2 m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

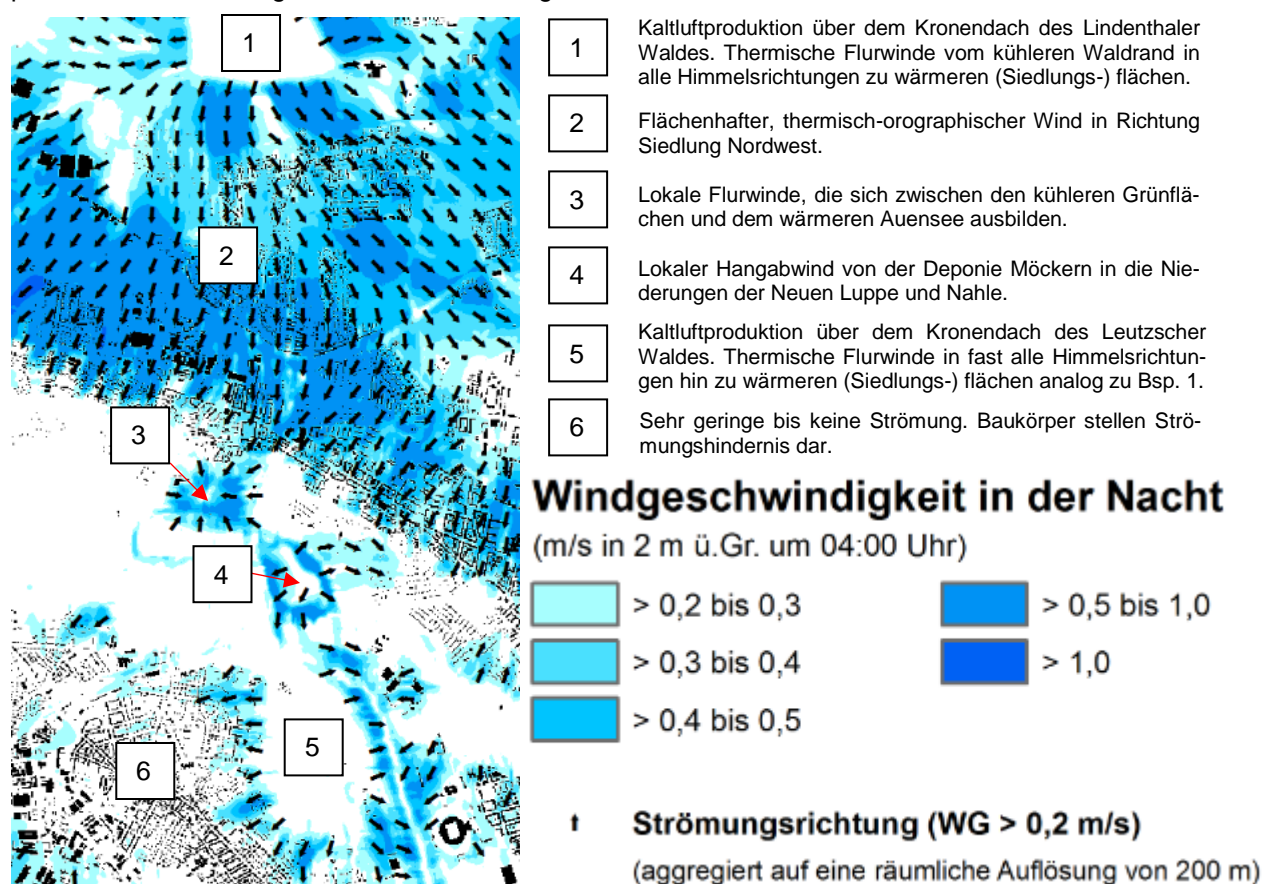


Abbildung 17: Ausgewählte lokale Strömungssysteme im Nordwesten von Leipzig

Die Geschwindigkeit der Kaltluftströmungen liegt bodennah zumeist zwischen 0 m/s und 1,5 m/s, wobei deren Dynamik räumlich variiert. Höhere Windgeschwindigkeiten treten insbesondere dort auf, wo thermisch induzierte Flurwinde durch das Relief verstärkt werden und hangabwärts fließen. Dies ist insbesondere im Südosten der Stadt gegeben, aber auch von den Hochflächen im Norden der Stadt fließt Kaltluft in Richtung Süden zu den überwärmten Siedlungsflächen. Mit Strömungsgeschwindigkeiten von teilweise über 1 m/s fließt beispielsweise Luft aus dem Norden in Richtung Lützschena-Stahmeln. Die Südvorstadt, Connewitz, das Zentrum Südost wird von Winden mit 0,4 bis 1 m/s aus Richtung Südosten angeströmt. Stärkere Flurwinde verteilen sich um das gesamte Stadtgebiet und sind an Strukturen wie weitläufige Grün-/Freiflächen am Stadtrand oder gar Flussläufe gebunden (vgl. Kapitel 5.4.4 zu den Kaltluftleitbahnen).

Die Abbildung 17 zeigt ausgewählte Strömungssysteme in einem Ausschnitt von Leipzig. Dargestellt sind sowohl thermisch-induzierte Flurwinde (Beispiel 1, 3 und 5), reine orographische Winde („Hangabwinde“, s. Beispiel 4), thermisch-orographische Winde (Beispiel 2) und ein Gebiet ohne nennenswerte Strömung (Beispiel 6). Allgemein ist die Windgeschwindigkeit bei rauigkeitsarmen Strukturen wie Ackerflächen und Rasen am höchsten. Baukörper und Wälder stellen Strömungshindernisse dar, sodass die bodennahe Strömung nur schwach bis kaum spürbar ausgeprägt ist oder gar komplett zum Erliegen kommt.

In der Abbildung 18 ist ein Ausschnitt des räumlich hochaufgelösten Strömungsfeldes (10 m Gitterweite) zu sehen. Der Bereich befindet sich im Übergangsbereich zwischen Zentrum Südost, Zentrum Süd und der Südvorstadt.

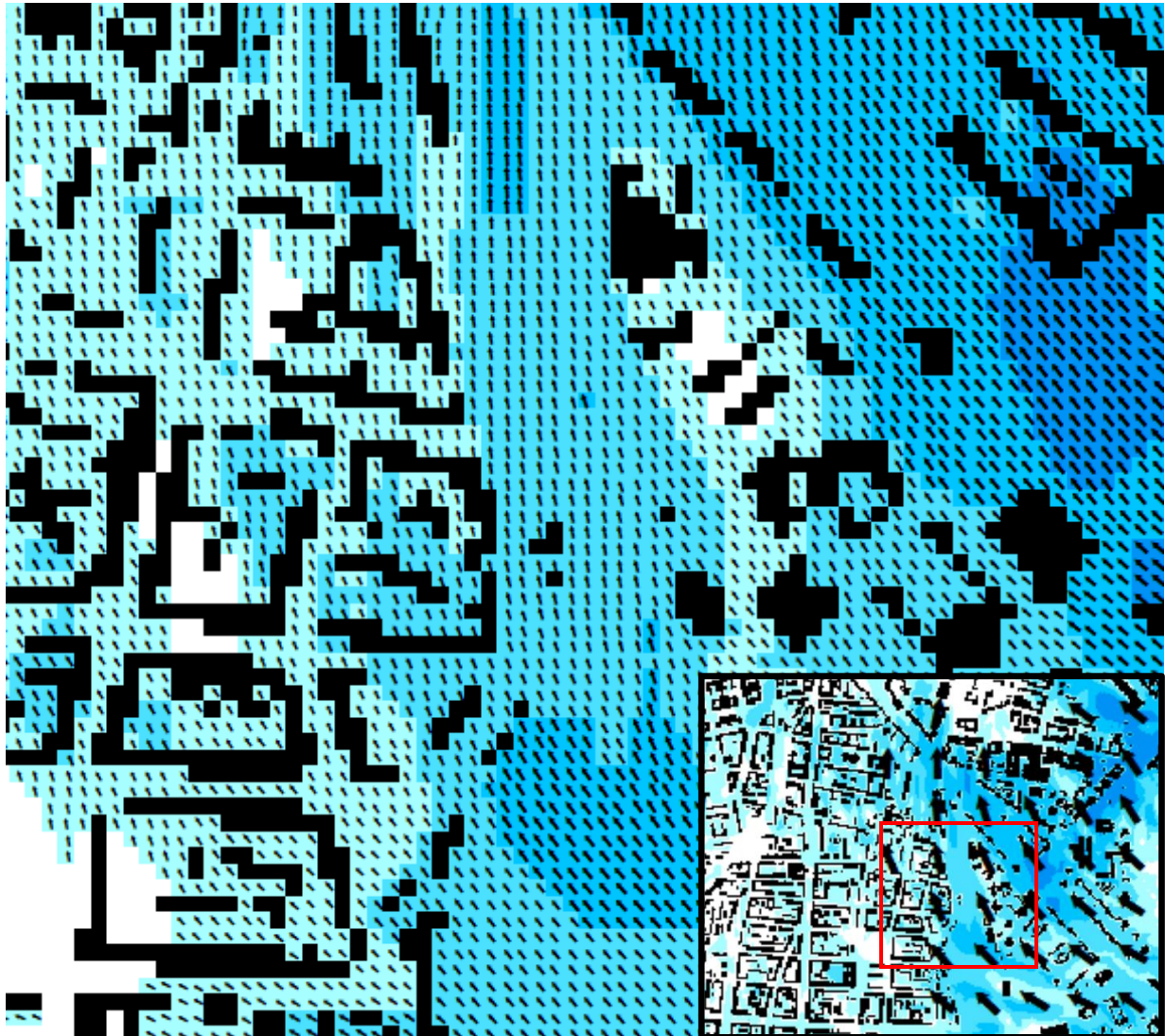


Abbildung 18: Strömungsfeld in einem Ausschnitt südlich des Bayerischen Bahnhofs (Legende zur Windgeschwindigkeit s. vorherige Abbildungen)

Das relativ urbane Areal wird verhältnismäßig gut mit thermisch-orographischen Winden durchlüftet. Dies erfolgt zum einen über die Straße des 18. Oktobers und zum anderen über die Brachfläche südlich des Bayerischen Bahnhofs. Auffällig ist, dass die Windgeschwindigkeiten in der Straße des 18. Oktobers mit 0,5 bis 1 m/s sogar höher ausfallen als auf der Brachfläche, was auf einen Kanalisierungseffekt schließen lässt. Dies zeigt, dass nicht nur rauigkeitsarme Grün- und Freiflächen, sondern auch breite Straßenzüge wichtig für die Durchlüftung des Stadtkörpers sein können. Die Winde sind teilweise so stark ausgeprägt, dass auch ein Großteil der Innenhöfe noch gut durchströmt wird. Nichtsdestotrotz wird die Strömung an den Baukörpern abgebremst und kommt im Leebereich mancher Gebäude fast bis komplett zum Erliegen (s. weiße Bereiche in Abbildung 18).

Dennoch muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass das Strömungsfeld modellbedingt mit einigen Ungenauigkeiten behaftet ist. Bedingt durch die Rasterauflösung von 10 Metern können z. B. Straßenflächen nicht optimal erfasst werden. Relativ schmale Straßen mit einer Breite von weniger als 6 Metern sind möglicherweise nicht richtig abgebildet, obwohl auch diese als rauigkeitsarme Strukturen von Winden durchströmt werden können. Generell kann mit einer Modellauflösung von 10 Metern jedoch das grundlegende Strömungsgeschehen gut erfasst werden, da selbst kleine Strukturen wie Bäume und Gebäude aufgelöst werden. In der Karte zum Strömungsfeld wurden jedoch lediglich die Winde ab einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s mit Pfeilsignatur dargestellt. Setzt man den Schwellwert u. a. auf 0,1 m/s, ist die Strömung beispielsweise am Albrecht-Dürer-Platz oder dem Clara-Zetkin-Park deutlicher zu sehen, wengleich sie nicht so stark ausgeprägt ist wie auf anderen Grünflächen (z. B. Friedenspark, Lene-Voigt-Park).

3.3 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Kapitel 3.2 zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grün dominierten Fläche aber nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d. h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Vereinfacht ausgedrückt stellt der Kaltluftvolumenstrom das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite) dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (vgl. Abbildung 19). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 10 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*Dichte* aufzufassen.

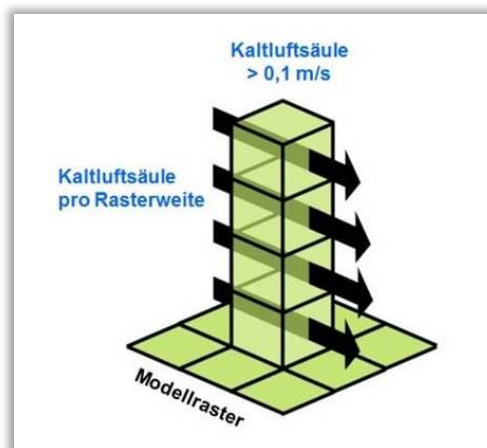


Abbildung 19: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Dieser Wert kann über ein 10 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz veranschaulicht werden, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Wird nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft bestimmt, ist diese als rasterbasierte Volumenstromdichte zu verstehen.

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet



und später in einem Kaltluftammelgebiet liegt. Letzteres kann als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und von diesen über- oder umströmt werden. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann. Die starken Differenzen zwischen den Acker- und Siedlungsflächen im Südwesten und Südosten der Stadt sind vor allem auf das Relief zurückzuführen (vgl. DGM in Kap. 2.5).

Gebäude, Mauern oder Straßendämme können als Strömungshindernisse wirken und luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgröße, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab.

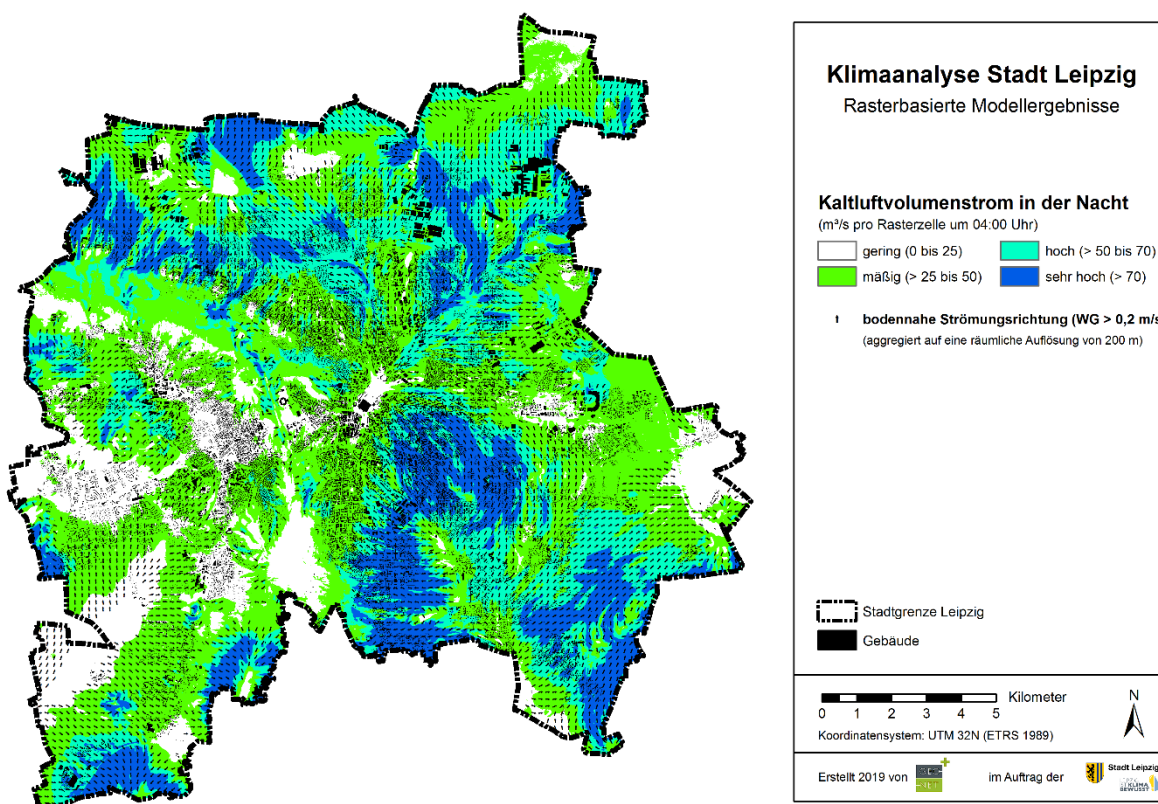


Abbildung 20: Kaltluftvolumenstrom um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet von Leipzig

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Leipziger Stadtgebiet entspricht im Wesentlichen der des bodennahen Strömungsfeldes. Die Abbildung 20 zeigt den Kaltluftvolumenstrom (farbige Darstellung) in einer qualitativen Abstufung im Zusammenhang mit dem bodennahen Strömungsfeld (Pfeilsignatur). Die Klassen „gering“ (weiß) und „mäßig“ (grün) repräsentieren Kaltluftvolumenströme, die in Bezug auf die Stadt Leipzig unterdurchschnittliche Werte aufzeigen. Die „hohen“ (türkis) und „sehr hohen“ (blau) Kaltluftvolumenströme sind im Verhältnis dazu höher als im Leipziger Mittel. Verglichen mit anderen deutschen Städten sind die Volumenströme Leipzigs aufgrund der geringen Reliefunterschiede (und damit verbunden der schwächeren Hangabwinde) vergleichsweise schwach ausgeprägt. Vor diesem Hintergrund ist eine vierstufige Einteilung der Kaltluftvolumenströme ausreichend, um die wesentlichen lokalen Unterschiede innerhalb des Stadtgebietes herauszuarbeiten.

Dem Muster des Windfeldes (Abbildung 16) folgend, erreicht der Kaltluftvolumenstrom im Südosten und Norden seine höchsten Werte (blau). Dementsprechend konzentrieren sich in diesen Bereichen eine Vielzahl von Kaltluftleitbahnen (vgl. Kapitel 4.1.2 und 5.4.4). Dem stehen Flächen gegenüber, die nur mit geringen Kaltluftvolumenströmen (weiß) durchlüftet werden. Dazu zählen ein Bereich der Innenstadt, die nördliche Hälfte von Zentrum-West, Lindenau, Alt-Lindenau, ein zentraler Bereich von Alt-West,

Grünau-Nord, Schönau, Klein- und Großzschocher, Windorf und der südliche Teil von Paunsdorf. Natürliche Barrieren für den Kaltluftvolumenstrom sind Wälder, wie etwa der nördliche und südliche Auwald und der Tannenwald, in welchen die Volumenströme ebenfalls gering ausfallen. In den großen Kaltluftentstehungsgebieten (Ackerflächen in der Mark Flickert (südlich Grünau), Ackerflächen in Hirschfeld und Althen) ist der Volumenstrom ebenso gering. Hierbei handelt es sich um Flächen mit hoher Kaltluftproduktionsrate, in denen die kühle Luft absinkt, sich aber horizontal nicht so stark verteilt⁶. Trotz verhältnismäßig geringer Volumenströme spielen Acker- und Waldflächen dennoch eine wichtige Rolle für den Luftaustausch; Ackerflächen dienen als kaltluftproduzierende Flächen⁷, Wälder fungieren als Frischluftproduzenten.

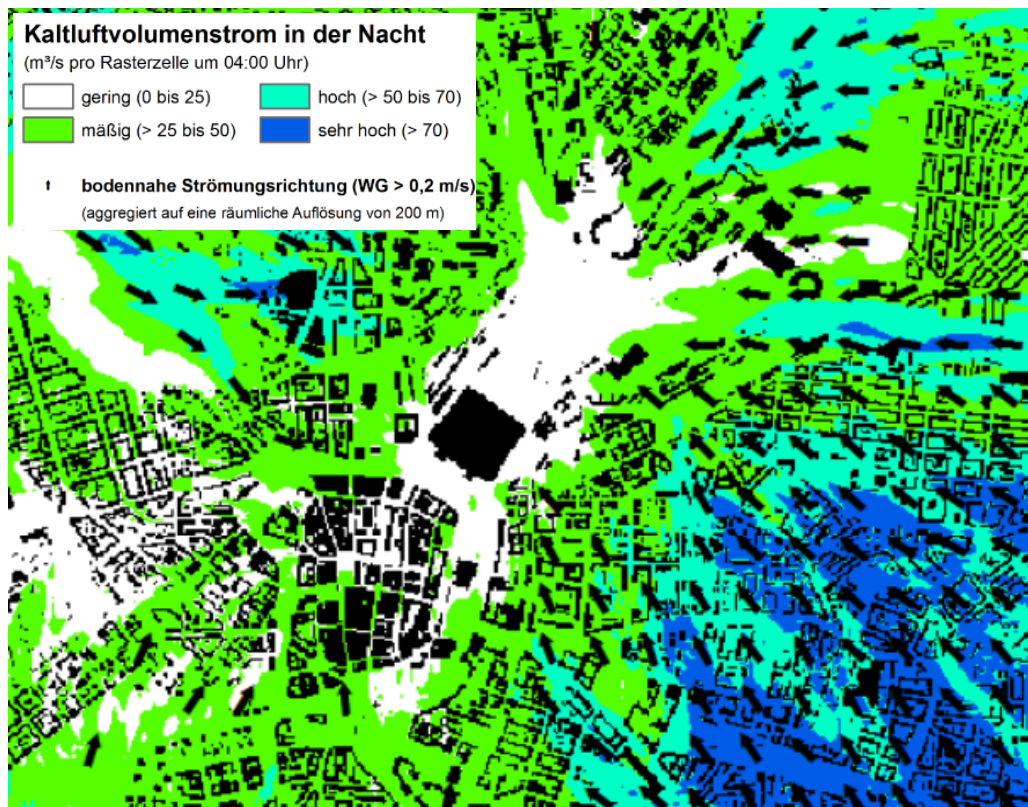


Abbildung 21: Kaltluftvolumenstrom um 4 Uhr nachts im Zentrum von Leipzig

In der Abbildung 21 sind Kaltluftvolumenströme verschiedener Intensitäten in einem zentralen Bereich von Leipzig dargestellt. Mit sehr hohen Volumenströmen von über $70 \text{ m}^3/\text{s}$ treten die Belüftungsbahnen von Reudnitz, Neuschönefeld und Volkmarsdorf deutlich hervor (blau). Diese Stadtteile werden trotz dichter Bebauung relativ gut durchströmt. Erwartungsgemäß weisen zudem raugkeitsarme Strukturen hohe bis sehr hohe Kaltluftvolumenströme auf. Dazu zählen die Große Wiese vom Rosental, das Gleis- und Straßenareal im Nordosten einschließlich Partheufer mit Kleingartenkolonie sowie die Gleisfläche im östlichen Teil Leipzigs. Die Wirkung von Gebäuden als Strömungshindernis kann ebenso aus der Karte entnommen werden. Es ist zu sehen, wie sich der Kaltluftvolumenstrom im Südosten von sehr hoch bis gering allmählich abschwächt, bis er schließlich ganz zum Erliegen kommt. Ein Großteil der Innenstadt einschließlich Hauptbahnhof wird nur noch geringfügig, teilweise auch gar nicht mehr durchströmt.

⁶ Der Kaltluftvolumenstrom berücksichtigt lediglich die horizontale Luftmassenbewegung, nicht aber den vertikalen Austausch.

⁷ Um die Wirksamkeit von Kaltluftentstehungsgebieten zu betrachten, muss auch die Strömungsrichtung mitberücksichtigt werden: Im Kaltluftentstehungsgebiet der Mark Flickert (südlich Grünau) wird die kühle Luft in Richtung der überwärmten Siedlung transportiert; in Hirschfeld-Althen handelt es sich dagegen um ein Kaltluftsammlerbecken, in welches die Luft hangabwärts hineinströmt, d. h. die umgebende Siedlung kann nicht von der kühlen Luft des Kaltluftsammlerbeckens profitieren.



3.4 Thermische Belastung am Tage

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen⁸. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*), die PET (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Mayer und Höppe 1987).

Tabelle 3: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 3787, Blatt 2 11/2008).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwache Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Leipzig mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 2009). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

Für die PET existiert in der VDI 3787, Blatt 9 -Richtlinie eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z. B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tabelle 3). In der Klimaanalysekarte für die Tagsituation wird die PET im Hinblick auf den Grad der Wärmebelastung genauer betrachtet (vgl. Kapitel 4.2).

⁸ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

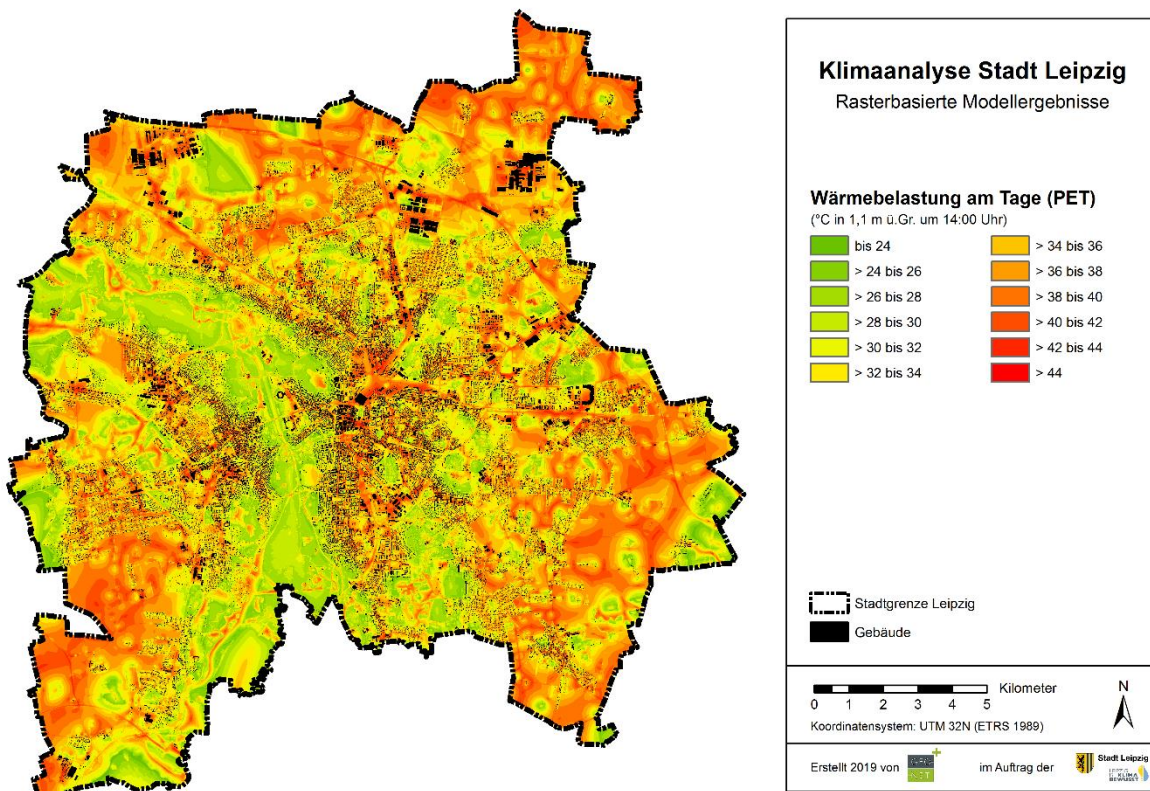


Abbildung 22: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in 1,1 m ü. Grund⁹ um 14 Uhr im Stadtgebiet von Leipzig

Die PET erreicht im Leipziger Stadtgebiet mit etwa 19,3 bis 45,3 °C eine Spanne von 26 K (Abbildung 22). Der höchste PET-Wert tritt in der Nähe des Augustusplatzes im Kreuzungsbereich Augustusplatz/Grimmaischer Steinweg auf. Hohe PET-Werte von über 40 °C (rot) werden auf sonnenexponierten, meist hoch versiegelten Flächen erreicht, wie etwa dem Augustusplatz, dem Wilhelm-Leuschner-Platz, der Windmühlenstraße, dem Messegelände und dem Gleisareal am Hauptbahnhof. Aber auch Ackerflächen können sich tagsüber stark aufheizen und Werte von über 40 °C erreichen, z. B. in der Mark Flickert und Engelsdorf/Baalsdorf. Bewaldete Gebiete bilden den Kontrast zu den extrem überhitzten Gebieten der Stadt. Dort fällt die PET meist unter 30 °C, wie etwa im Wald an der Chemnitzer Straße, wo mitunter auch die niedrigsten Werte erreicht werden. Ebenso dienen innerstädtische Parks und Friedhöfe als Rückzugsorte mit niedrigen PET-Werten. Auf dem Nordfriedhof, im Friedenspark und im Johannapark gibt es Bereiche unter Schatten spendenden Bäumen, in denen die PET unter 26 °C liegt. In Wohngebieten kann die PET sehr unterschiedlich je nach Baumanteil, Gebäudehöhe und –form, Oberflächenversiegelung sowie der Umgebung und vielen weiteren Faktoren ausfallen. Solche Unterschiede, die sich bereits auf einer kleinen Fläche ergeben, werden u. a. in Abbildung 23 dargestellt.

Die Abbildung zeigt die räumliche Ausprägung der PET für einen Ausschnitt nordwestlich der Leipziger Innenstadt. Die Große Wiese [1] erhitzt sich auf Werte von 34 bis 40 °C, was nicht ungewöhnlich für ausgedehnte Rasenflächen ist. Der umliegende Leipziger Auwald [2] dient als kühlende, Schatten spendende Ausgleichsfläche von 24 bis 30 °C. Ähnliche Werte wie im Leipziger Auwald werden sogar in stark begrünten, baumbestandenen Innenhöfen [3] erreicht. Ein mit Rasen versetzter Innenhof [4] ist tagsüber dagegen deutlich wärmer mit PET-Werten von 34 bis 38 °C.

⁹ Die PET wird im Gegensatz zur Lufttemperatur in der human-biometeorologisch relevanten Höhe von 1,1 m ü. Grund ausgegeben. Dies entspricht in etwa der mittleren Höhe des Körperschwerpunktes eines Menschen.

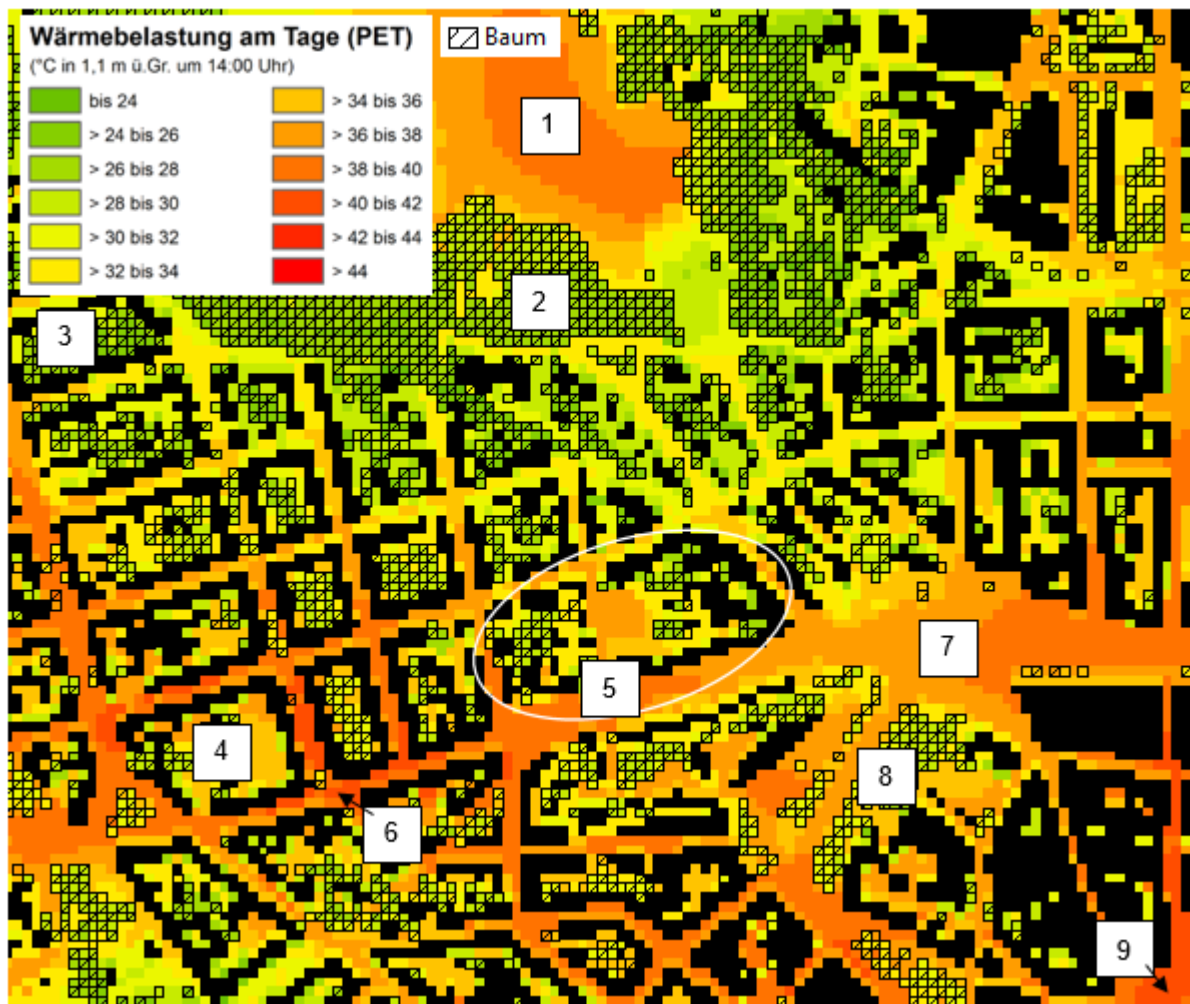


Abbildung 23: Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in 1,1 m ü. Grund um 14 Uhr nordwestlich der Leipziger Innenstadt

Die Wirkung von Verschattung, Begrünung und Versiegelung wird am Gebäudeblock Nr. [5] besonders deutlich: Im Zentrum des Blocks befindet sich ein asphaltierter Parkplatz, welcher sich auf bis zu 38 °C erhitzt. Die übrigen Bereiche des Innenhofs bestehen aus Rasen und teilversiegelten Flächen. Im Schatten der Bäume liegt die PET meist unter 30 °C. Die sonnenexponierten Rasenflächen sind mit Werten im Bereich von 30 bis 34 °C wärmer als die Baumabschnitte, jedoch kühler als der asphaltierte Parkplatz im Zentrum des Gebäudeblocks. Besonnte Straßenflächen sind tagsüber ausgesprochen warm, so auch der Kreuzungsbereich Jahnallee/Tschaikowskistraße [6] mit Werten zwischen 38 und 42 °C. Auch der versiegelte Richard-Wagner-Platz [7] erreicht hohe Werte mit bis zu 40 °C. Unter den Bäumen des südlich angrenzenden Promenadenrings [8] herrscht mit 28 bis 32 °C bereits ein deutlich angenehmeres Aufenthaltsklima. Dagegen ist der Marktplatz [9] mit 38 bis 42 °C stark bis extrem wärmebelastet.

Trotz der relativ hohen Präzision ist die PET bedingt durch die Modellauflösung von 10 Metern dennoch mit einigen Ungenauigkeiten behaftet. So müssen die Baumkronen beispielsweise groß genug sein, damit sie in den Eingangsdaten abgebildet werden können. Bäume mit kleinem Kronendurchmesser, sofern sie nicht in einer Gruppe unmittelbar nebeneinander stehen, sind daher nicht im 10 m x 10 m Raster erfasst. Dies ist insbesondere ein Problem bei Jungbäumen, die im Straßenraum gepflanzt werden (wie mit diesem Problem nachträglich umgegangen wurde, wird in Kapitel 5.1.2 beschrieben). Die Gebäude, die ebenso wie die Bäume einen Schatten werfen, müssen sehr hoch sein (> 40m), um die dahinterliegende 10 m – Gitterzelle zu verschatten und damit einen erkennbaren Effekt zu haben, da an dem angenommenen modellierten Sommertag am 21. Juni die Sonne nahezu im Zenit, also senkrecht am Himmel steht (vgl. Kap. 2.2).



4 Klimaanalysekarten

Um Aussagen über Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen untereinander abgrenzbar sein. Zum Beispiel ist die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt, auch in den Siedlungsflächen kann die bioklimatische Situation je nach Bauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren. Um diese Heterogenität in den Klimaanalyse- bzw. Planungshinweiskarten darstellen zu können, wurden Blockflächen anhand ihrer Nutzungsinformationen unterschieden und ihnen jeweils die Ergebnisse der Klimaparameter aus der Modellrechnung zugeordnet (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Kaltluftvolumenstrom, PET).

Die Klimaanalysekarte¹⁰ für die Nachtsituation bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Für die Tagsituation wurde die PET um 14:00 Uhr einschließlich ihrer Zuordnung zur thermophysiologischen Belastungsstufe herangezogen. Die Klimaanalysekarten Tag und Nacht werden im Anhang im A0-Format dargestellt.

4.1 Nachtsituation

4.1.1 Bioklimatische Belastung in den Siedlungs- und Gewerbeflächen

Die nächtliche Überwärmung des Siedlungskörpers wird in acht verschiedenen Klassen über die Lufttemperatur in 2 m ü. Grund um 4 Uhr nachts dargestellt. Mit der Lufttemperatur können Rückschlüsse über die Wärmeinselintensität der Leipziger Siedlungsflächen getroffen werden. Der nächtliche Wärmeineleffekt beruht auf dem Temperaturunterschied zwischen Siedlungsflächen zu unversiegelten Freiflächen im Untersuchungsgebiet. Unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen (vgl. Kap 2.2) weisen die Freiflächen im Stadtumland eine mittlere Lufttemperatur von 14,4 °C auf. Wird dieser Schwellwert überschritten, ist von einem Wärmeineleffekt auszugehen. Neben den absoluten Temperaturwerten und der Intensität der städtischen Wärmeinsel wurde zudem das Risiko für Tropennächte¹¹ für die entsprechenden Siedlungsflächen eingeschätzt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerbebereich (einschließlich Verkehrswege und Plätze)

Lufttemperatur (°C)	Wärmeineleffekt ggü. Umland	Risiko für Tropennächte	Flächenanteil im Siedlungsgebiet [%]
bis 14,4	nicht vorhanden	-	0,2
> 14,4 bis 15	gering	-	0,8
> 15 bis 16	gering	-	10,6
> 16 bis 17	mäßig	gering	20
> 17 bis 18	mäßig	gering	21,3
> 18 bis 19	hoch	erhöht	22
> 19 bis 20	hoch	erhöht	23,8
> 20	sehr hoch	Tropennacht	1,3

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Wohn- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet liegt bei 17,2 °C und über allen Verkehrsflächen bei 18,6 °C. Bei Betrachtung der Flächenanteile zeigt sich, dass fast die Hälfte der Flächen eine Temperatur zwischen > 18 und 20 °C aufweist. Auf diesen Flächen ist

¹⁰ Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte.

¹¹ Gemäß des DWD ist eine Tropennacht definiert als eine Nacht (18 bis 06 UTC), in der das Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt.



von einem erhöhten Risiko für Tropennächte bei Hitzeperioden und fortschreitendem Klimawandel auszugehen. Knapp ein Drittel (30,6 %) der Flächen erreichen Temperaturen zwischen > 15 und 17 °C. Temperaturextreme (≤ 15 °C und > 20 °C) treten nur punktuell auf und machen 2,3 % der Leipziger Siedlungsflächen aus, wobei 1,3 % der Flächen wärmer als 20 °C sind (Tropennächte)¹².

Diejenigen Siedlungs- und Gewerbeflächen, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom (> 50 m³/s) durchflossen werden, zählen zum **Kaltlufteinwirkungsbereich**. Er gilt als der Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Über ein Drittel (35,8 %) der Leipziger Siedlungs- und Gewerbeflächen profitieren vom Einwirken eines überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstroms.

4.1.2 Kaltluftprozessgeschehen über Grün- und Freiflächen

In der Klimaanalysekarte werden Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insb. unversiegelte Freiflächen (z. B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie z. B. Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume), doch auch Wälder können als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kap. 3.3).

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltluftaushalts dargestellt, d. h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet. Insgesamt wird der Kaltluftvolumenstrom in vier Klassen von gering (bis 25 m³/s) über mittel (> 25 bis 50 m³/s) bis hoch (> 50 bis 70 m³/s) und sehr hoch (> 70 m³/s) eingeteilt. Die Einstufung der Kaltluftlieferung von gering bis sehr hoch bezieht sich auf die Verhältnisse im Leipziger Modellrechengebiet. Zudem werden alle Strömungen ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von 0,2 m/s durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Winde in eine Zielauflösung von 200 Metern aggregiert.

Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, Wasserflächen und breite Straßenräume. Da Leitbahnen selbst ebenfalls Kaltluft produzieren können, lassen sich Freiflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf abgrenzen von Leitbahnen, die als mehr oder weniger reine „Transportwege“ fungieren. Kaltluftleitbahnen sind vorwiegend thermisch induzierte und auf das Siedlungsgebiet ausgerichtete linienhafte Strukturen, die Flurwinde in das Stadtgebiet hineinragen. Die in der Leipziger Klimaanalysekarte ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, haben einen überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom und sind vorwiegend durch eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 0,3 m/s gekennzeichnet.

Ventilationsbahnen sind raugkeitsarme Leitstrukturen, die – im Gegensatz zu Kaltluftleitbahnen – insbesondere bei austauschstärkeren Wetterlagen Kalt- und Frischluft in die überwärmte Stadt transportieren. Bei entsprechender Wetterlage bzw. Windrichtung kann die warme Luft aus der Stadt auch in Richtung des Umlandes (d. h. entgegen der in der Klimaanalysekarte dargestellten Pfeilrichtung) abtransportiert werden.

Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate, die Kaltluftleitbahnen speisen (Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw.

¹² In 12 m über dem Grund (d.h. in den oberen Geschossen) sind die Lufttemperaturen sogar höher als im 2 m-Niveau. Während der Nachtstunden bildet sich unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen eine Inversion aus (Temperaturzunahme mit der Höhe, der Boden ist die Abkühlfläche). Diese Inversion ist über Freiland zwar stärker ausgeprägt, aber macht sich dennoch auch im urbanen Bereich bemerkbar. Weiterhin unterscheiden sich die Lufttemperaturen im 12 m-Niveau nicht mehr so stark in Abhängigkeit des Bebauungstyps wie im bodennahen Bereich.



über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen. Grünflächen wurden als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichnet, wenn sie mehr als 12 m³/m²h Kaltluft produzieren (hohe Kaltluftproduktivität) bzw. mehr als 14 m³/m²h Kaltluft produzieren (sehr hohe Kaltluftproduktivität).

4.2 Tagsituation

Zur Bestimmung der **Aufenthaltsqualität am Tage** ist die PET, als thermischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung, der maßgebende Parameter (vgl. Kap. 3.4). Die Klimaanalysekarte für die Tagsituation generalisiert die Ergebnisse der rasterbasierten PET-Werte auf die Leipziger Basisgeometrie mit ihren Block- und Grün- und Verkehrsflächen. Entsprechend der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 erfolgt die Zuordnung der PET-Werte zu einer thermophysiologischen Belastungsstufe. Um die Ergebnisse möglichst differenziert darstellen zu können, werden die Belastungsstufen schwach, mäßig und stark in jeweils zwei Klassen abgebildet. Für die Grün- und Siedlungsflächen ergibt sich ein 7-stufiger Bewertungsschlüssel, der von einer schwachen Wärmebelastung bis hin zu einer extremen Wärmebelastung (> 41 °C) reicht. Für eine bessere Identifikation von Belastungs-Hotspots, wurden die PET-Werte > 41 °C rasterbasiert (statt auf die Blockfläche gemittelt) dargestellt.

Tendenziell sind die Siedlungsflächen im Leipziger Stadtgebiet am Tag stärker wärmebelastet als die Grünflächen (Tabelle 5). Während 3,6 % der Siedlungsflächen schwach wärmebelastet sind, sind es bei den Grünflächen dagegen 18 %. Umso mehr Siedlungsflächen (51,9 %) fallen hingegen in die Klasse der mäßigen Wärmebelastung. Dem stehen 36 % Flächenanteil bei den Grünflächen gegenüber. Der prozentuale Anteil an Flächen mit starker Wärmebelastung ist bei den Siedlungs- und Grünflächen relativ ähnlich: 43 % sind es bei den Siedlungsflächen, 46 % sogar bei den Grünflächen. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei einem Großteil der Grünflächen um Ackerflächen handelt (vor allem in den peripheren Bereichen), welche tagsüber einer intensiven Sonneneinstrahlung und damit verbunden einer hohen PET ausgesetzt sind¹³. Eine extreme Wärmebelastung findet sich auf 1,5 % der Siedlungsflächen, Grünflächen sind im Gegensatz dazu fast gar nicht betroffen (0,038 %).

Die PET und bzw. der Grad der Wärmebelastung am Tag wird stark durch die Art der Grün- bzw. Siedlungsfläche beeinflusst, aber auch die Lage der entsprechenden Fläche ist entscheidend. Bei einer starken Verschattung, beispielsweise durch Bäume oder Gebäude, reduziert sich die Wärmebelastung am Tag erheblich. Weiterhin sind innerstädtische Bereiche vergleichsweise stärker belastet als rural geprägte Gebiete; eine Baumallee im Zentrum der Stadt ist also tendenziell wärmer als eine Baumallee im Außenbereich.

Tabelle 5: Flächenanteile der Wärmebelastung am Tage im Siedlungsraum und auf den Grün- und Freiflächen

PET (°C)	Wärmebelastung	Siedlungsräume: Flächenanteil im Stadtgebiet [%]	Grün- und Freiflächen: Flächenanteil im Stadtgebiet [%]
bis 26	schwach	0,1	0,9
> 26 bis 29	schwach	3,5	17,1
> 29 bis 32	mäßig	16,9	13,4
> 32 bis 35	mäßig	35,0	22,6
> 35 bis 38	stark	26,5	26,4
> 38 bis 41	stark	16,5	19,6
> 41	extrem	1,5	≈0 (0,038)

¹³ Diese Flächen sind am Tag zwar stark überhitzt, können aber in der Nacht eine wichtige Funktion als Kaltluftentstehungsgebiet, Kaltluftleitbahn oder Ventilationsbahn erfüllen. Rauigkeitsarme Strukturen wie Ackerflächen begünstigen die Durchlüftung des Stadtkörpers.



5 Planungshinweiskarte

Analog zu den Klimaanalysekarten wurde eine zusammenfassende Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich nur auf das Stadtgebiet Leipzigs bezieht. In Anlehnung an die VDI 3785, Blatt 1-Richtlinie bzw. VDI 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum**. Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben. Die Planungshinweiskarte wird im Anhang im A0-Format abgebildet.

5.1 Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen (Wirkungsraum)

Der Siedlungsraum stellt den primären Wirkungsraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation geschildert.

5.1.1 Bewertung der Nachtsituation

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die Richtlinie VDI 3787, Blatt 2 11/2008 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 3787, Blatt 2 11/2008, S. 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (Umweltbundesamt 2016), während *Tropennächte* mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. Eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum (noch) nicht.

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über die nächtliche Überwärmung. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine 4-stufige Skala von *günstige bioklimatische Situation* bis *sehr ungünstige bioklimatische Situation* zugrunde (Abbildung 24).

Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen

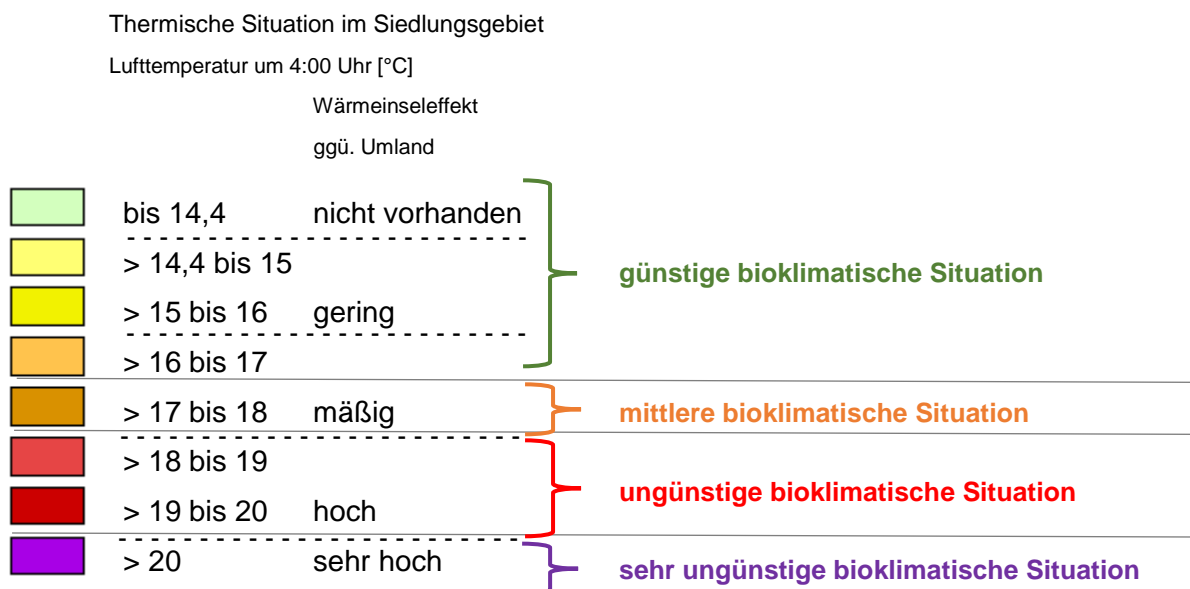


Abbildung 24: Planungshinweiskarte: Bewertung des Siedlungsraumes (Nachtsituation)

Beträgt die nächtliche Lufttemperatur nicht mehr als 17 °C, ist von einem günstigen Bioklima auszugehen. Lufttemperaturen von > 17 bis 18 °C sind der mittleren bioklimatischen Situation zuzuordnen. Zwar kann zwischen 16 und 18 °C von optimalen Schlaftemperaturen ausgegangen werden, jedoch beziehen sich die Temperaturen lediglich auf die 4 Uhr- Situation (Zeitpunkt der maximalen Abkühlung). Gegen Mitternacht können die Temperaturwerte hingegen etwa 2 °C wärmer sein. Hinzu kommt, dass lediglich



ein durchschnittlicher Sommertag am 21. Juni modelliert wurde anstelle einer extremen Hitzewelle. Weiterhin erfolgte die Zuordnung der mittleren bioklimatischen Situation unter Berücksichtigung der negativen Effekte des Klimawandels und der möglichen Nachverdichtung. Mit Temperaturen zwischen > 18 und 20 °C (hoher Wärmeineffekt – erhöhtes Risiko für Tropennächte) liegt eine ungünstige bioklimatische Situation vor. Bei über 20 °C (sehr hohe Wärmeinselintensität – Tropennacht) ist von einer sehr ungünstigen bioklimatischen Situation auszugehen.

5.1.2 Bewertung der Tagsituation

Zur Bewertung der Tagsituation wurde – wie bereits in der Klimaanalysekarte – der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen. Die Bewertung der thermischen Belastung im Stadtgebiet Leipzigs orientiert sich an den physiologischen Belastungsstufen des thermischen Empfindens. Wie schon für die Bewertung der Nachtsituation untergliedert sich die bioklimatische Situation in vier Stufen von günstig bis sehr ungünstig (Abbildung 25). Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Maß für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen außerhalb von Gebäuden. Dieses übt einen gewissen Einfluss auf die Situation innerhalb der Gebäude aus, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren Faktoren ab und kann hier nicht bestimmt werden.

Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen

Bioklimatische Situation
Basierend auf der PET um 14:00 Uhr








	bis 26 °C	Schwache Wärmebelastung	günstige bioklimatische Situation
	> 26 bis 29 °C		
	> 29 bis 32 °C	Mäßige Wärmebelastung	mittlere bioklimatische Situation
	> 32 bis 35 °C		
	> 35 bis 38 °C		
	> 38 bis 41 °C	Starke Wärmebelastung	ungünstige bioklimatische Situation
	> 41 °C	Extreme Wärmebelastung	sehr ungünstige bioklimat. Situation

Abbildung 25: Planungshinweiskarte: Bewertung des Siedlungsraumes (Tagsituation)

Für die Bewertung der Verkehrsflächen wurde zusätzlich das Straßenbaumkataster (2016) hinzugezogen. Letzteres enthält auch kleinkronige Straßenbäume, die bedingt durch die Rasterauflösung von 10 Metern im Modell nicht berücksichtigt werden konnten. Beträgt bei einer Verkehrsfläche der Flächenanteil dieser kleinkronigen Bäume mindestens 10 %, so verbessert sich die bioklimatische Situation um eine Stufe.

5.2 Bewertung der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)

Im Gegensatz zur Klimaanalysekarte stehen in der Planungshinweiskarte die stadtklimatische Bedeutung von Grünflächen sowie die Ableitung deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es in Hinblick auf planungsrelevante Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeord-



net ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen wurde ein teilautomatisiertes Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt.

Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation getrennt bewertet und in vier Stufen eingeteilt. Die Bewertung ist auf die Funktion für den Siedlungsraum ausgerichtet, d. h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet¹⁴. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden. Die Grünflächen sind außerdem hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit aus thermisch hoch belasteten Siedlungsräumen eingeteilt.

5.2.1 Bewertung der Grünflächen in der Nacht

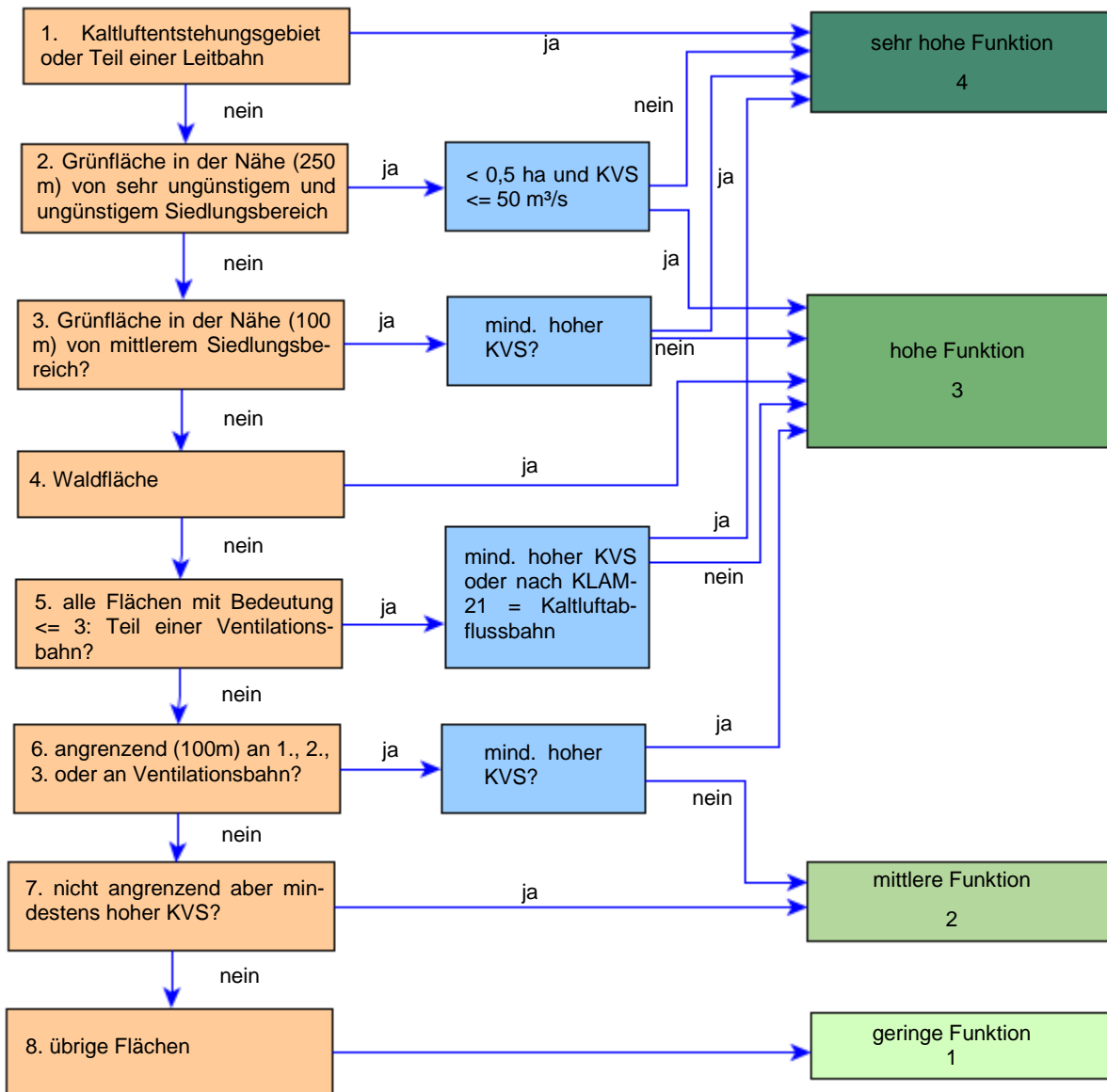


Abbildung 26: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht

¹⁴ Selbst ohne Siedlungsbezug bzw. Funktion für das Kaltluftprozessgeschehen sind Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht bebauten Flächen zu bevorzugen, sodass die Klasse *Sehr geringe Funktion* nicht vergeben wurde.



Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten Kaltluftentstehungsgebiete¹⁵ bzw. Grünflächen als Teil einer Kaltluftleitbahn die höchste Bedeutung (vgl. Abbildung 26, welche das gesamte Bewertungsschema zusammenfasst). Auch die Menge der über einer Fläche strömenden Kaltluft und die Größe einer Grünfläche spielt eine Rolle. Als wichtiger Grenzwert dient der (überdurchschnittlich) hohe Kaltluftvolumenstrom von mindestens 50 m³/s. Ab einer Größe einer Grünfläche von 0,5 ha¹⁶ wird davon ausgegangen, dass diese eine klimatische Wirksamkeit in ihre Umgebung entfaltet. Somit ist dieses Größenkriterium ein weiterer wichtiger Bestandteil in der Bewertung der Grünflächen als Ausgleichsraum.

Zusätzlich wurde die Entfernung zu belasteten Siedlungsräumen berücksichtigt – da in der Nachtsituation die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht, wurden dabei der Bewertung nur die bewohnten Siedlungsflächen (mindestens 5 Einwohner pro ha) zugrunde gelegt. Die übrigen Flächen werden den Gewerbeflächen zugeordnet, sofern es sich nicht um Verkehrsflächen (Straßen, Plätze, Gleise) handelt.

5.2.2 Bewertung der Grünflächen am Tage

Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen hauptsächlich auf der Entfernung¹⁷ zu belasteten Siedlungs- und Gewerberäumen sowie der PET um 14 Uhr. Insbesondere Bäume können durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

Grünflächenklima				
Erreichbarkeit	günstig	mittel	ungünstig	sehr ungünstig
1. Grünfläche sehr gut (250 m) erreichbar aus Siedlungsflächen sehr ungünstiger und ungünstiger bioklimatischer Situation	4	4	2	1
2. Grünfläche gut erreichbar aus Siedlungsflächen sehr ungünstiger und ungünstiger (500 m) bzw. mittlerer (250 m) bioklimatischer Situation	4	3	2	1
3. Grünfläche gut erreichbar aus Siedlungsflächen mittlerer (500 m) bzw. günstiger (250 m) bioklimatischer Situation	3	2	2	1
4. übrige Flächen	3	2	1	1

Abbildung 27: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage

¹⁵ Eine Grünfläche wurde als Kaltluftentstehungsgebiet definiert, wenn 30 % der entsprechenden Grünfläche eine sehr hohe Kaltluftproduktionsrate von mindestens 14 m³/m²h aufweist.

¹⁶ In diesem Falle werden zusammenhängende Grünflächen betrachtet. Direkt benachbarte Grünflächen wurden zu einer gemeinsamen Grünfläche zusammengefasst.

¹⁷ Die Entfernung basiert auf Luftlinie ohne die tatsächliche Wegeführung zu berücksichtigen (Ampeln, kein Durchgang, etc.).



Analog zur Bewertung des Siedlungsraums am Tag (vgl. Kap.5.1.2, Abbildung 25) erfolgt eine 4-stufige Einteilung des (Grünflächen-)Bioklimas anhand der physiologischen Belastungsstufen des thermischen Empfindens. So ist bei einer PET bis max. 29 °C von einem günstigen Grünflächenklima die Rede. Grünflächen mit einer PET zwischen > 29 und 35 °C haben ein mittleres Grünflächenklima. Bei Werten zwischen > 35 und 41 °C handelt es sich um ein ungünstiges Grünflächenklima und ab einer PET von über 41 °C um ein sehr ungünstiges Grünflächenklima. Dieses auf der PET basierende Bewertungsschema wird in Kombination mit der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerbeflächen als Parameter zur Beschreibung der Aufenthaltsqualität am Tage genutzt. Der Einstufung liegt der in Abbildung 27 dargestellte Bewertungsschlüssel zugrunde. Bei einer Entfernung von 250 m ist von einer sehr guten fußläufigen Erreichbarkeit (5 Gehminuten) und bei einer Entfernung von 500 m von einer guten fußläufigen Erreichbarkeit (10 Gehminuten) auszugehen.

5.3 Verknüpfung der Planungshinweiskarten Tag und Nacht zu einer gesamten Karte

In der Planungshinweiskarte wird eine flächendeckende Bewertung der stadtklimatischen Situation dargestellt. Sie fasst die Situation am Tage und in der Nacht in einer Karte zusammen und stellt die fachliche Informations- und Abwägungsgrundlage sowohl für gesamtstädtisch als auch für teilräumlich ausgerichtete Planungen dar. Den Ausgleichsräumen (Grün- und Freiflächen) liegt eine 5-stufige Bewertung hinsichtlich ihrer klimaökologischen Funktionalität zugrunde. Die thermische Situation in den Wirkungsräumen (Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen) wird durch eine 4-stufige Skala von günstig bis sehr ungünstig repräsentiert.

Die Gesamtbewertung für die Grünflächen ergibt sich aus der Kombination von Tag- und Nachtbewertung entsprechend der in Tabelle 6 dargestellten Verrechnungsvorschrift. Je dunkler der Farbton, desto größer ist die Bedeutung der Grünfläche in der Gesamtheit. Demnach steht die Zahl 1 für eine sehr geringe klimaökologische Funktion, wogegen die Zahl 5 eine sehr hohe klimaökologische Funktion beschreibt. Während in der Einzelbewertung (Tag- bzw. Nachtsituation) eine 4-stufige Bewertung vorliegt, reicht die Skala in der Gesamtbewertung bis 5. Um die Grünflächen hervorzuheben, die sowohl am Tag als auch in der Nacht die höchste Bedeutung haben, wurde die 5. Klasse der sehr hohen klimaökologischen Funktion eingeführt. Hierbei handelt es sich um Flächen, die in jedem Falle erhalten bleiben sollen und grundsätzlich von Bebauung freizuhalten sind.

Tabelle 6: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Grünflächen

Grünflächen		Bedeutung in der Nacht			
		1	2	3	4
Bedeutung am Tag	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	4
	3	2	3	4	4
	4	3	4	4	5

Bei den Siedlungsflächen muss in der Gesamtbewertung zwischen unbewohnten (< 5 Einwohner pro ha) und bewohnten (≥ 5 Einwohner pro ha) Arealen unterschieden werden. Die unbewohnten Flächen werden im Folgenden als Gewerbe- und Verkehrsflächen definiert. Bei letzteren ist die Aufenthaltsqualität am Tage deutlich entscheidender als in der Nachtsituation. Es ist davon auszugehen, dass sich nachts nicht so viele Menschen auf den unbewohnten Flächen aufhalten wie im bewohnten Siedlungsraum. Vor diesem Hintergrund erhält die Tagsituation bei den unbewohnten Flächen eine stärkere Gewichtung als die Nachtsituation. Daraus ergibt sich die in Tabelle 7 dargestellte Verrechnungsvorschrift. Nur wenn die nächtliche Überwärmung in der höchsten Klasse (4) liegt, nimmt dies Einfluss auf die Gesamtbewertung. In allen anderen Fällen entscheidet die Tagsituation über die abschließende Gesamtbewertung.

Bei den bewohnten Siedlungsflächen fällt hingegen die nächtliche Lufttemperatur stärker ins Gewicht als bei den Gewerbe- und Verkehrsflächen. Zur Gewährleistung eines erholsamen Schlafes darf die Lufttemperatur in der Nacht nicht zu hoch ausfallen. Gleichzeitig ist in den Wohngebieten das Klima am



Tag von Bedeutung, weshalb Tag- und Nachtsituation nahezu gleichermaßen gewichtet werden. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die in Tabelle 8 dargestellte Verrechnungsvorschrift.

Tabelle 7: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Gewerbe- und Verkehrsflächen

Gewerbe- und Verkehrsflächen		Nächtliche Überwärmung			
		1	2	3	4
PET 14 Uhr	1	1	1	1	2
	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	4
	4	4	4	4	4

Tabelle 8: Verrechnungsvorschrift zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation für Siedlungsflächen

Siedlungsflächen		Nächtliche Überwärmung			
		1	2	3	4
PET 14 Uhr	1	1	2	3	3
	2	1	2	3	4
	3	2	3	4	4
	4	3	3	4	4

5.4 Ergebnisse

Die Planungshinweiskarte für die Stadt Leipzig bewertet die räumlichen klimatischen Auswirkungen im Siedlungsraum (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume. Sie fasst Tag- und Nachtsituation in einer Karte zusammen (vgl. Kap.0), wengleich auch Einzelbewertungen für die beiden Situationen (vgl. Kap. 5.1 und 5.2) vorliegen. Neben der Bewertung der Wirkungs- und Ausgleichsräume sind in der Planungshinweiskarte der nächtliche Kaltlufthaushalt und Luftaustausch dargestellt. Dazu zählen das Strömungsfeld, die Kaltluftleitbahnen, die Ventilationsbahnen, die Kaltluftentstehungsgebiete und der Kaltlufteinwirkungsbereich. Die Elemente des nächtlichen Luftaustausches und Kaltlufthaushaltes wurden bereits in der Klimaanalysekarte dargestellt und unter methodischen Gesichtspunkten beschrieben (vgl. 4.1.2).

5.4.1 Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)

In der Planungshinweiskarte werden die Grünflächen hinsichtlich ihrer klimaökologischen Funktionalität, ihrer Möglichkeit der Optimierung und ihrer Bebaubarkeit bewertet (Abbildung 28).

Beispiele für Grünflächen mit sehr hoher Funktionalität (27,2 % der Grünflächen) sind der Friedenspark, der Lene-Voigt-Park, der Johannapark, der Leipziger Auwald, der Mariannenpark mit der benachbarten Kleingartenkolonie „An der Parthe“ und der Fockeberg. Diese Flächen spielen eine sehr wichtige Rolle für den nächtlichen Kaltlufthaushalt, haben gleichzeitig eine hohe Aufenthaltsqualität am Tage und befinden sich in fußläufiger Erreichbarkeit zu wärmebelasteten Siedlungsflächen.

Fast jede zweite Grünfläche besitzt eine hohe Funktionalität (Flächenanteil 49,8 %). Dazu zählen beispielsweise der Clara-Zetkin-Park, der Kleingartenverein Paradies, die Naturschutzgebiete Elster-Pleiß-Auwald und Lehmlache Lauer sowie die Kaltluftentstehungsgebiete Leipzig Mark Flickert und der Ackerflächen zwischen Hirschfeld, Baalsdorf, Engelsdorf, Sommerfeld und Althen, welche eine hohe Kaltluftproduktivität aufweisen. Grünflächen dieser Kategorien erfüllen nur zu einer Tageszeit optimale



klimaökologische Bedingungen (z. B. Kaltluftentstehungsgebiete in der Nacht, innerstädtische Parks mit hohem Baumanteil vorwiegend am Tag) oder sind tagsüber und nachts gleichermaßen (hoch, aber nicht sehr hoch) bedeutsam.

Zu den Ausgleichsräumen mittlerer Funktionalität (13,4 % der Grünflächen) gehören z. B. die Burgaue, die Kleingartenkolonie Lindenthal West, ein Großteil der Acker- und Freiflächen Holzhausens, das Beleitgrün am Roßplatz und die Grünflächen am Bayrischen Platz. Die Grünflächen dieser Kategorie könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird.

Die Frei- und Ackerflächen südlich von Grünau, die Kleingartenkolonie an der Lauer, die Sportplätze des Liebertwolkwitz e.V. sowie die Frei- und Ackerflächen westlich von Gottscheina haben nur eine geringe Funktionalität (8,4 % der Grünflächen). Sowohl am Tag als auch in der Nacht erfüllen Ausgleichsräume dieser Kategorie keine optimalen Funktionen.

Grünflächen mit einer sehr geringen Funktionalität machen nur 1,2 % der Ausgleichsräume aus. Beispiele sind die Flächen westlich von Porsche bzw. der Radefelder Allee, ein Areal nördlich der A14 bei der Delitzscher Landstraße und das Partheufer im Bereich der Rackwitzer Straße. Die meisten Flächen dieser Art befinden sich am Stadtrand. Ihre klimaökologische Bedeutsamkeit ist tagsüber und nachts nur gering.

Grün- und Freiflächen - Funktionalität

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden.






	Sehr hohe	Flächenanteil 27,2 %	Räume mit einer sehr hohen klimaökologischen Funktion: Die von diesen Grünflächen bereitgestellten Ökosystemdienstleistungen sollen mithilfe der Vernetzung und Durchströmbarkeit erhalten bleiben. Flächen dieser Kategorie sind grundsätzlich von Bebauung freizuhalten.
	Hohe	Flächenanteil 49,8 %	Räume mit einer hohen klimaökologischen Funktion: Die von diesen Grünflächen bereitgestellten Ökosystemdienstleistungen sollen mithilfe der Vernetzung, Durchströmbarkeit und ggf. der Erhöhung der Mikroklimavielfalt optimiert werden. Bauliche Eingriffe sind äußerst maßvoll zu gestalten; den Anwohnern ist eine ausreichende Grünversorgung zu gewährleisten. Negative Auswirkungen auf die Grünfläche selbst und umliegenden Flächen sollen vermieden werden. Luftleitbahnen und Ventilationsbahnen sollten von Bebauung freigehalten werden.
	Mittlere	Flächenanteil 13,4 %	Räume mit einer mittleren klimaökologischen Funktion (innerstädtisch: wertvolle Klimakomfortinseln; außerhalb: Vernetzungsflächen mit hohem Kaltluftvolumenstrom): Die von diesen Grünflächen bereitgestellten Ökosystemdienstleistungen sollen mithilfe der Vernetzung, Durchströmbarkeit und der Verbesserung der Mikroklimavielfalt erhöht werden. Bauliche Eingriffe sind maßvoll zu gestalten; den Anwohnern ist eine ausreichende Grünversorgung zu gewährleisten. Negative Auswirkungen auf die Grünfläche selbst und umliegenden Flächen sollen vermieden werden.
	Geringe	Flächenanteil 8,4 %	Räume mit einer geringen klimaökologischen Funktion (Vernetzungsfläche von Kaltluftproduktionsflächen im Umland mit dem Siedlungsraum): Die von diesen Grünflächen bereitgestellten Ökosystemdienstleistungen sollen mithilfe der Vernetzung und Durchströmbarkeit erhöht werden. Bauliche Eingriffe sind derart zu gestalten, dass negative Auswirkungen auf umliegenden Flächen vermieden werden.
	Sehr geringe	Flächenanteil 1,2 %	Räume mit einer sehr geringen klimaökologischen Funktion: Eine Bebauung ist aus klimaökologischer Sicht möglich; eine Zersiedelung sollte jedoch vermieden werden.

Abbildung 28: Grün- und Freiflächen in der Planungshinweiskarte: Beschreibung der Klassen und Flächenanteile

5.4.2 Siedlungsraum (Wirkungsraum)

In der Planungshinweiskarte werden die Siedlungsräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet. Wohn- und Gewerbegebiete sind separat von den Verkehrswegen und Plätzen zu betrachten, da sich hier andere Planungshinweise ergeben. Die Planungshinweise für die Wohn- und Gewerbegebiete beschreiben die Notwendigkeit von (Klimaanpassungs-) Maßnahmen und liefern Informationen über die Machbarkeit und Gestaltung von Nachverdichtungsvorhaben (Abbildung 29).



Über ein Drittel (35,6 %) der Leipziger Siedlungsflächen sind durch eine günstige thermische Situation gekennzeichnet. Beispiele hierfür sind die Einzel- und Reihenhaussiedlungen in den Ortsteilen Leutzsch, Mockau, Großwiederitzsch und Meusdorf. Eine lockere Bebauung begünstigt zum einen die nächtliche Durchlüftung und sorgt mit einem hohen Grün-(insbesondere Baum-)anteil für ein thermisches Wohlbefinden am Tag.

Ein Großteil der Wohn- und Gewerbeflächen in der Südvorstadt, im Zentrum-West, in Gohlis-Süd und in Abnandorf zählen zu den Wirkungsräumen mit einer mittleren Funktionalität. 28,5 % der Siedlungsflächen fallen in diese Kategorie. Hierbei handelt es sich vor allem um Zeilenbau und halboffene Blockrandbebauung, welche die Kaltluftströmung nur begrenzt durchlassen und über einen mittleren Grünanteil verfügen.

Siedlungsraum - Thermische Situation

Bewertung der Siedlungsflächen durch Verschneidung der Tag- und Nachtsituation. Bei Flächen mit weniger als 5 Einwohnern/ha richtet sich die Bewertung v.a. nach der Tagsituation.

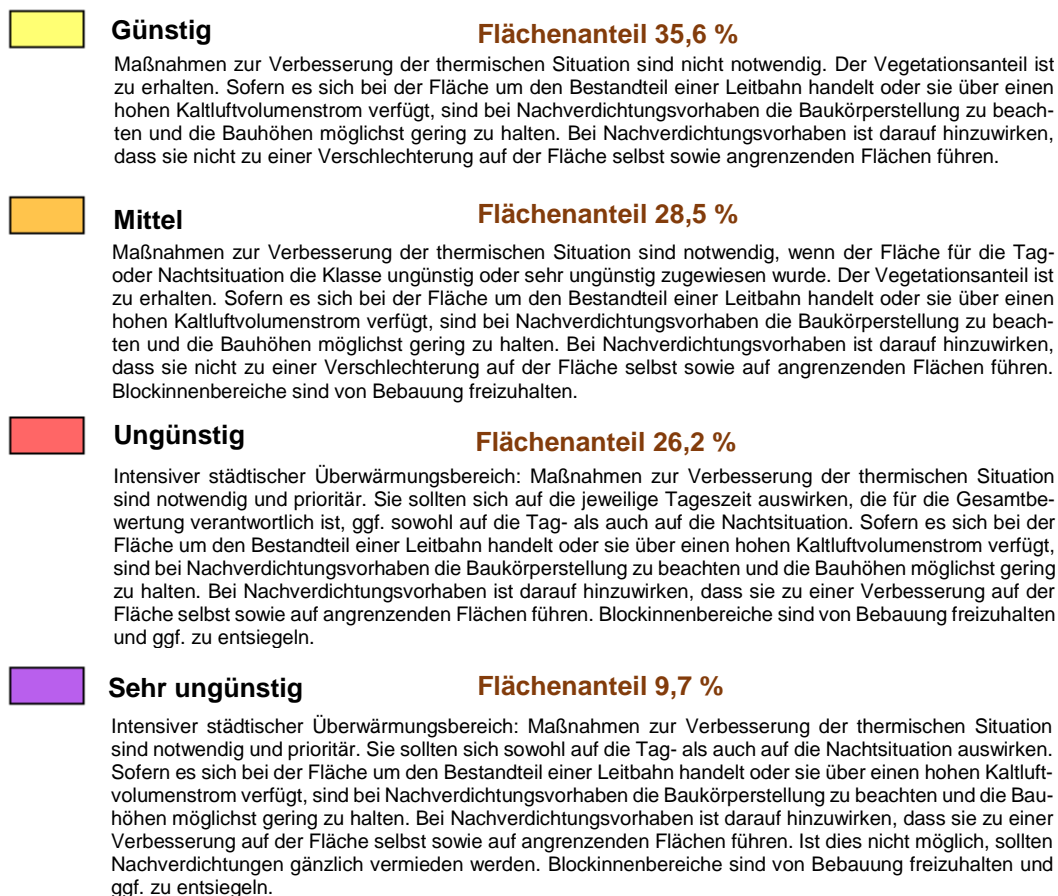


Abbildung 29: Siedlungsraum in der Planungshinweiskarte: Beschreibung der Klassen und Flächenanteile

26,2 % der Siedlungsflächen weisen ungünstige thermische Bedingungen auf. Dazu zählen Gohlis-Mitte und das nordwestliche Wohngebiet am Rande des Leipziger Zentrums. Beispiele für Gewerbeflächen sind das BMW-Werk, das Messegelände sowie das Porsche Werk.

Knapp ein Zehntel (9,7 %) der Siedlungsflächen sind durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. Dazu zählen einige Zentrumsbauten in der Innenstadt (Höfe am Brühl, Mädler Passage) und das Gewerbegebiet zwischen Berliner Straße, Theresienstraße, Wittenberger Straße und den Gleisanlagen. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und/oder eine mangelnde Verschattung. Die Planungshinweiskarte zeigt, dass nicht allein die Innenstadt von einer sehr ungünstigen thermischen Situation betroffen ist. Letzteres gilt sowohl für den bewohnten als auch für den unbewohnten Bereich, wobei Gewerbeflächen im Vergleich zu Wohngebieten tendenziell ungünstigere Bedingungen aufweisen.



5.4.3 Verkehrswege und Plätze (Wirkungsraum)

In den Planungshinweisen für die Verkehrswege und Plätze wird die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen und lufthygienischen Situation beschrieben (Abbildung 30).

Thermisch günstige Bedingungen liegen auf nur 4,6 % der Verkehrswege und Plätze vor. Beispiele hierfür sind die Karl-Tauchnitz-Straße (entlang des Clara-Zetkin-Parks und des Johannaparks) und ein größerer, an ein Waldstück angrenzender Abschnitt der Permoserstraße. Die Permoserstraße wird zudem durch eine drei-reihige Baumallee verschattet, was sich positiv auf die Klimasituation am Tage auswirkt.

Ein Beispiel für eine mittlere thermische Situation (26,6 % der Verkehrswege und Plätze) stellt der Platz am Sportforum (Süd) dar, welcher durch einen verhältnismäßig hohen Baumanteil geprägt ist. In diese Kategorien fallen auch gut verschattete Straßenabschnitte (insbesondere Alleen) und Straßen in der Nähe von größeren, kühlen Grünflächen.

Verkehrswege und Plätze - Thermische Situation

Bewertung richtet sich hauptsächlich nach der Tagsituation.





	Günstig	Flächenanteil 4,6 %
	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Sofern es sich um den Bestandteil einer Leitbahn (oder Flächen mit hohem Kaltluftvolumenstrom) mit einer erhöhten oder sehr hohen lufthygienischen Belastung handelt, ist auf die Reduzierung von Verkehrsemissionen hinzuwirken.	
	Mittel	Flächenanteil 26,6 %
	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nur notwendig, wenn eine in der Nachtsituation ungünstig eingestufte Siedlungsfläche unmittelbar angrenzt. Sofern es sich um den Bestandteil einer Leitbahn (oder Flächen mit hohem Kaltluftvolumenstrom) mit einer erhöhten oder sehr hohen lufthygienischen Belastung handelt, ist auf die Reduzierung von Verkehrsemissionen hinzuwirken.	
	Ungünstig	Flächenanteil 64,3 %
	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Sie sollten vor allem eine Wirkung für die Tagsituation entfalten. Wenn eine in der Nachtsituation als ungünstig eingestufte Siedlungsfläche unmittelbar angrenzt, sind zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung durchzuführen. Sofern es sich um den Bestandteil einer Leitbahn (oder Flächen mit hohem Kaltluftvolumenstrom) mit einer erhöhten oder sehr hohen lufthygienischen Belastung handelt, ist auf die Reduzierung von Verkehrsemissionen hinzuwirken.	
	Sehr ungünstig	Flächenanteil 4,5 %
	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sie sollten vor allem eine Wirkung für die Tagsituation entfalten. Wenn eine in der Nachtsituation als ungünstig eingestufte Siedlungsfläche unmittelbar angrenzt, sind zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung durchzuführen. Sofern es sich um den Bestandteil einer Leitbahn (oder Flächen mit hohem Kaltluftvolumenstrom) mit einer erhöhten oder sehr hohen lufthygienischen Belastung handelt, ist auf die Reduzierung von Verkehrsemissionen hinzuwirken.	

Abbildung 30: Verkehrswege und Plätze in der Planungshinweiskarte: Beschreibung der Klassen und Flächenanteile

Der Großteil von Leipzigs Verkehrsflächen (64,3 %) ist von einer ungünstigen thermischen Situation geprägt. Großflächig ist dies auf dem Gleisareal nördlich des Hauptbahnhofs zu beobachten, jedoch sind auch typische Aufenthaltsbereiche wie der Willy-Brandt-Platz und der Wilhelm-Leuschner-Platz von einer thermisch ungünstigen Situation betroffen.

Ein kleiner Teil (4,5 % der Verkehrswege und Plätze) weist sogar sehr ungünstige thermische Bedingungen auf. Beispiele hierfür sind der sehr zentral gelegene Augustusplatz sowie der Marktplatz. Auch die von diesen Plätzen umgebenden Straßen, wie die Grimmaische Straße, Nikolaistraße, Reichsstraße und Neumarkt sind zum Teil ähnlich belastet.

5.4.4 Kaltfluthaushalt

Neben der Bewertung von Grün-, Frei-, Siedlungs- und Verkehrsflächen steht in der Planungshinweiskarte Leipzig auch der nächtliche Luftaustausch, insbesondere der Kaltfluthaushalt, im Fokus.

Insgesamt sind 11 Kaltluftleitbahnbereiche ausgewiesen, die sich im Prozessumfeld des Leipziger Stadtgebiets befinden. Sie verteilen sich um das gesamte Stadtgebiet und sind an Strukturen wie weitläufige Grün-/Freiflächen am Stadtrand oder gar Flussläufe gebunden. Daneben gibt es viele Bereiche,



die zwar nicht als übergeordnete Kaltluftleitbahn ausgewiesen wurden, in denen die Flurwinde lokal dennoch eine wichtige Durchlüftungsfunktion erfüllen.

Das in der Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte dargestellte Kaltluftprozessgeschehen und damit auch die ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen basieren auf der Annahme einer autochthonen Wetterlage. (Das Elsterbecken ist keine Kaltluftleitbahn, sondern dient eher als raugkeitsarme Schneise und wird daher als Ventilationsbahn – d. h. bei austauschstärkeren Wetterlagen von Bedeutung – ausgewiesen. Daneben gibt es eine Reihe weiterer Ventilationsbahnen, die in der Karte durch eine schwarze Pfeilsignatur kenntlich gemacht sind, jedoch nicht zu den Kaltluftleitbahnbereichen zählen.)

Übergeordnete Kaltluftleitbahnen für die Stadt Leipzig sind: die Leitbahnen im Bereich Eutritzsch/Wiederitzsch, das Parthetal nordöstlich der Innenstadt, die Leitbahn Heiterblick-Paunsdorf, sowie die Leitbahnen Mölkau, Zentrum-Ost, Stötteritz-Volksmarsdorf, Prager Straße (Reudnitz) und Connewitz-Südvorstadt. Diese Leitbahnen sind auf den zentralen Bereich der Stadt ausgerichtet und haben daher eine hochrangige Bedeutung.

Daneben gibt es weitere Kaltluftleitbahnen, die die äußeren Bereiche der Stadt mit Kaltluft versorgen. Dazu zählen die Leitbahnen Wahren, Lindenau, Schönau, Seehausen und Lößnig.



Literaturverzeichnis

- Behrens, Ursel & Hoffmann, Kristin (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst) (2016): Bericht – Stadtklimatische Untersuchungen in Leipzig. Ergebnisse statistischer Auswertungen langjähriger Klimareihen sowie temporärer Stations- und Profilmessungen. Deutscher Wetterdienst Potsdam.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hg.) (1988): Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Bonn.
- DWD: Wetterlexikon. Klimatologische Referenzperiode. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101456>, zuletzt geprüft am 09.01.2019.
- DWD (Deutscher Wetterdienst, Hrsg.) (2017): Kaltluftabflusssimulationen mit KLAM_21 für die Stadt Leipzig und Umgebung. Deutscher Wetterdienst Offenbach.
- Gross, Günter (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. In: *Beitr. Phys. Atmosph.* (62), S. 57–72.
- Gross, Günter (1993): Air Flow Around and Through Individual Trees. In: D. Barsch, I. Douglas, F. Joly, M. Marcus, B. Messerli und Günter Groß (Hg.): Numerical Simulation of Canopy Flows, Bd. 12. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Series in Physical Environment), S. 34–91.
- Gross, Günter (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. In: *metz* 11 (4), S. 295–302. DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0295.
- Häckel, Hans (2012): Meteorologie. 7., korrigierte Auflage. Stuttgart: Ulmer (UTB Geowissenschaften, Agrarwissenschaften, 1338).
- Hupfer, P., Kuttler, W. (2006): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. Auflage. Teubner Verlag.
- Jendritzky, Gerd (1990): Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. Hannover: ARL (Beiträge, 114).
- Kuttler, Wilhelm (2009): Klimatologie. Paderborn: Schöningh (Grundriss allgemeine Geographie, 3099).
- Statistisches Landesamt Sachsen (2019): Statistik. Online verfügbar unter <https://www.statistik.sachsen.de/>, zuletzt geprüft am 29.10.2019.
- Steinicke & Streifeneder (2010): Stadtklimauntersuchung Leipzig.
- Malberg, Horst (1985): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-08701-5>.
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. In: *Atmospheric Environment* (1967) 7 (8), S. 769–779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6.
- Oke, Timothy R.; Mills, G.; Christen, A.; Voogt, J. A. (2017): Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, H.; Höppe, P. (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. In: *Theor Appl Climatol* 38 (1), S. 43–49. DOI: 10.1007/BF00866252.
- Schönwiese, Christian-Dietrich (2013): Klimatologie. 31 Tabellen im Text und umfangreicher Tabellenanhang. 4., überarb. und aktualisierte Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB, 1793).
- Umweltbundesamt (2016): Heizen, Raumtemperatur. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur, zuletzt aktualisiert am 20.12.2018.
- WMO (1996): Climatological normals (CLINO) for the period 1961 - 1990. Normales climatologiques (CLINO) pour la période 1961 - 1990. Geneva (WMO, 847).



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 05.05.2020

Erstellt von:

Josephine Förster (M.Sc. Geographie)

Geprüft von:

Dipl.-Geogr. Peter Trute

Die Erstellung der Klimaexpertise erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach besten Wissen und Gewissen. Die Klimaexpertise bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei der Auftraggeberin.

Anhang