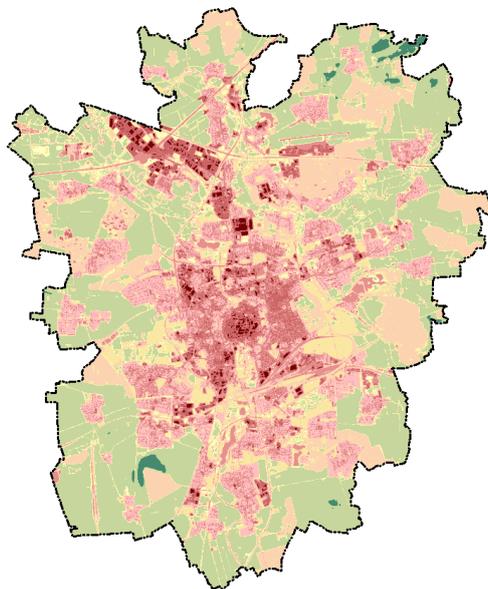




Braunschweig

Die Löwenstadt

Stadtklimaanalyse Braunschweig 2017



Teil I: Modellergebnisse und Planungskarten

Stadt Braunschweig
FB Stadtplanung u. Umweltschutz
Abteilung Umweltschutz

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



Veröffentlichung:
Dezember 2017



Inhaltsverzeichnis

Glossar	-----	III
1 Ziele und Analyseansatz	-----	1
1.1 Bisherige Stadtklimatische Untersuchungen	-----	1
1.2 Schlussfolgerungen	-----	2
2 Fachliche Grundlagen	-----	3
2.1 Der Stadtklimaeffekt	-----	3
2.2 Meteorologische Basisdaten für den Raum Braunschweig	-----	5
2.2.1 Untersuchungsgebiet	-----	5
2.2.2 Klimadaten	-----	5
2.3 Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen	-----	8
3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	-----	9
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	-----	9
3.2 Betrachtete Wetterlage	-----	11
3.3 Eingangsdaten	-----	11
4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter	-----	13
4.1 Vorgehensweise	-----	13
4.2 Nächtliches Temperaturfeld	-----	13
4.3 Kaltluftströmungsfeld	-----	15
4.4 Kaltluftvolumenstrom	-----	17
4.5 Thermische Belastung am Tage	-----	19
5 Klimaanalysekarten	-----	22
5.1 Vorgehensweise	-----	22
5.2 Ergebnisse	-----	22
5.2.1 Nachtsituation	-----	22
5.2.2 Tagsituation	-----	26
6 Planungshinweiskarten	-----	28
6.1 Vorgehensweise	-----	28
6.1.2 Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen (Wirkungsraum)	-----	29
6.1.3 Bewertung der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	-----	30
6.2 Ergebnisse	-----	34
7 Zusammenfassung und Ausblick	-----	42
Quellenverzeichnis	-----	44
Anhang	-----	46



Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: PRINZIPIKIZZE FLURWIND.....	3
ABB. 2: GELÄNDEHÖHEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	4
ABB. 3: MONATLICHE LUFTTEMPERATUR- UND NIEDERSCHLAGSWERTE IM 30-JÄHRIGEN MITTEL	6
ABB. 4: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG FÜR DEN ZEITRAUM 1981-2010 AN DER DWD-STATION BRAUNSCHWEIG-VÖLKENRODE.....	7
ABB. 5: TEMPERATURVERLAUF UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT VERSCHIEDENER LANDNUTZUNGEN	10
ABB. 6: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION	12
ABB. 7: NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BRAUNSCHWEIG MIT BEISPIELHAFTEN WERTEN VERSCHIEDENER NUTZUNGSSTRUKTUREN.....	15
ABB. 8: NÄCHTLICHER STRÖMUNGSFELD IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BRAUNSCHWEIG.....	17
ABB. 9: PRINZIPIKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM.....	18
ABB. 10: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BRAUNSCHWEIG	19
ABB. 11: WÄRMEBELASTUNG AM TAGE IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS BRAUNSCHWEIG MIT BEISPIELHAFTEN WERTEN VERSCHIEDENER NUTZUNGSSTRUKTUREN.....	21
ABB. 12: KLIMAAANALYSEKARTE NACHTSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES BRAUNSCHWEIGER STADTGEBIETS	25
ABB. 13: KLIMAAANALYSEKARTE TAGSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES BRAUNSCHWEIGER STADTGEBIETS.....	27
ABB. 14: VERANSCHAULICHUNG DER STANDARDISIERUNG ZUR VERGLEICHENDEN BEWERTUNG VON PARAMETERN (z-TRANSFORMATION) ...	28
ABB. 15: BEWERTUNGSSCHEMA ZUR BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT	32
ABB. 16: BEWERTUNGSSCHEMA ZUR BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN AM TAGE	34
ABB. 17: PLANUNGSHINWEISKARTE NACHTSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES BRAUNSCHWEIGER STADTGEBIETS	40
ABB. 18: PLANUNGSHINWEISKARTE TAGSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES BRAUNSCHWEIGER STADTGEBIETS	41

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: LUFTTEMPERATUR (2 M ÜBER GRUND), NIEDERSCHLAG UND WINDGESCHWINDIGKEIT (10 M ÜBER GRUND) IM LANGJÄHRIGEN MITTEL AN DER DWD-STATION BRAUNSCHWEIG VÖLKENRODE.....	5
TABELLE 2: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN FÜR DEN BEWERTUNGSINDEX PET WÄHREND DER TAGESSTUNDEN.	20
TABELLE 3: FLÄCHENANTEILE DER NÄCHTLICHEN ÜBERWÄRMUNG IM SIEDLUNGS- UND GEWERBERAUM.	23
TABELLE 4: AUSGEWIESENE KALTLUFTLEITBAHNEN BZW. KALTLUFTLEITBAHNBEREICHE IM BRAUNSCHWEIGER STADTGEBIET.....	24
TABELLE 5: EINORDNUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IM SIEDLUNGS- UND GEWERBERAUM IN DER NACHT SOWIE AM TAGE UND FLÄCHENMITTELWERT DER METEOROLOGISCHEN PARAMETER.....	29
TABELLE 6: EINORDNUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (z-TRANSFORMATION).	30
TABELLE 7: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BELASTETER SIEDLUNGSGBIETE IN DER NACHT UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	35
TABELLE 8: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BEDEUTENDER GRÜNAREALE IN DER NACHT UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.....	36
TABELLE 9: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BELASTETER SIEDLUNGSGBIETE AM TAGE UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	37
TABELLE 10: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BEDEUTENDER GRÜNAREALE AM TAGE UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	38



Glossar

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

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

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

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

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des 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 (VDI 2003).

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



Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen \rightarrow Kaltluftvolumenstrom $> 105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

Kaltluftentstehungsgebiete: Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen \rightarrow Kaltluftvolumenstrom, 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 sowie reliefbedingte \rightarrow Kaltluftabflüsse.

Kaltluftvolumenstrom: 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.

Kelvin (K): SI-Basiseinheit 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.

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

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

Planungshinweiskarte: 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.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten 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 \rightarrow Autochthone Wetterlage

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

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

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

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



1 Ziele und Analyseansatz

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung (vgl. Kap. 2.3) 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 die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Die Verwaltung der Stadt Braunschweig ist seit vielen Jahren im Themenfeld Stadtklima aktiv und hat bereits in den Jahren 1992, 2005 und 2012 umfassende gesamtstädtische Klimaanalysen durchgeführt (Kap. 1.1). Viele der darin gewonnenen Erkenntnisse gelten weiterhin, doch ermöglicht die seit der letzten Klimaanalyse zugenommene Rechenleistung zusammen mit der aktualisierten Datengrundlage (u.a. Bereitstellung von Laserscan-Daten) eine hochaufgelöste Fortschreibung der letzten Stadtklimaanalyse. Im Vergleich zur räumlichen Auflösung von 50 m im Gutachten von 2012¹ wurde eine gebäudescharfe 10 m-Auflösung verwendet, in der individuelle Strukturhöhen berücksichtigt werden konnten (Kap. 3 und 4).

Diese erlaubt eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insb. des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht anstelle des bisher verwendeten Klimatop-Ansatzes. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider (Klimaanalysekarten; Kap. 5). Darüber hinaus wird, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Planungshinweise abgeleitet (Planungshinweiskarten; Kap. 6).

Der vorliegende Bericht stellt den ersten Teil der Stadtklimaanalyse dar, geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie Planungskarten ein und schließt mit der Darstellung der Planungshinweiskarten ab (Teil I). Im weiteren Verlauf erfolgt eine Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima und die Erarbeitung eines konkreten Maßnahmenkatalogs (Teil II; siehe Kap. 1.2).

1.1 BISHERIGE STADTKLIMATISCHE UNTERSUCHUNGEN

STADTKLIMAANALYSEN

Bereits 1992 wurde für die Stadt Braunschweig ein erstes Klimagutachten erstellt (Mosimann et al. 1992). Für das Jahr 2005 erfolgte eine mesoskalige modellbasierte Aktualisierung des Gutachtens, die dessen Ergebnisse bestätigte (GEO-NET 2006 bzw. 2007). In der Fortschreibung der Stadtklimaanalyse aus dem Jahr 2012 wurden, genau wie im vorherigen Gutachten, lufthygienische Fragestellungen sowie das Kaltluftprozessgeschehen im Braunschweiger Stadtgebiet anhand des Stadtklimamodells FITNAH 3D untersucht und die Ergebnisse in Form einer Klimafunktionskarte abgebildet (Steinicke & Streifeneder 2012). Zusätzlich wurde eine humanbiometeorologische Bewertung der Wärmelast am Tage vorgenommen und eine Planungshinweiskarte erstellt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- ◆ In Braunschweig gibt es lufthygienische Belastungen, die sich hauptsächlich aus den Emissionen des Kfz-Verkehrs ergeben (höchste Konzentrationen im Nahbereich der Hauptverkehrsstraßen).

¹ Die Eingangsdaten Landnutzung sowie Geländehöhe weisen in der Stadtklimaanalyse 2012 genau wie die Ergebnisse zum Strömungsfeld bzw. Bioklima eine Auflösung von 50 m auf, das Durchlüftungspotenzial wird dagegen im 15 m- und die Luftschadstoffemissionen im 10 m-Raster dargestellt (Steinicke & Streifeneder 2012).



- ◆ Während anhaltender Hitzeperioden kommt es in sensiblen Bereichen zu Wärmebelastungen. Insbesondere in schlecht durchlüfteten Siedlungsgebieten können in den Nachtstunden so hohe Lufttemperaturen auftreten, dass ein erholsamer Schlaf nicht möglich ist.
- ◆ Zur Reduktion der lufthygienischen Belastung steht der Erhalt einer ausreichenden Durchlüftung im Vordergrund. Zusammen mit einer möglichst großen Klimavielfalt kann diese auch die Wärmebelastung am Tage mindern. In den Nachtstunden ist dagegen die abendliche bzw. nächtliche Abkühlung durch lokale Windsysteme das wesentliche entlastende Moment.
- ◆ Während Schwachwindlagen gelangen Luftmassen über Leitbahnen wie bspw. der Okeraue oder Bereichen von *Schunter* und *Wabe* bis in die Siedlungsgebiete. Insbesondere bei Planungen in diesen Leitbahnbereichen sind mögliche negative Auswirkungen genau zu betrachten.
- ◆ Das Braunschweiger Stadtklima zeigt eine funktionsfähige Mischung zwischen kalt- und frischluftproduzierenden Flächen und Luftleitbahnen. Primär gilt es die Durchlüftung zu fördern und Emissionen zu reduzieren. Besonders innerstädtische Freiflächen, die Okeraue und Waldflächen dürfen nicht angetastet werden. Periphere Freiflächen sind weitgehend zu erhalten, Eingriffe jedoch aufgrund der Größe des Bereichs ausgleichbar, sodass (insb. im Südwesten) eine gewisse Freiheit zur Bebauung besteht, solange bestehende Luftleitbahnen nicht tangiert werden.

LUFTREINHALTEPLAN

Seit Mai 2007 liegt für Braunschweig ein rechtsgültiger *Luftreinhalte- und Aktionsplan* vor, der im Januar 2008 anhand einer *Vorgezogenen Umsetzung von Einzelmaßnahmen* fortgeschrieben wurde (Stadt Braunschweig 2007, 2017). Auf Grundlage aktualisierter Daten hat das *Staatliche Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim* 2011 eine modellgestützte Voruntersuchung über die Schadstoffbelastung in Braunschweig durchgeführt (Gewerbeaufsichtsamt 2011).

Die Luftreinhaltung bleibt ein wichtiges Thema, dem sich die Stadt Braunschweig – auch aufgrund der Aktualisierung des HBEFA² infolge erhöhter NO_x-Emissionen bei Dieselfahrzeugen (HBEFA 2017) – gesondert widmet - entsprechend ist die Luftreinhaltung nicht Bestandteil dieser Stadtklimaanalyse.

1.2 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Für eine Stadt der Größe Braunschweigs ist der thermische Wirkkomplex bei der Betrachtung des Stadtklimas relevant. Dessen Belange werden bereits seit vielen Jahren mitgedacht, doch sind damit verbundene Fragestellungen und Probleme weiterhin aktuell – und werden angesichts der erwarteten Auswirkungen des Klimawandels sowie eines möglicherweise steigenden Siedlungsdrucks noch stärker in den Fokus rücken.

Das vorliegende Gutachten erzeugt eine hochaufgelöste Bestandsaufnahme der thermischen Belastung sowie des Kaltluftprozessgeschehens im Braunschweiger Stadtgebiet (Teil I). In einem zweiten, nun beginnenden Teil der Stadtklimaanalyse wird das zukünftige Stadtklima abgebildet und anschließend ein Gesamtbild der Betroffenheiten im Ist- sowie zukünftigen Zustand identifiziert. Aus den Ergebnissen beider Teile wird ein Katalog mit konkreten Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Erhalt des thermischen Komforts sowie Reduzierung von Hitzestress während hochsommerlichen Extremsituationen abgeleitet.

Zusammen mit dem gerade in Erarbeitung befindlichen Integrierten Stadtentwicklungskonzept (ISEK) 2030 sollen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in die geplante Erstellung eines neuen Flächennutzungsplans (FNP) einfließen.

² Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr



2 Fachliche Grundlagen

2.1 DER STADTKLIMAEFFEKT

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 gegenüber steht, 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.

Solch belastenden 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; Abb. 1).

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 sogenannten Kaltluftleitbahnen.

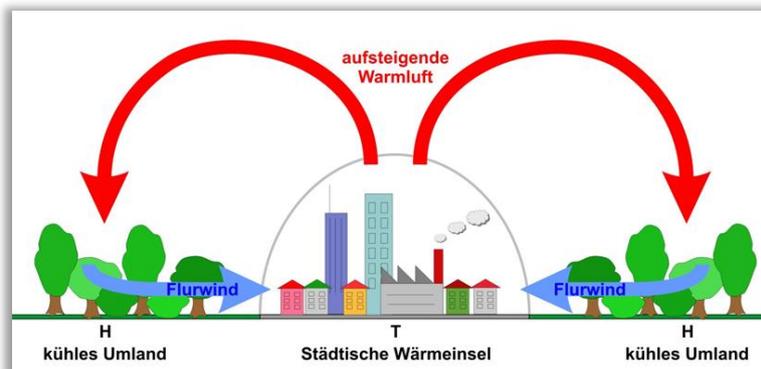


Abb. 1: Prinzipskizze Flurwind



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 Albedo³, 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 2002). 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 2008), sodass deren Bevölkerung einer größeren thermischen Belastung ausgesetzt ist.

Verkehr, Industrie und Hausbrand 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).

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.

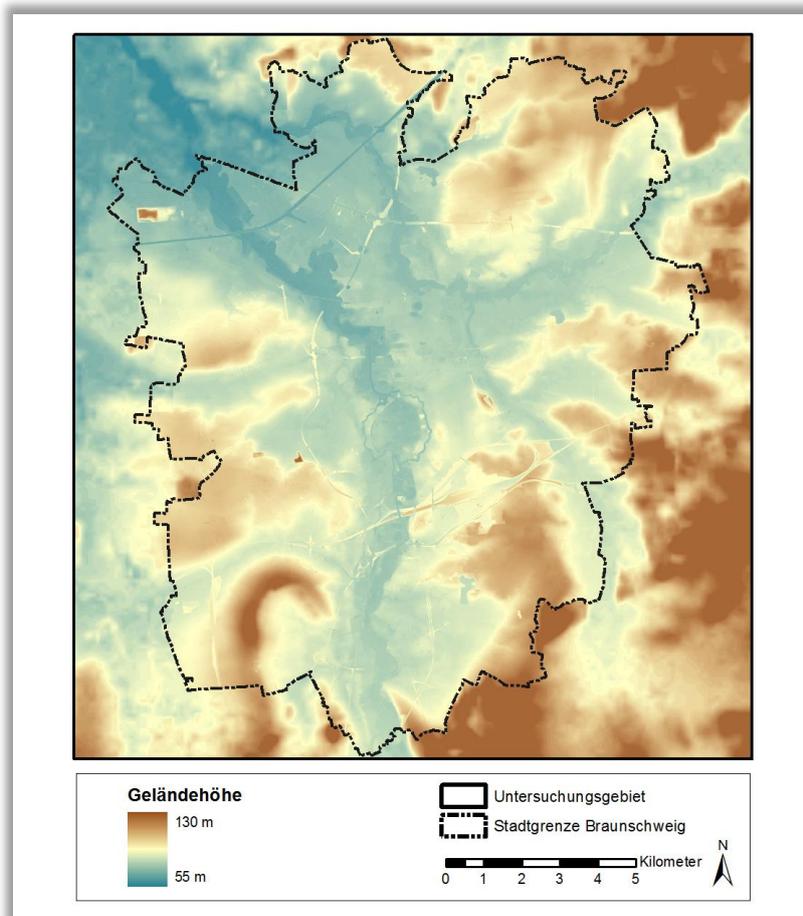


Abb. 2: Geländehöhen im Untersuchungsgebiet (DGM 10 m)

³ Rückstrahlvermögen einer Oberfläche



2.2 METEOROLOGISCHE BASISDATEN FÜR DEN RAUM BRAUNSCHWEIG

2.2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Stadtgebiet Braunschweigs erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von 15,7 km in Ost-West- bzw. 19,1 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von 192 km² (Stadt Braunschweig 2016). Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von 342 km² auf (17,8 km x 19,2 km), um die im Umland gelegenen Strukturen mit Einfluss auf das Braunschweiger Stadtklima zu erfassen.

Braunschweig liegt in der Übergangszone vom Vorland der deutschen Mittelgebirge (nördliches Harzvorland) zum norddeutschen Tiefland und hat Anteil an den Naturräumlichen Regionen *Weser-Aller-Flachland* im nördlichen Stadtgebiet sowie der *Börde* im südlichen Bereich (u.a. *Braunschweig-Hildesheimer-Lößbörde*; Stadt Braunschweig 1999). Das Relief des Stadtgebiets ist relativ gering ausgeprägt, große Teile des Siedlungsbereichs liegen auf ca. 70 - 75 m über Normalnull (ü.NN.; Abb. 2). Die höchste Erhebung bildet der *Geitelder Berg* mit 111 m ü.NN., die tiefste Stelle ist eine alte Okerschleife im Nordwesten des Stadtgebiets (62 m ü.NN.; Stadt Braunschweig 2016).

2.2.2 KLIMADATEN

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 aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt (DWD 2017a).

Im Folgenden werden die wichtigsten meteorologischen Parameter für die Periode 1981-2010 und damit einen aktuelleren Bezugszeitraum dargestellt. Sie beziehen sich, sofern nicht anderweitig angegeben, auf den Standort der DWD-Station in Braunschweig-Völkenrode. Innerhalb des Stadtgebiets kann es nutzungsbedingt deutliche Abweichungen von den Messwerten an der Wetterstation geben.

MAKROKLIMA

Braunschweig liegt in einer gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägten Einfluss. Die Witterung wird vornehmlich von Tiefdruckgebieten mit eingelagerten Zwischenhochs bestimmt, sodass wechselnde Wetterlagen auftreten und längere Hochdruckperioden mit beständigem Wetter eher selten sind (Steinicke & Streifeneder 2012).

Tabelle 1: Lufttemperatur (2 m über Grund), Niederschlag und Windgeschwindigkeit (10 m über Grund) im langjährigen Mittel an der DWD-Station Braunschweig Völkenrode (1981-2010; nach DWD 2017b).

		Mittelwert	Standardabweichung
Lufttemperatur	[°C]	9,5	0,9
Niederschlag	[mm]	628	118
Windgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]	3,4	1,9

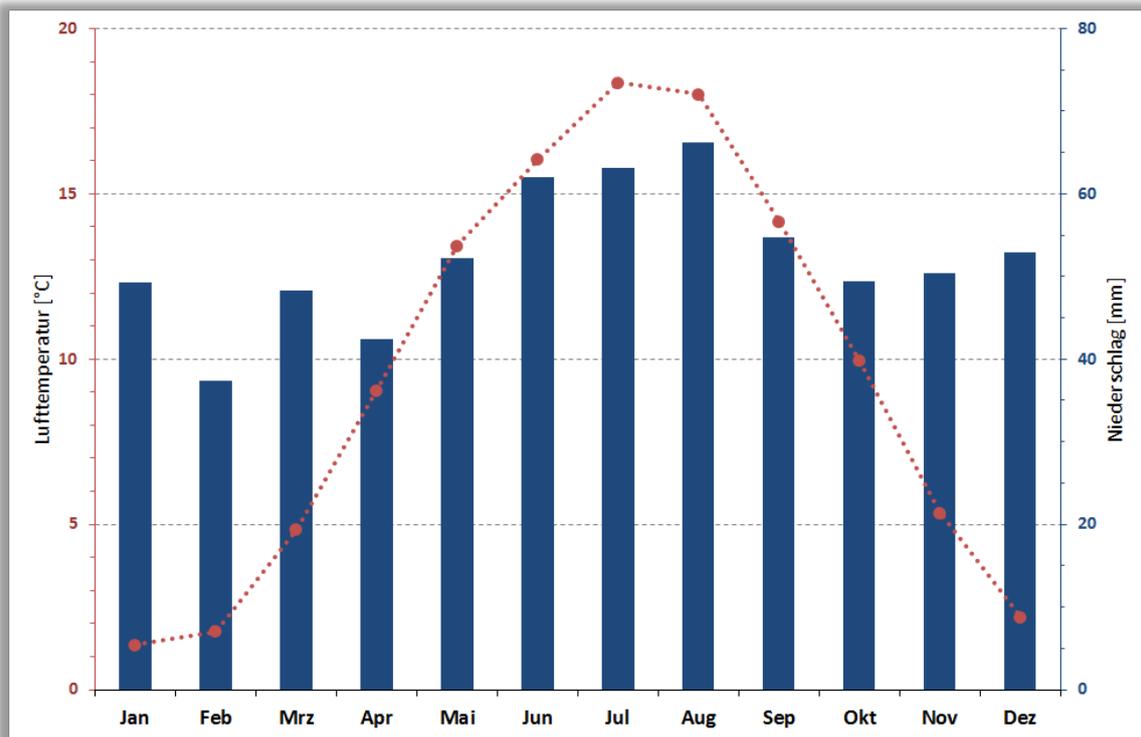


Abb. 3: Monatliche Lufttemperatur- und Niederschlagswerte im 30-jährigen Mittel (1981-2010, DWD-Station Braunschweig-Völkenrode; nach DWD 2017b)

KENNZAHLEN

Die Lufttemperatur geht tendenziell mit zunehmender geographischer Breite sowie Höhe über dem Meeresspiegel zurück. In Braunschweig liegt die **Jahresmitteltemperatur** bei 9,5 °C und damit innerhalb Deutschlands in einem mittleren Bereich (Tabelle 1) – Berlin weist bspw. ähnliche, Frankfurt a.M. sowie Freiburg dagegen höhere und Hamburg geringere Werte auf (ohne Abb.; Steinicke & Streifeneder 2012).

Die Lufttemperatur zeigt einen ausgeprägten Jahresgang, auch für den **Niederschlag** ist ein charakteristischer Jahresverlauf zu erkennen (Abb. 3). Im Mittel treten die höchsten Werte, bedingt durch Schauer und Gewitter, in den Sommermonaten Juni bis August auf. Über das ganze Jahr fallen durchschnittlich 628 mm Niederschlag (Tabelle 1).

Aufgrund der hohen Variabilität der **Windgeschwindigkeit** ist die Angabe eines Jahresmittelwertes von $3,4 \text{ m s}^{-1}$ wenig aussagekräftig (Tabelle 1), doch lassen sich in Bezug auf den Tages- bzw. Jahresgang charakteristische Verläufe mit den höchsten Werten um die Mittagszeit bzw. in den Wintermonaten erkennen (ohne Abb.). Die Station Braunschweig-Völkenrode weist im langjährigen Mittel Hauptanströmungsrichtungen aus Südwest bis West auf (zwischen $210\text{-}270^\circ$ ca. 40 % der auftretenden **Windrichtungen**; Abb. 4). Ein deutlich geringeres sekundäres Maximum verzeichnen südöstliche bis östliche Windrichtungen (ca. 20 % aus dem Bereich $90\text{-}160^\circ$), während Strömungen aus dem nördlichen Sektor vergleichsweise selten vorkommen. Bedingt durch die Hinderniswirkung insb. von Gebäuden, herrschen im Stadtgebiet modifizierte Strömungsverhältnisse vor. Beispielsweise treten an der in einer Straßenschlucht liegenden LÜN-Station⁴ am *Altewiekring* infolge der Kanalisierung überwiegend Windrichtungen aus Nord bzw. Süd auf⁵ (Steinicke & Streifeneder 2012).

⁴ Messstation der Lufthygienischen Überwachung Niedersachsen des Staatlichen Gewerbeaufsichtsamts Hildesheim.

⁵ Bezugszeitraum 2008-2010



In Bezug auf Ausbreitungsklassen überwiegen indifferente Schichtungen mit guten Austauschverhältnissen (ca. 60 % der Jahresstunden; ohne Abb.). In knapp 30 % der Jahresstunden treten stabile Schichtungen mit ungünstigen Austauschverhältnissen auf (Ausbreitungsklassen I und II nach *TA Luft* ⁶). Während *stark stabiler* Schichtungen (Ausbreitungsklasse I), d.h. typischerweise in Nachtstunden mit geringem übergeordneten Wind und geringer Bewölkung, stellen sich an der Station Braunschweig-Völkenrode Windrichtungen aus dem östlichen bis südwestlichen Sektor ein⁷ (ohne Abb.; vgl. jeweils Steinicke & Streifeneder 2012). In Steinicke & Streifeneder (2012) wurde zusätzlich hinsichtlich der Windgeschwindigkeit differenziert. Schwachwindlagen ($< 1,4 \text{ m s}^{-1}$) kommen an der Station Braunschweig-Völkenrode an ca. 11 % der Jahresstunden vor und weisen überwiegend Anströmungsrichtungen aus dem südlichen Halbraum auf (ohne Abb.).

Das vorliegende Gutachten untersucht die Strömungsverhältnisse einer autochthonen Sommernacht. Diese ist mit der *stark stabilen* Schichtung zu vergleichen, doch wird kein übergeordneter Wind berücksichtigt, d.h. das Strömungsfeld durch die lokalen Gegebenheiten hervorgerufen (Flurwinde, Kaltluftabflüsse). Stadtplanerische Maßnahmen vermögen am ehesten das Prozessgeschehen während autochthoner Wetterlagen zu beeinflussen, sodass deren Kaltlufthaushalt Grundlage für die Ausweisung von Kaltluftleitbahnen ist. Übergeordnete Strömungen verhindern die Ausbildung eines autochthonen Klimas, wirken aber ebenfalls auf das Stadtklima und können in Bezug auf die Luftreinhaltung eine wichtige Rolle bei der Durchlüftung einer Stadt spielen. Planerisch lassen sich diese weniger beeinflussen, doch sollte dafür gesorgt werden, dass Belüftungsachsen aus den Hauptanströmungsrichtungen – in Braunschweig insb. aus Südwesten bis Westen – in das Stadtgebiet bestehen bleiben.

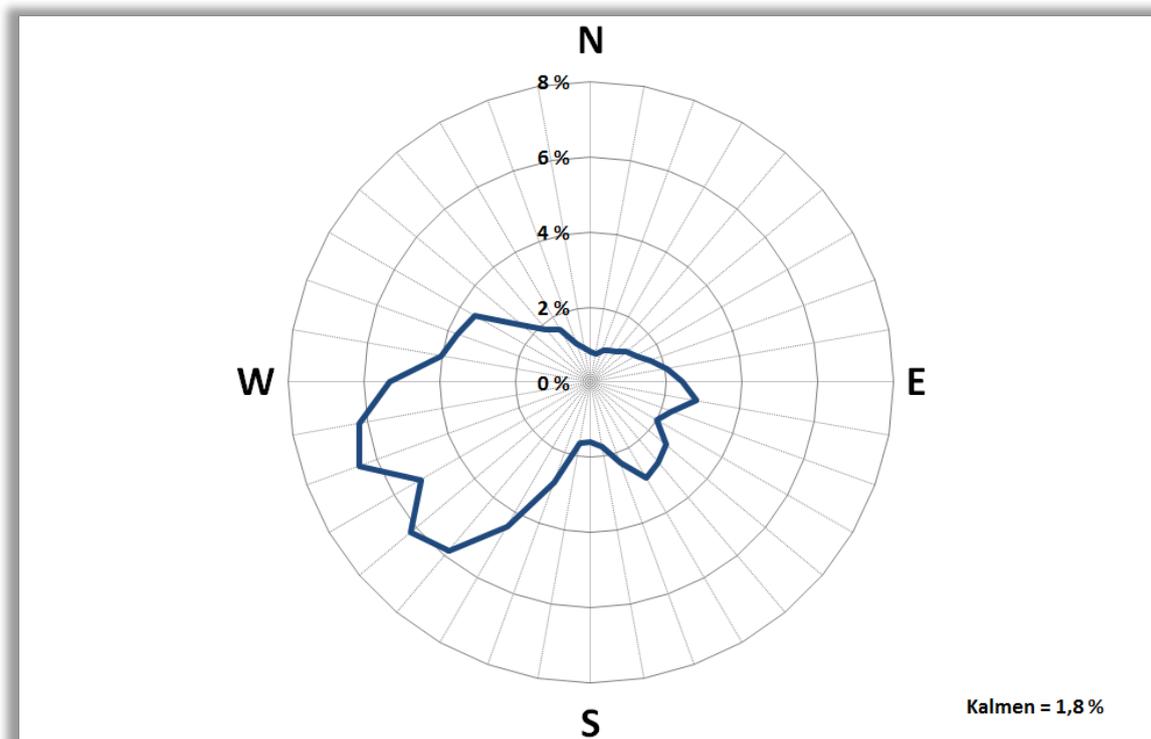


Abb. 4: Windrichtungsverteilung für den Zeitraum 1981-2010 (bezogen auf stündliche Werte) an der DWD-Station Braunschweig-Völkenrode (Kalmen: Windgeschwindigkeit $\leq 0,3 \text{ m s}^{-1}$; nach DWD 2017b)

⁶ Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

⁷ Daten für das Jahr 1999



2.3 EXKURS: PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN

Mit dem *Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden* im Jahr 2011 sind die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung gestärkt (Novellierung des Baugesetzbuchs (BauGB)) und nun ausdrücklich zu einer Aufgabe der Bauleitplanung nach § 1 (5) BauGB erklärt worden: „Die Bauleitpläne sollen [...] dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den **Klimaschutz und die Klimaanpassung**, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern [...].“ Zusätzlich heißt es in § 1a (5) BauGB: „Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem **Klimawandel** entgegenwirken, als auch durch solche, die der **Anpassung an den Klimawandel** dienen, Rechnung getragen werden.“

In **Flächennutzungsplänen** (FNP; vorbereitende Bauleitplanung) können z.B. Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden (§ 5 (2) S. 2c BauGB). So bietet sich durch den FNP bspw. die Möglichkeit der Sicherung von Freiflächen, die der Kaltluftproduktion dienen, sowie von Frischluftbahnen und Ventilationsbahnen (Belüftungsachsen; vgl. Stadt Karlsruhe 2014). In FNP wird vor allem das mesoskalige Klima betrachtet (räumliche Auflösung der Karten ca. 25 m bis 100 m), während in **Bebauungsplänen** (B-Plan; verbindlichen Bauleitplanung) das Mikroklima in den Vordergrund rückt (ca. 2 m bis 10 m; VDI 2014). Nach § 8 (2) sind B-Pläne aus dem FNP zu entwickeln, sodass die dort getroffenen Regelungen berücksichtigt werden müssen. B-Pläne bieten u.a. über folgende Festsetzungen die Möglichkeit stadtklimatischen Anforderungen zu begegnen (vgl. § 9 (1) BauGB):

- Gebäudekörperstellung und Maß der baulichen Nutzung (u.a. Grundflächenzahl, Geschoßflächenzahl, Zahl der Vollgeschosse bzw. Höhe der baulichen Anlage), jeweils auch mit dem Ziel klimarelevante Luftströmungen zu unterstützen und Belüftungsachsen zu sichern
- Öffentliche und private Grünflächen (Parkanlagen, Kleingärten, Sport-, Spielplätze, Friedhöfe, etc.)
- Begrünung von Straßenzügen, Parkplätzen und Gleistrassen
- Anpflanzen bzw. Erhalt von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen
- Dach- und Fassadenbegrünung

Ein weiteres Steuerungsinstrument ist die Erstellung von **Grünordnungsplänen** (GOP). Eine rechtliche Verpflichtung zur Aufstellung von GOP gibt es nicht, doch können ihre Inhalte durch die Integration in B-Pläne Rechtsverbindlichkeit erlangen. GOP ergeben sich aus dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), in dem auf die klimatische Wirkung der Landschaft verwiesen wird: „Zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts sind insbesondere Luft und Klima auch durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu schützen; dies gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen [...]“ (§ 1 (3) S. 4 BNatSchG).

Nach § 11 (1) BauGB können Gemeinden insb. zur Vorbereitung und Durchführung städtebaulicher Maßnahmen durch einen Vertragspartner **städtebauliche Verträge** schließen. Diese können ein geeignetes Mittel zur Umsetzung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen in der Bauleitplanung sein, sofern sie frühzeitig in dem öffentlich-rechtlichen Vertrag vereinbart werden. Im Zuge der **Stadtsanierung** sind auch **informelle Planungsinstrumente** wie ein **städtebaulicher Rahmenplan** denkbar (§ 140 BauGB), um städtebauliche Vorgaben und Ziele zum Klima zu definieren.

Mit der anstehenden Novellierung des *Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung* (UVPG) finden die Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung verstärkt Eingang in die **Umweltverträglichkeitsprüfung** (UVP) als übergeordnetes umweltpolitisches Instrument.



3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 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 (DFG 1988). Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

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

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 Lösungen 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 stadtklimatologisch 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 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 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).

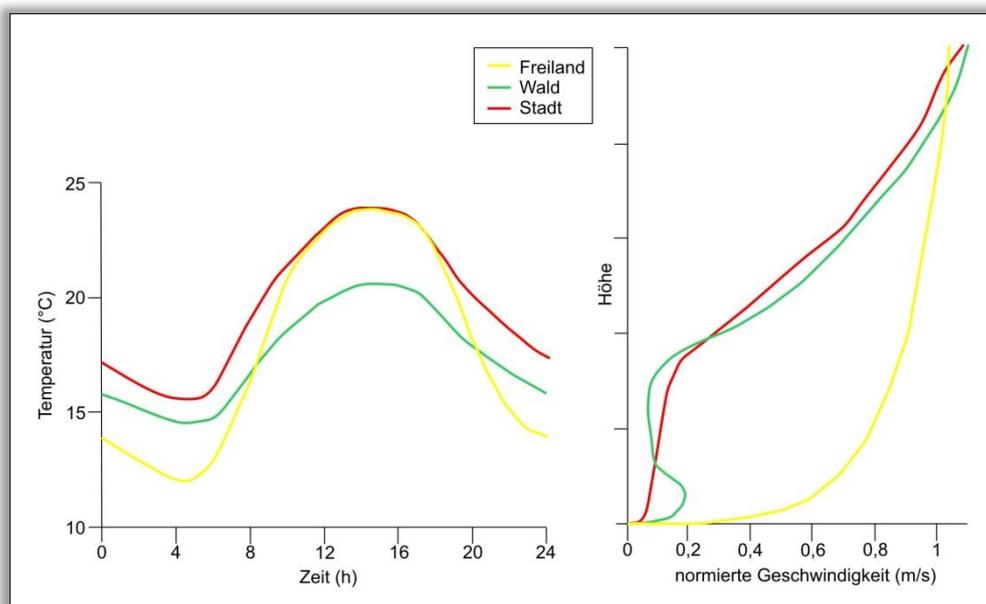


Abb. 5: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen



3.2 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*-Szenariums). Charakteristisch für diese (Hochdruck-)Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

In Abb. 5 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. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

3.3 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)

Im Unterschied zur mesoskaligen Modellierung wurden darüber hinaus Gebäude sowohl in Bezug auf ihren Grundriss als auch ihre Höhe erfasst (LOD1-Daten⁸), sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Weiterhin wurden Laserscan-Daten⁹ zur individuellen Berechnung der Strukturhöhen von Grünbeständen verwendet. Die räumliche Auflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne (insb. kleinkronige) Bäume auf dieser Maßstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden. Ebenfalls berücksichtigt wurden die Strukturhöhen linienhafter Lärmschutzwände als Strömungshindernisse.

⁸ Gebäude außerhalb des Stadtgebiet Braunschweigs wurden über Open Street Map-Daten erfasst und mit einer pauschalen Gebäudehöhe von 8 m versehen.

⁹ Digitales Oberflächenmodell (DOM)



Für Siedlungsflächen innerhalb des Stadtgebiet Braunschweigs standen Angaben zum Versiegelungsgrad zur Verfügung. Für alle weiteren Flächen wurde der Versiegelungsgrad analog zum Vorgehen mesoskaliger Berechnungen mittels der Landnutzungsklassen parametrisiert. Sämtliche Eingangsdaten wurden anhand aktueller Luftbilder (Bezugsjahr 2015) abgeglichen und auf Plausibilität geprüft.

Die Daten wurden im Januar 2017 von der Stadt Braunschweig übermittelt und repräsentieren den Aktualisierungsstand der Jahre 2016 (Landnutzung: ALKIS), 2011 (Geländehöhe), 2016 (Gebäude: LOD1), 2011 (Laserscan-Daten) bzw. 2017 (Versiegelungsgrade).

ABGRENZUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAÖKOLOGISCH WIRKSAMEN NUTZUNGSSTRUKTUREN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 10 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form feldhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 6). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u.a. den Mittelwert der flächenspezifischen Werteausprägungen umfasst.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kap. 4), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kap.5 und 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

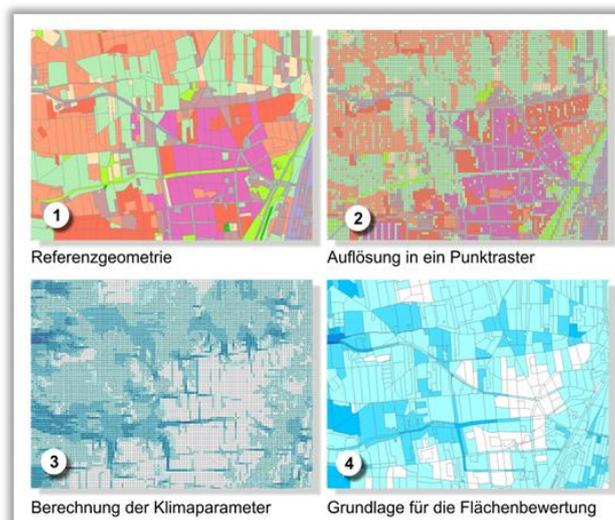


Abb. 6: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter

4.1 VORGEHENSWEISE

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 (in 2 m ü. Gr.) sowie eine autochthone Sommerwetterlage (vgl. Kap. 3.2). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Klimaanalysekarten vorgenommen (z.B. die Ableitung von Kaltluftleitbahnen).

4.2 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

ALLGEMEINES

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. 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 **grünbestimmten 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 (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder 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 dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – außerdem können sie ein Strömungshindernis darstellen. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wassern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte diurnale Temperaturamplitude 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.

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. 6).

ERGEBNISSE TEMPERATURFELD

Das sich um 04:00 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst bei Minimalwerten von weniger als 14 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten von mehr als 21 °C im Stadtkern eine Spannweite von ca. 8 K (Abb. A 1 im Anhang). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,1 °C.

Das Temperaturfeld ist auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, weil Areale mit Einzelhaus- oder Blockbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen (Abb. 7).

Die höchsten Temperaturen treten mit > 21 °C in den Kernbereichen der Innenstadt auf und resultieren aus dem hohen Bauvolumen und Oberflächenversiegelungsgrad im Stadtzentrum. Die sich an den Innenstadtbereich anschließende und in den Stadtteilzentren auftretende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 20 °C ebenfalls ein erhöhtes Temperaturniveau. Dies trifft noch mehr auf Gewerbe- bzw. Industrieflächen zu, die Werte bis zu 21 °C erreichen (unter anderem entlang der *Hamburger Straße*, *Theodor-Heuß-Straße* oder *Hansestraße*). Große Teile der Richtung Stadtrand gelegenen Siedlungsflächen sind durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbebauung geprägt (u.a. *Lehdorf*, *Mascherode* oder *Querum*). Diese weisen unter den bebauten Flächen mit durchschnittlich 18,2 °C das geringste Temperaturniveau auf, Werte über 20 °C werden in der Regel nicht erreicht. Die durch Abstandsflächen geprägte Zeilen- und Hochhausbebauung, wie sie flächenhaft z.B. in *der Weststadt* auftritt, liegt mit ca. 19 °C zwischen den übrigen Strukturtypen.

Im Temperaturfeld treten unbebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als 14 °C über ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen im Umland zu verzeichnen. Ähnlich geringe Werte können in Senkenbereichen auftreten, in denen sich Kaltluft aufgrund ihrer – im Vergleich zu wärmeren Luftmassen – höheren Dichte sammelt. In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Temperaturwerte um 17 °C erreicht werden (z.B. *Buchhorst*, *Querumer Forst*). Verglichen mit den weitläufigen Freiräumen des Umlandes weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 16 - 17 °C ein höheres Wertespektrum auf (z.B. *Bürgerpark*, *Theaterpark* oder das Areal um den *Dowesee*), wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 18 °C, da sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. *Andreas-Friedhof*). Größere vegetationsgeprägte Areale treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potentielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar.

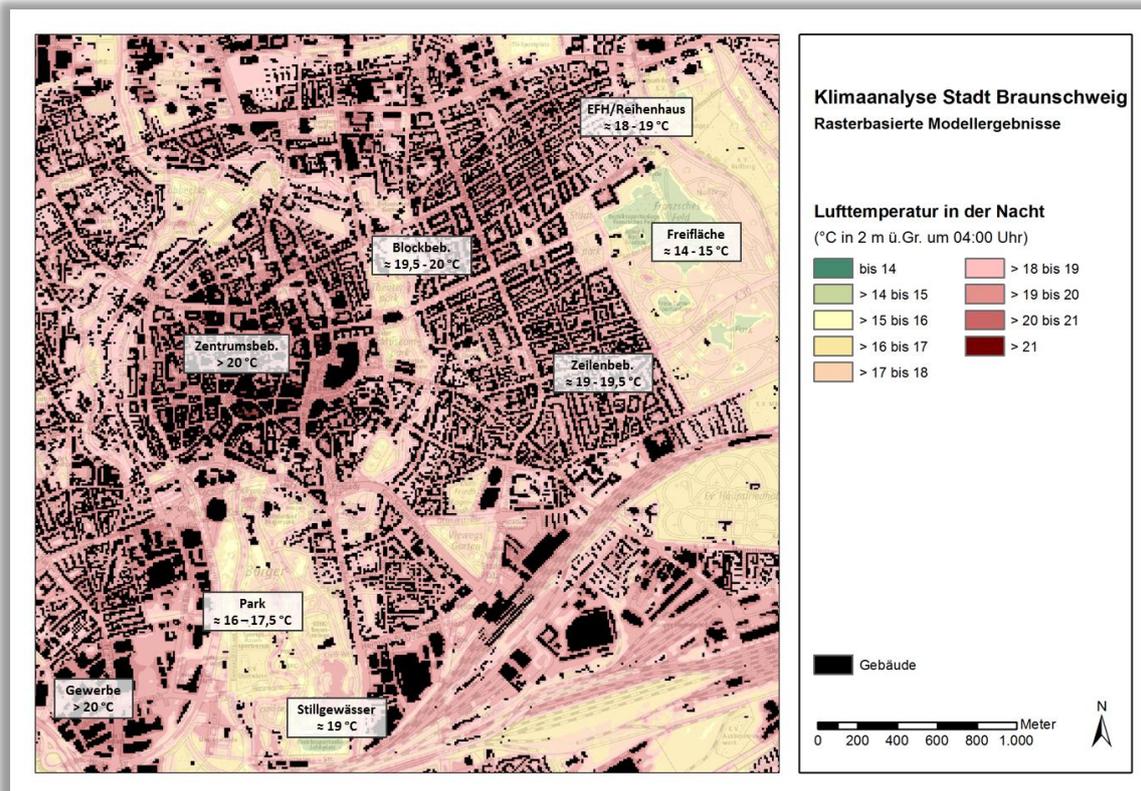


Abb. 7: Nächtliches Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Braunschweig mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen (im Hintergrund: Stadtgrundkarte)

4.3 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

ALLGEMEINES

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 – letztgenannte treten im Untersuchungsgebiet aufgrund der vergleichsweise geringen Reliefenergie häufiger 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 (Mosimann et al. 1999). **Hangabwinde** erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m s^{-1} , ihre vertikale Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (Hergert 1991). 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 (Kiese et al. 1992). Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur gering ausgeprägte Strömungsphänomene (Geschwindigkeit i.d.R. deutlich $< 2 \text{ m s}^{-1}$), die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Kleinräumige Strömungsphänomene, die zwischen einzelnen strukturellen Elementen innerhalb der Stadt auftreten, werden **Strukturwinde** genannt.



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 der Stadtkörper 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.

ERGEBNISSE 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.

Abb. 8 zeigt das für den Zeitpunkt 04:00 Uhr modellierte Strömungsfeld für einen Ausschnitt des Braunschweiger Stadtgebiets, das sich während einer sommerlichen austauscharmen Strahlungswetternacht herausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt¹⁰. Im Strömungsfeld sind die Hinderniswirkung der Gebäude und die daraus resultierende Umlenkung der Strömung gut zu erkennen¹¹.

Die unterlegten Farben stellen die Windgeschwindigkeit flächenhaft dar. Abgebildet sind alle Rasterzellen mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens $0,1 \text{ m s}^{-1}$, für die unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu reliefbedingten Maximalwerten von ca. $1,2 \text{ m s}^{-1}$ im Bereich des *Westerbergs*. Insgesamt liegen die Werte relativ niedrig, da das Strömungsfeld während der angenommenen autochthonen Wetterlage vorwiegend durch thermisch induzierte Flurwinde bestimmt ist und nur vereinzelt Hangabwinde auftreten. Im Stadtgebiet treten Werte von mehr als $0,5 \text{ m s}^{-1}$ insb. dort auf, wo größere Grünzüge bis in die bebauten Gebiete hineinreichen (u.a. entlang der *Oker* südlich des *Ölper Sees* bzw. entlang der *Schunter* bei *Querum*, Kleingärten und Freiflächen nördlich des *Madamenwegs*). In Richtung des Zentrums nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab, vornehmlich aufgelockerte Siedlungsbereiche werden noch wirksam durchlüftet ($> 0,1 \text{ m s}^{-1}$), während in weiten Teilen des Stadtkerns keine wirksame Strömung mehr erreicht wird. Ausnahmen bilden größere städtische Grün- und Freiflächen, deren Ausgleichsströmungen die umliegenden Siedlungsgebiete erreichen (z.B. Grünflächen entlang der *Okergräben* um die Innenstadt).

Die geringen Strömungsgeschwindigkeiten über den landwirtschaftlichen Freiflächen im Umland sind auf die betrachtete Wetterlage zurückzuführen (Abb. A 2 im Anhang). Die Flächen weisen keinen direkten Siedlungsbezug auf, sodass sich in einer autochthonen Sommernacht kaum bzw. keine Flurwinde ausbilden. Gleichwohl werden sie während allochthoner Wetterlagen (mit der für Braunschweig geltenden südwestlichen bis westlichen Hauptanströmungsrichtung) aufgrund ihrer geringen Hinderniswirkung meist gut durchströmt und können für das Stadtgebiet eine wichtige Durchlüftungsfunktionen einnehmen.

¹⁰ Bei gesamtstädtischer Betrachtung bzw. einem kleineren Maßstab werden die Pfeile für eine übersichtlichere Darstellung in geringerer Auflösung abgebildet (vgl. Abb. A 2 im Anhang).

¹¹ Einzelne Gebäude werden in den Modellergebnissen fälschlicherweise überströmt, doch handelt es sich dabei um Ausnahmefälle.

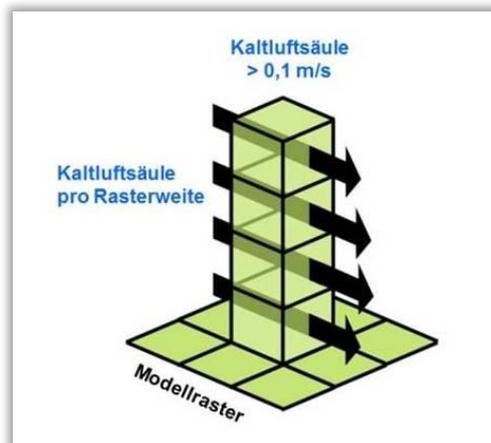


Abb. 9: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

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.

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.

ERGEBNISSE KALTLUFTVOLUMENSTROM

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum folgt im Wesentlichen dem Muster des Kaltluftströmungsfeldes, weicht an einigen Stellen jedoch von diesem ab.

Die geringsten Werte finden sich abermals im Stadtkern, der aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung nur beschränkt durchlüftet wird und in dem nur wenige Grünflächen hohen Kaltluftentstehungspotenzials vorhanden sind (Abb. 10). Die über Freiflächen mit Siedlungsbezug entstehende Kaltluft strömt als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete und sorgt für die höchsten Werte. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt die Kaltluft auch in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammen hängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind,

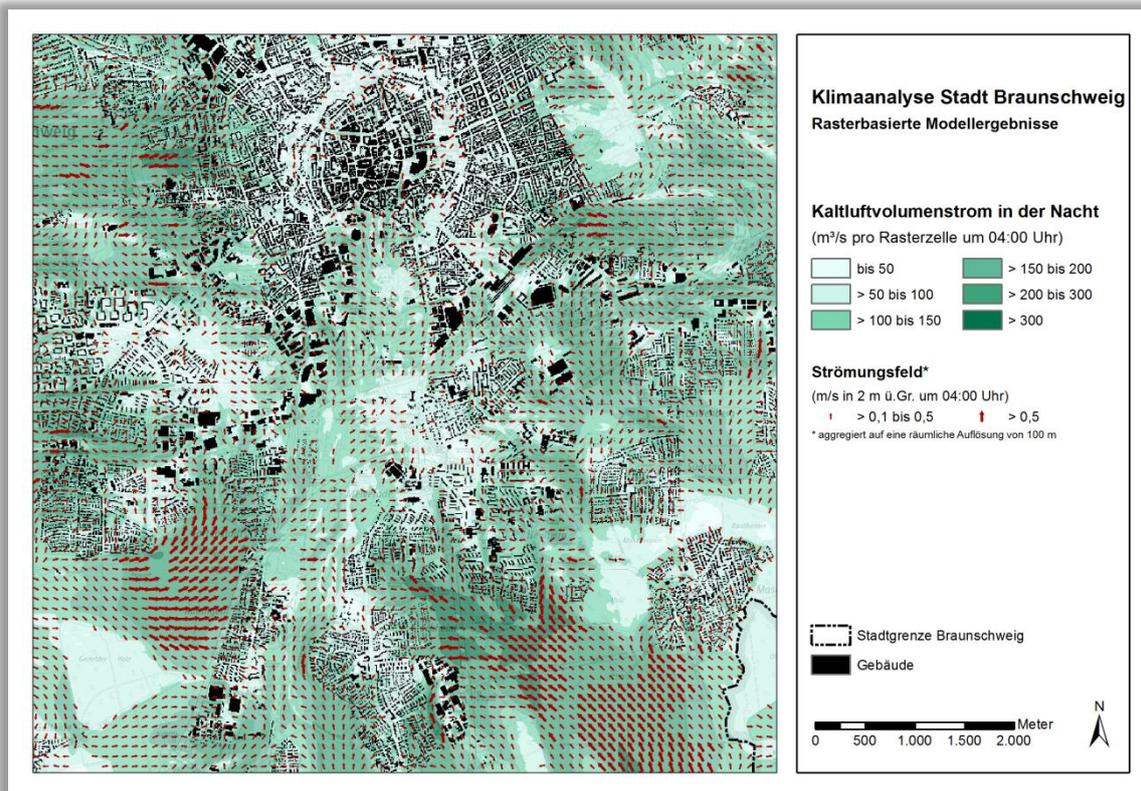


Abb. 10: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Braunschweig (im Hintergrund: Stadtgrundkarte)

als Trittsteine für Kaltluft dienen. Folglich sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als die Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.

Über Waldarealen treten geringe Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen. Analog zu den Ergebnissen des Strömungsfelds weisen siedlungsferne Freiflächen im Kontext autochthoner Bedingungen geringe Werte auf (siehe oben; Abb. A 3 im Anhang).

4.5 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

ALLGEMEINES

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 abschätzen¹³. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

¹³ 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).



Tabelle 2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004).

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	Schwäche 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

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*; vgl. Höpfe und Mayer 1987). 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 Braunschweig 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 1999). 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-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tabelle 2; VDI 2004).

ERGEBNISSE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. PET-Werte ≤ 23 °C (*keine Wärmebelastung*) stellen eine Ausnahme dar und sind einzig über größeren Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung haben (z.B. *Ölper See*; Abb. 11). Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit einer *schwachen Wärmebelastung* ab (PET ≤ 29 °C). Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (Abb. A 4 im Anhang).

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte werden über versiegelten Gewerbegebieten und dem Straßenraum erreicht (bis zu mehr als 41 °C PET; *extreme Wärmebelastung*). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte. Im Gegensatz zur Situation in der Nacht fällt die thermische Belastung in der Zentrumsbebauung weniger stark aus, da die dichte und zumeist hohe Bebauung für eine gewisse Verschattung sorgt. Innerhalb des Stadtkerns zeichnen sich Parkareale wie der *Bürgerpark* und die Grünflächen entlang der *Okergräben* um die Innenstadt mit einer vergleichsweise geringen Wärmebelastung aus.

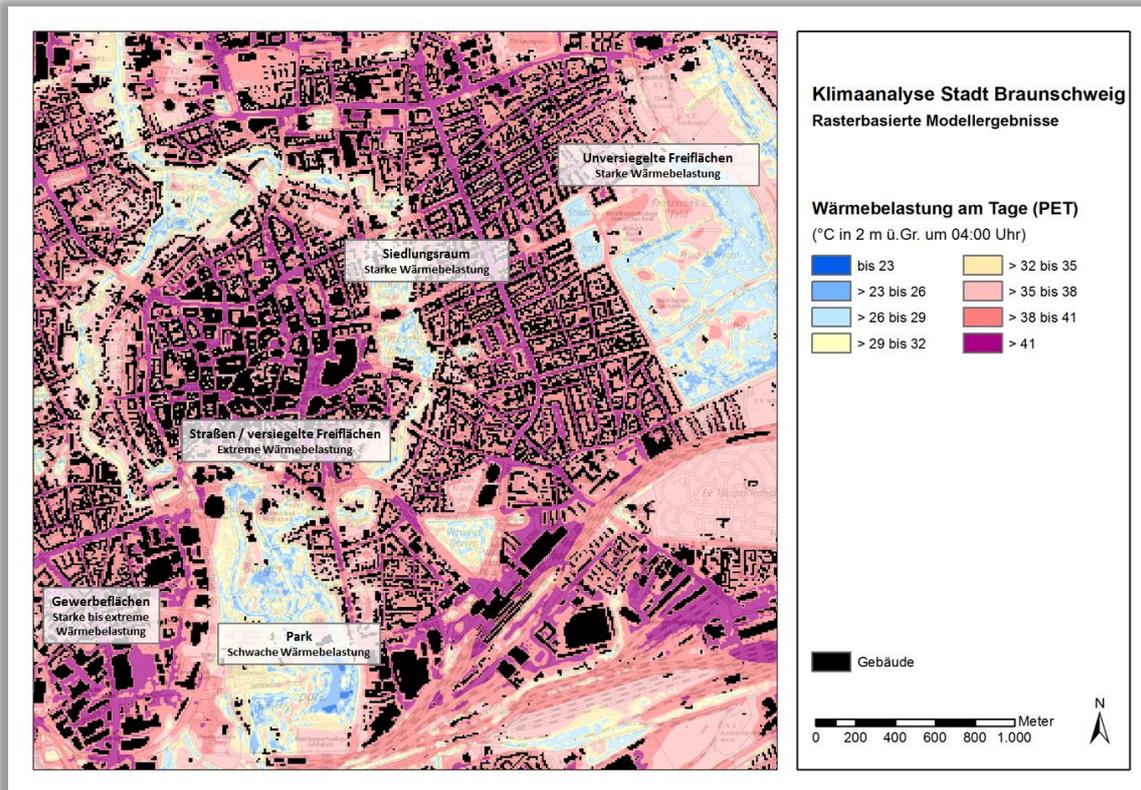


Abb. 11: Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Braunschweig mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen (im Hintergrund: Stadtgrundkarte)



5 Klimaanalysekarten

5.1 VORGEHENSWEISE

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 Bebauungsstruktur 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 Klimaanalysekarte¹⁴ 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 eine separate Klimaanalysekarte erstellt, die die Wärmebelastung auf Grün-, Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie dem Straßenraum zeigt. Außerhalb des Stadtgebiets erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund der geringeren räumlichen und qualitativen Auflösung der Eingangsdaten zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefere Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu (insb. am Rand des Untersuchungsgebiets).

5.2 ERGEBNISSE

5.2.1 NACHTSITUATION

BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu unversiegelten Freiflächen im Untersuchungsgebiet, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 14,4 °C aufweisen. Der **Wärmeinseleffekt** ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert und stellt somit eine geeignetere Kenngröße zur Erfassung des Stadtklimaeffekts dar als absolute Temperaturwerte.

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet liegt bei 18,7 °C. Bei Betrachtung der Flächenanteile zeigt sich, dass nahezu alle bebauten Flächen eine Überwärmung > 2 K aufweisen, darunter der Großteil Werte von > 3 bis 5 K (72 %) und mehr als ein Viertel sogar > 5 K (Tabelle 3). Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbauung tendenziell durch eine geringere und Gewerbeflächen sowie Zentrums- bzw. Block(rand)bebauung durch eine stärkere Überwärmung geprägt sind.

KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkungsbereich** kennzeichnet das bodennahe Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkungsbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkungsbereich sind

¹⁴ Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte (VDI 2014).



Tabelle 3: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerbebaum.

Nächtlicher Wärmeineffekt [K]	Flächenanteil im Stadtgebiet [%]
bis 2	0,1
> 2 bis 3	2,0
> 3 bis 4	33,8
> 4 bis 5	38,2
> 5 bis 6	24,5
> 6	1,4

Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom $> 105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durchflossen werden (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet). Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche als Kaltlufteinwirkungsbereich ausgewiesen.

Innerhalb des Stadtgebiets gelten mit 36,5 % etwas mehr als ein Drittel der Siedlungs- und Gewerbeflächen als Kaltlufteinwirkungsbereich. Mehrheitlich handelt es sich dabei um Flächen in den Randbereichen – im Stadtkern treten sie nur vereinzelt auf.

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. 4.4).

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltlufthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet, ohne eine Bewertung vorzunehmen (Abb. 12 bzw. Abb. A 5 im Anhang). Zudem werden über Grünflächen und Gewässern sowie Straßen- und Gleisflächen **Flurwinde** ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen. Der Übersichtlichkeit halber sind nur Flurwinde über Grünflächen ab 1 ha Größe aufgeführt.

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 hineintragen, während Kaltluftabflüsse flächenhaft



über unbebauten Hangbereichen auftreten. Für das Stadtgebiet Braunschweigs spielen Kaltluftabflüsse aufgrund des geringen Reliefs jedoch eine untergeordnete Rolle, sodass diese nicht separat aufgeführt, sondern in den Kaltluftleitbahnen enthalten sind.

Insgesamt sind 13 Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftleitbahnbereiche ausgewiesen, die aufgrund ihrer Lage und Charakteristika als besonders wichtig für die großräumige Durchlüftung des Braunschweiger Stadtgebiets gesehen werden (Tabelle 4). Sie verteilen sich um das gesamte Stadtgebiet und sind an Strukturen wie Flussläufe (VII - *Südliche* bzw. XII - *Nördliche Okeraue*), große Parkareale (IV - *Nußberg*, VIII - *Bürgerpark*) oder weitläufige Grün-/Freiflächen am Stadtrand gebunden (VI - *Stöckheim*, XI - *Madamenweg*). Daneben gibt es viele Bereiche, die zwar nicht als übergeordnete Kaltluftleitbahn ausgewiesen wurden, in denen die Flurwinde lokal dennoch eine wichtige Durchlüftungsfunktion erfüllen (siehe Strömungsfeld in Abb. 12).

Das in der Klimaanalysekarte beschriebene Kaltluftprozessgeschehen und damit auch die ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen basieren auf der Annahme einer autochthonen Wetterlage. Während allochthoner Wetterlagen mit übergeordneten Windfeldern treten stadtklimatische Belastungssituationen i.d.R. weniger häufig in Erscheinung, doch gibt es auch unter diesen Bedingungen Bereiche, die als wichtige Strömungsachsen für das Stadtgebiet fungieren (Ventilationsbahnen) – zuvorderst sind hier die in Richtung der südwestlichen bis westlichen Hauptanströmungsrichtung orientierten Kaltluftleitbahnen Nr. IX - XII zu nennen.

Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen Kaltluftvolumenstrom, die Kaltluftleitbahnen speisen (Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

Tabelle 4: Ausgewiesene Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftleitbahnbereiche im Braunschweiger Stadtgebiet.

Nummer	Lage / Benennung	Nummer	Lage / Benennung
I	Bienrode	VIII	Bürgerpark
II.a	Hondelage Nord	IX.a	Westerberg / Rünigen
II.b	Hondelage Ost	IX.b	Westerberg / Gartenstadt
III	Querum	X	Elbeviertel
IV	Nußberg	XI.a	Madamenweg / Weststadt
V	Stadtfriedhof	XI.b	Madamenweg / Westl. Ringgebiet / Lehndorf
VI.a	Stöckheim Ost	XII.a	Nördl. Okeraue / Schwarzer Berg
VI.b	Stöckheim Süd	XII.b	Nördl. Okeraue / Veltenhof
VII	Südliche Okeraue	XIII	Thune / Wenden

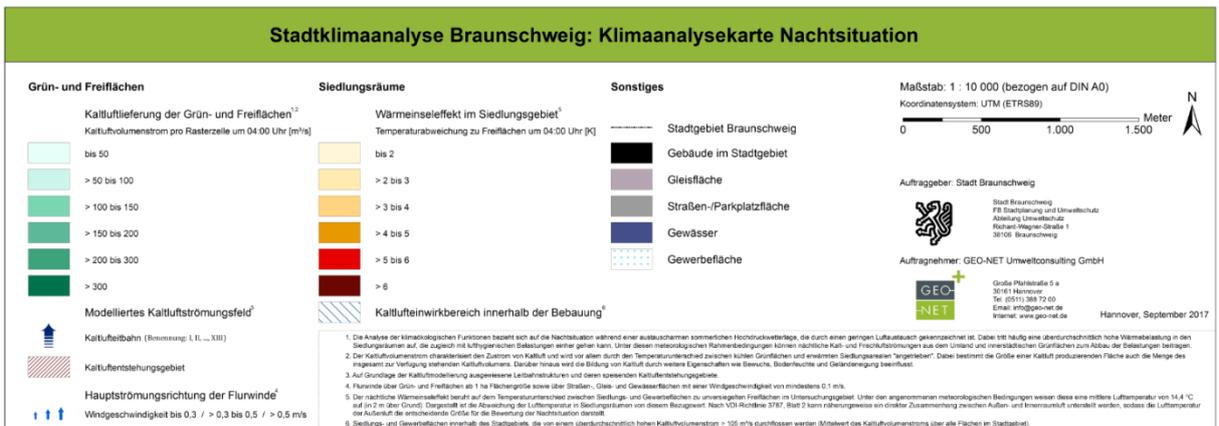
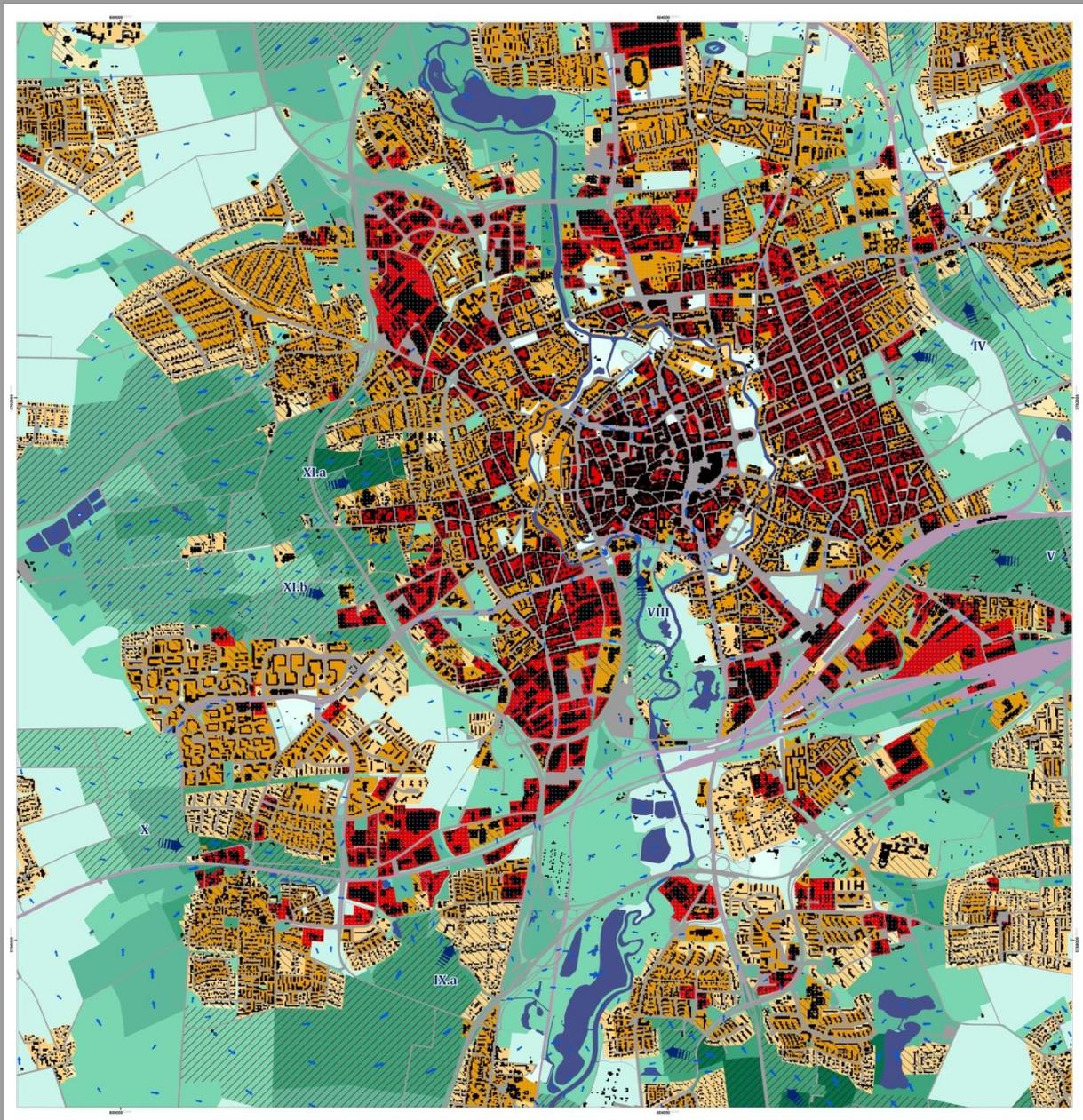


Abb. 12: Klimaanalysekarte Nachtsituation für einen Ausschnitts des Braunschweiger Stadtgebiets (gesamtsstädtische Darstellung im A3-Format in Abb. A 5 im Anhang)



5.2.2 TAGSITUATION

Zur Bestimmung der **Aufenthaltsqualität am Tage** ist die PET, als thermischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung, der maßgebende Parameter (vgl. Kap. 4.5). Die Wärmebelastung wird in der Klimaanalysekarte für die Tagsituation nicht nur für Grünflächen sowie den Siedlungs- und Gewerbebereich, sondern zusätzlich (und im Unterschied zur Nachtsituation) auch für Straßen, Wege und Plätze quantitativ dargestellt und nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9 in physiologische Belastungsstufen eingeteilt (vgl. Tabelle 2 auf S. 20).

Siedlungsflächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines Strahlungstages tagsüber größtenteils eine *starke*, Gewerbeflächen sogar eine überwiegend *extreme Wärmebelastung* auf, was auf den geringen Grünanteil und den insb. bei Gewerbeflächen meist relativ hohen Versiegelungsgrad zurückzuführen ist (Abb. 13 bzw. Abb. A 6 im Anhang). Siedlungsflächen *mäßiger Wärmebelastung* stellen eine Ausnahme dar – dabei handelt es sich um aufgelockerte Flächen mit erhöhtem Grünanteil, die häufig am Siedlungsrand und in der Nähe von Wäldern oder Gewässern liegen.

Versiegelte Plätze und breite Straßen mit geringem Baumanteil sind in der Regel ebenfalls von einer *extremen Wärmebelastung* betroffen, während es andererseits auch (kleinere) Straßenzüge gibt, die aufgrund der Beschattung durch Bäume, eine nur *mäßige Wärmebelastung* aufweisen.

Bei den Grünflächen ist die geringste Wärmebelastung in Waldgebieten zu finden, die ihrer schattenspendenden Wirkung in Bezug auf das Aufenthaltsniveau des Menschen in 2 m ü. Gr. zugeschrieben werden kann. *Extreme Wärmebelastungen* finden sich über den großen Freiflächen im Außenbereich (Ackerflächen). Die übrigen Flächen weisen größtenteils eine *starke Wärmebelastung* auf, wobei diese wesentlich über den Anteil an (schattenspendenden) Grünstrukturen gesteuert wird.

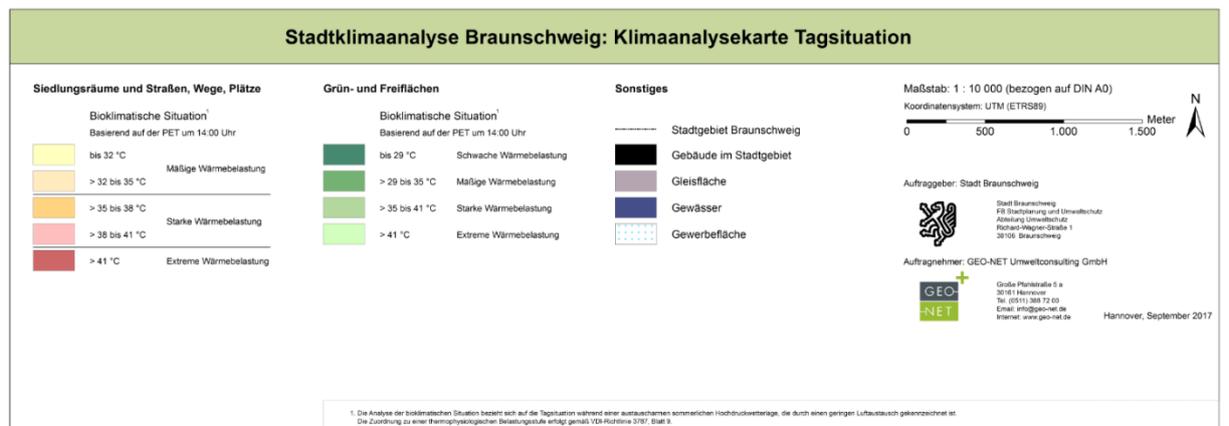
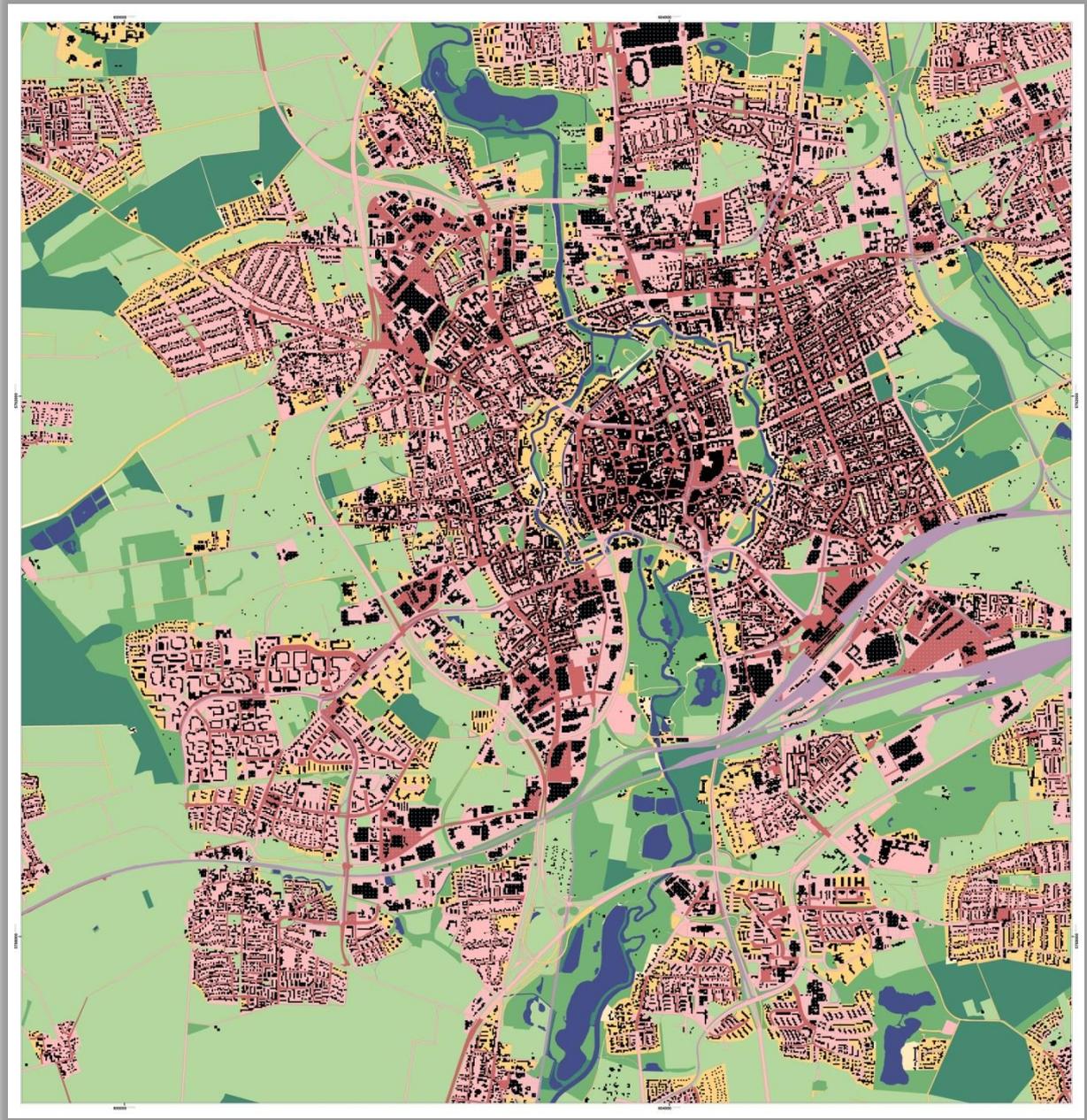


Abb. 13: Klimaanalysekarte Tagsituation für einen Ausschnitts des Braunschweiger Stadtgebiets (gesamtmstädtische Darstellung im A3-Format in Abb. A 6 im Anhang)



6 Planungshinweiskarten

6.1 VORGEHENSWEISE

Analog zu den Klimaanalysekarten wurde jeweils eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils nur auf das Stadtgebiet Braunschweigs beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum** (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarten bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Bewertung in den Planungshinweiskarten fußt dagegen auf den relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

Für die qualitative Bewertung von Klimafaktoren bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Maßstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie bspw. *Hoch* und *Niedrig* oder *Günstig* und *Ungünstig* erfolgt. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, einer Beurteilung das lokale bzw. regionale Wertenniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a).

Erstrebenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine **z-Transformation** standardisiert. Rechnerisch bedeutet diese, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen (S_1) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; Abb. 14).

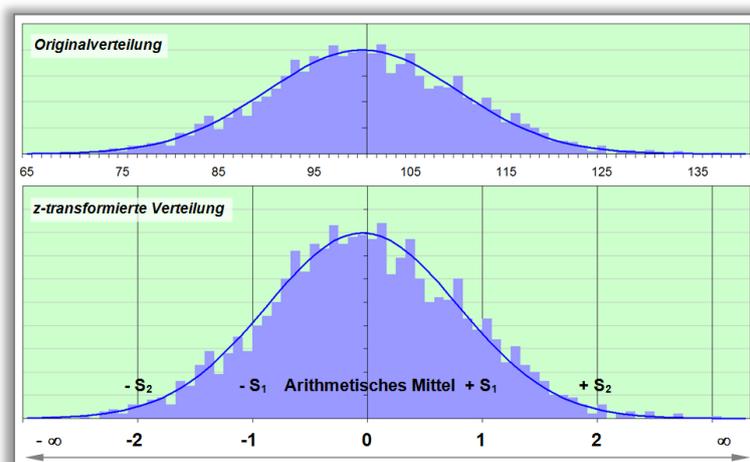


Abb. 14: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern (z-Transformation)



Tabelle 5: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerbeaum in der Nacht (Lufttemperatur T_a) sowie am Tage (PET, auch für den Straßenraum) und Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) der meteorologischen Parameter für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Braunschweigs.

Mittlerer z-Wert		T_a [°C] (04:00 Uhr)	PET [°C] (14:00 Uhr)		Qualitative Einordnung
T_a , PET _{Siedlung}	PET _{Straßenraum}		Siedlung	Straßenraum	
bis -1,5	bis -2,0	bis 17,5	bis 36,1	bis 36,9	1 = Sehr günstig
> -1,5 bis -0,5	> -2,0 bis -1	> 17,5 bis 18,3	> 36,1 bis 37,6	> 36,9 bis 38,9	2 = Günstig
> -0,5 bis 0,5	> -1 bis 0	> 18,3 bis 19,1	> 37,6 bis 39,2	> 38,9 bis 40,8	3 = Mittel
> 0,5 bis 1,5	> 0 bis 0,5	> 19,1 bis 19,9	> 39,2 bis 40,7	> 40,8 bis 41,8	4 = Ungünstig
> 1,5	> 0,5	> 19,9	> 40,7	> 41,8	5 = Sehr ungünstig
Mittelwert (± sd)		18,7 (± 0,8)	38,4 (± 1,5)	40,8 (± 1,9)	

6.1.2 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.

BEWERTUNG DER NACHTSITUATION

In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand (entsprechend wurde keine Bewertung des Straßenraums vorgenommen), sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 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 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 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 z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tabelle 5). Auch Gewerbeflächen wurden hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation klassifiziert, doch spielt deren Belastungssituation aufgrund der geringen Betroffenenzahlen in der Nacht eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu Wohnbauflächen.

BEWERTUNG DER TAGSITUATION

Zur Bewertung der Tagsituation wurde der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tabelle 2 auf S. 20; VDI 2004). Die Bewertung der thermischen Belastung im Stadtgebiet Braunschweigs orientiert sich daran, basiert jedoch letztlich auf einer z-Transformation, um das Verhältnis zwischen den Flächen im Stadtgebiet darstellen zu können (wiederum in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig*; Tabelle 5). Am Tage ist die Aufenthaltsqualität auf Straßen, Wegen und Plätzen (kurz: Straßenraum) von Bedeutung, sodass für diese eine Bewertung in dieselben fünf Belastungsklassen vorgenommen wurde. Aufgrund der höheren PET-Werte wurden die Grenzen der dabei verwendeten z-Transformation leicht modifiziert (Tabelle 5).



Tabelle 6: Einordnung des Kaltluftvolumenstroms (z-Transformation).

Mittlerer z-Wert	Kaltluftvolumenstrom (04:00 Uhr) [m ³ s ⁻¹ pro Rasterzelle]	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 70	Gering
> -1 bis 0	> 70 bis 130	Mittel
> 0 bis 1	> 130 bis 190	Hoch
> 1	> 190	Sehr hoch

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.

6.1.3 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 zugeordnet 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 von *Geringe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt. Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet¹⁵. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltfluthaushalt in den Fokus. So erhielten Kaltluftentstehungsgebiete bzw. Grünflächen als Teil einer Kaltluftleitbahn die höchste Bedeutung. Auch die Menge der über einer Fläche strömenden Kaltluft spielt eine Rolle. Dazu wurde der Kaltluftvolumenstrom via z-Transformation in vier Klassen von *Gering* bis *Sehr hoch* eingeteilt (Tabelle 6). 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 Siedlungsflächen ohne Gewerbe zugrunde gelegt.

Im Einzelnen wurde folgender Bewertungsschlüssel verwendet (vgl. vereinfachte Darstellung in Abb. 15):

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

a) Grünflächen, die Teil einer *Leitbahn* bzw. *Kaltluftentstehungsgebiet* sind.

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgte manuell und

¹⁵ Selbst ohne Siedlungsbezug bzw. Funktion für das Kaltluftprozessgeschehen sind Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht bebauten Flächen zu bevorzugen, sodass die Klasse *Sehr geringe Bedeutung* nicht vergeben wurde.



orientierte sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation. Auch Grünflächen, die als Kaltluftentstehungsgebiete auf das Stadtgebiet ausgerichtete Leitbahnen speisen, sind von besonderer Bedeutung.

- b) Freiflächen bzw. ≥ 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).

Grünflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Zusätzlich zu ihrem Kaltluftliefervermögen wirken sie ausgleichend auf das thermische Sonderklima im meist dicht bebauten Umfeld. Je stärker der Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind Grünflächen als Ausgleichsräume, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Umso größer eine Grünfläche ist, desto weiter reichen ihre ausgleichenden Effekte in das angrenzende Siedlungsgebiet (vgl. Kuttler 2011).

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

- c) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittlerem Kaltluftvolumenstrom (KVS)* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).

- d) Mindestens 1 ha große Grünflächen im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).

- e) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit *Sehr hohem* bzw. Freiflächen mit mindestens *Hohem KVS* und Siedlungsbezug (außerhalb des in d) genannten Entfernungsbereichs, jedoch in maximal 1 km Entfernung zu Siedlungsgebieten).

Auch ohne Leitbahn-Funktion während autochthoner Sommernächte und direkten Siedlungsbezug können Grünflächen, darunter insb. Freiflächen, während anderer Wetterlagen eine wichtige Rolle für die Durchlüftung einer Stadt einnehmen.

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- f) Grünflächen < 1 ha mit *Geringem KVS* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).

Innerhalb vom Belastungsräumen sind auch Grünflächen ohne Funktion für den Kaltlufthaushalt wertvoll, da sie sich am Tage weniger stark aufheizen und entsprechend in der Nacht weniger Wärme abgeben.

- g) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittleren KVS* im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).

- h) Straßenbegleitgrün¹⁶ im Nahbereich belasteter Siedlungsflächen (vgl. b)).

Straßenbegleitgrün ist i.d.R. eine kleine Grünfläche, die bei dichtem Bestand ggf. sogar ein Hindernis in Bezug auf die Durchströmbarkeit darstellen kann. Tagsüber sorgt es für Verschattung, sodass sich Straßen, Plätze und Parkplätze weniger stark aufheizen und entsprechend in der Nacht weniger Wärme abgeben.

- i) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit *Mittleren* oder *Hohem KVS* bzw. übrige Freiflächen mit Siedlungsbezug (vgl. e)).

- j) Übrige Grünflächen mit mindestens *Hohem Kaltluftvolumenstrom*.

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

- k) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen.

¹⁶ Straßenbegleitgrün wurde automatisiert anhand folgender Kriterien bestimmt: Nutzung = Gehölz, Verhältnis „Umfang : Fläche“ $> 0,1$ und Entfernung zu Straßen bzw. Bahnflächen ≤ 10 m.

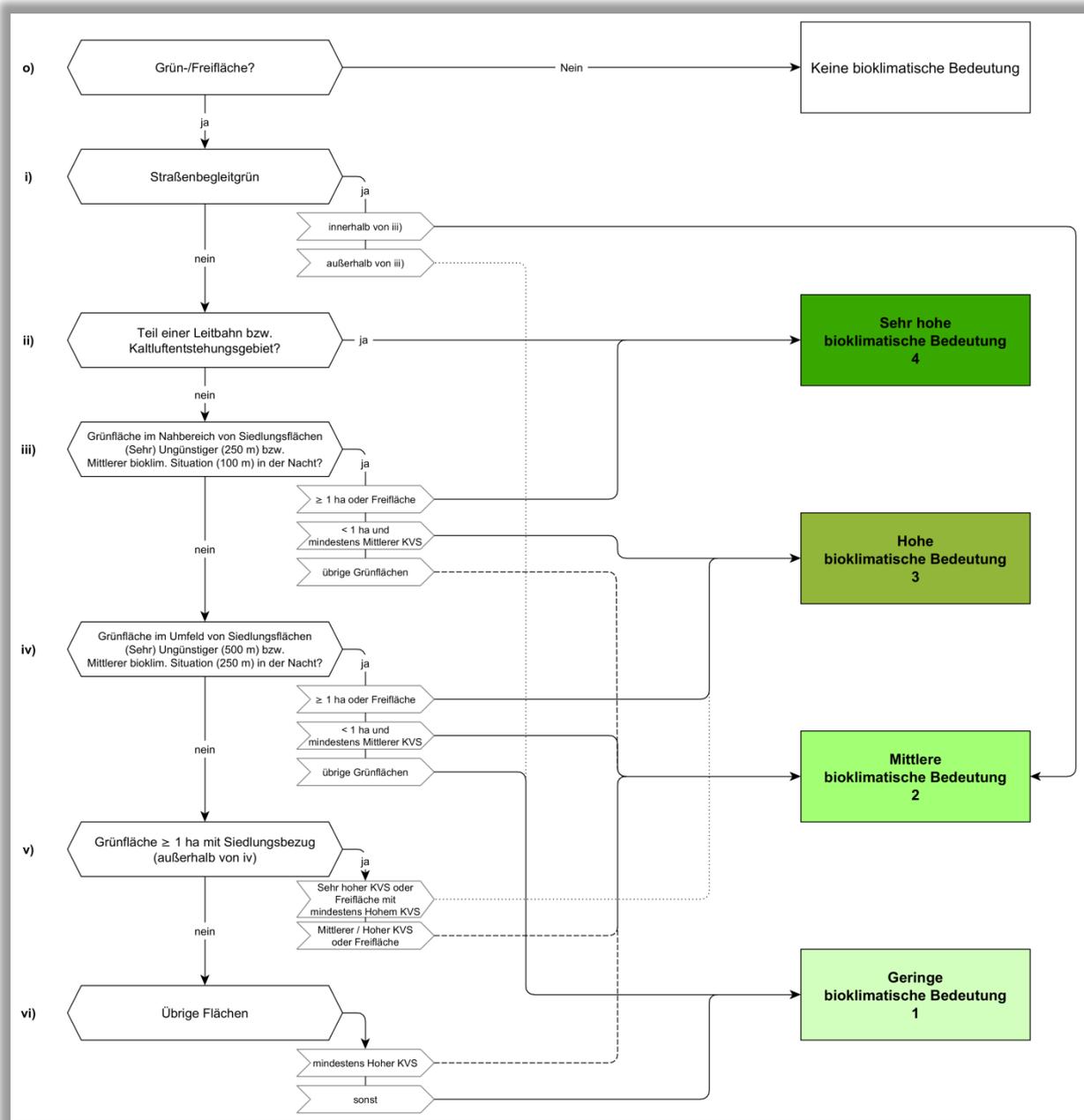


Abb. 15: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht

BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN AM TAGE

Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen hauptsächlich auf der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerberäumen sowie dem Verschattungsanteil. 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.

Die Verschattung beruht auf den Laserscan-Daten in 1 m-Auflösung und wurde in ESRI ArcGIS über das *Hillshade*-Werkzeug berechnet ("Schummerung"). Dabei wurde die mittlere Verschattung von vier Zeitpunkten eines exemplarischen Sommertages ausgegeben und in die Klassen *Hohe*, *Mittlere* bzw. *Geringe Verschattung* und *Freifläche* eingeteilt (11:00, 13:00, 15:00 und 17:00 Uhr am 15.07.2017; vgl. Tab. A 1 im Anhang). Zu berücksichtigen ist, dass bei der Anwendung des *Hillshade*-Werkzeugs neben der



Verschattung durch Grünstrukturen wie z.B. Bäumen auch der von Gebäuden verursachte Schattenwurf in die Berechnung eingeht¹⁷. Gegenüber den PET-Modellergebnissen, in die die Verschattung zu einem gewissen Grad ebenfalls einfließt, hat der auf diese Weise bestimmte Verschattungsanteil den Vorteil, auch den Schattenwurf einzelner (kleinkroniger) Bäume zu erfassen, darüber hinaus zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Tages, sodass er in Kombination mit der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerbeflächen als Parameter zur Beschreibung der Aufenthaltsqualität am Tage gewählt wurde.

Der Einstufung liegt folgender Bewertungsschlüssel zugrunde (vgl. vereinfachte Darstellung in Abb. 16).

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

- a) Grünfläche mit mindestens *Mittlerer Verschattung* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger bioklimatischer Situation* fußläufig sehr gut erreichbar¹⁸ (300 m).

Je stärker die bioklimatische Belastung im Siedlungsgebiet, desto wichtiger ist eine für alle Bevölkerungsgruppen fußläufige Erreichbarkeit schattenspendender Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Maßgeblich für die Aufenthaltsqualität ist die Existenz ausreichend beschatteter Flächen, d.h. ein gewisser Verschattungsanteil sollte vorhanden sein.

- b) Grünfläche mit *Hoher Verschattung* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* fußläufig gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

- c) Grünfläche mit *Mittlerer Verschattung* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* fußläufig gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

- d) Übrige Grünflächen mit einer *Hohen Verschattung*.

Mit einer hohen Verschattung können auch Grünflächen ohne direkten Siedlungsbezug bzw. im Umfeld von Siedlungsflächen günstigen Bioklimas wichtige Rückzugsorte darstellen (z.B. Wälder als Naherholungsgebiete).

- e) Straßenbegleitgrün im näheren Umfeld belasteter Siedlungsflächen (vgl. b)).

Straßenbegleitgrün verhindert das Aufheizen von Straßen, Plätzen und Parkplätzen und sorgt entlang von Rad- und Gehwegen für ein angenehmeres Aufenthaltsklima.

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- f) Grünflächen mit *Geringer Verschattung* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger*, *Ungünstiger* oder *Mittlerer* bzw. *Günstiger bioklimatischer Situation* fußläufig mindestens gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

- g) Übrige Grünflächen mit einer *Mittleren Verschattung*.

- h) Übriges Straßenbegleitgrün.

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

- i) Übrige Grünflächen mit *Geringer Verschattung* sowie alle *Freiflächen*.

Selbst im Nahbereich belasteter Siedlungsräume stellen unversiegelte Freiflächen an autochthonen Sommertagen aufgrund der hohen Einstrahlung keine Rückzugsorte dar.

¹⁷ Das *Hillshade*-Werkzeug berechnet wie stark Oberflächen bestrahlt werden. Dabei werfen Bäume zwar einen Schatten, doch je nach Sonnenwinkel geht die Krone teilweise als bestrahlte Oberfläche in die Berechnung ein (d.h. ohne Schatten), sodass der Verschattungsanteil insgesamt leicht unterschätzt wird.

¹⁸ Eine *sehr gute* bzw. *gute* fußläufige Erreichbarkeit wird über eine maximale Wegstrecke von 5 bzw. 10 min definiert. Bei einer angenommenen Gehgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} ($3,6 \text{ km h}^{-1}$) entspricht dies einer Entfernung von 300 bzw. 600 m. Vereinfachend bezieht sich diese auf die Luftlinie ohne die tatsächliche Wegeführung zu berücksichtigen (Ampeln, kein Durchgang, etc.).

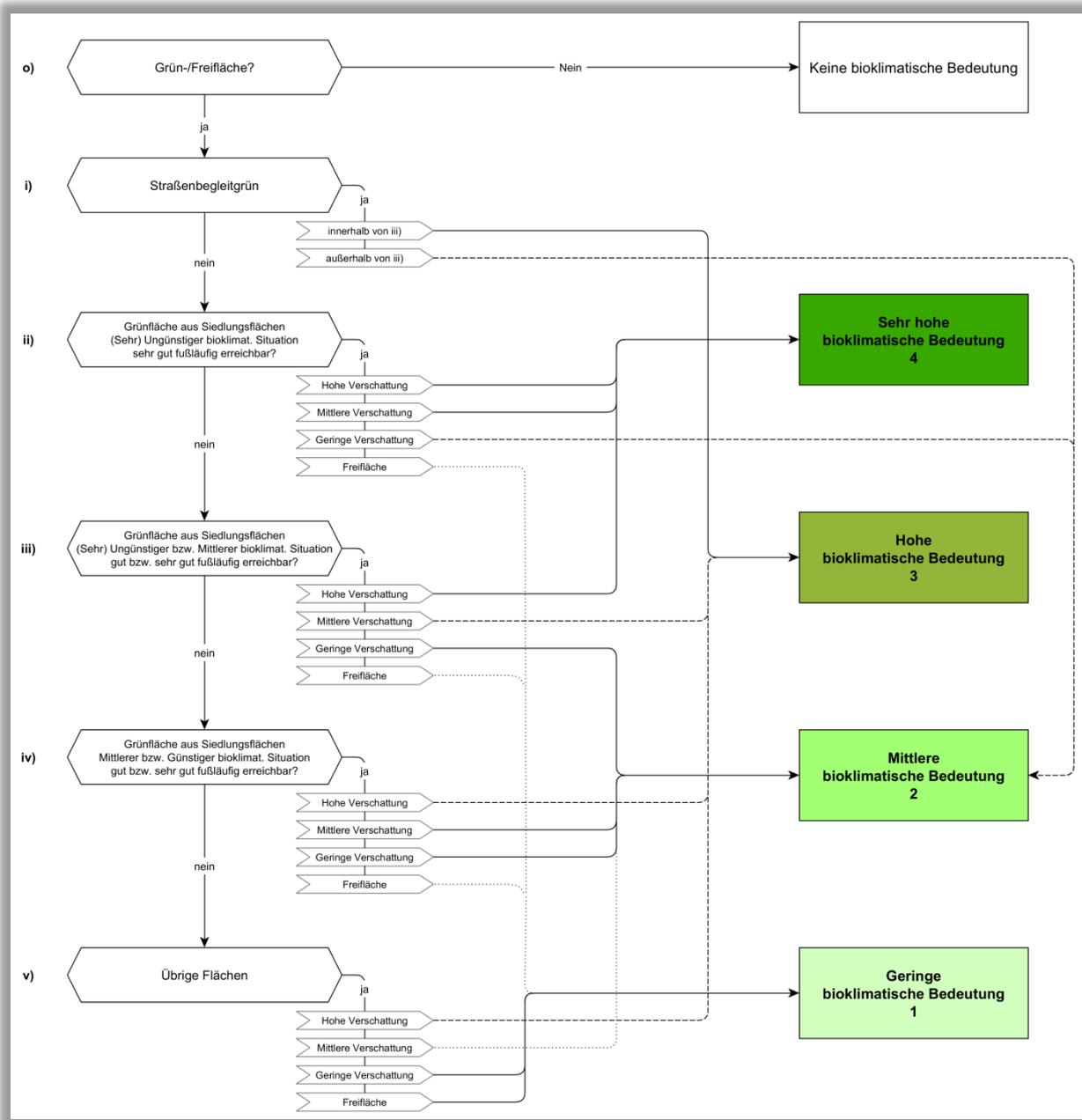


Abb. 16: Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage

6.2 ERGEBNISSE

NACHTSITUATION

Flächen mit einer *Sehr ungünstigen bioklimatischen Situation* machen unter reinen (Wohn-)Siedlungen nur einen geringen Anteil von 2 % aus, betreffen allerdings große Bereiche der Innenstadt (Abb. 17, Tabelle 7). In den Ringgebieten um die Innenstadt ist ebenfalls eine hohe nächtliche Überwärmung vorzufinden (gesamstädtisch 10 % Anteil *Ungünstig* bewerteter Flächen), während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert (etwas weniger als die Hälfte der Wohnflächen weist eine *Mittlere bioklimatische Situation* auf). Im gering besiedelten und durch einen höheren Grünanteil geprägten Rand- und Außenbereich herrschen überwiegend *Günstige bis Sehr günstige* Verhältnisse vor (mehr als 40 % der Gesamtfläche).



Tabelle 7: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlung	Gewerbe	
1 = Sehr günstig	3,3	3,6	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
2 = Günstig	38,2	8,8	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
3 = Mittel	46,3	11,9	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
4 = Ungünstig	10,1	36,0	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
5 = Sehr ungünstig	2,2	39,7	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/ Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Bei den Gewerbeflächen verschieben sich die Flächenanteile deutlich. Der typischerweise hohe Versiegelungsgrad und geringe Grünanteil sorgen nachts für eine starke Überwärmung, sodass ca. drei Viertel der Gewerbeflächen eine mindestens *Ungünstige* und nur knapp über 10 % eine *Günstige bioklimatische Situation* oder besser aufweisen (Tabelle 7). Wie bereits erwähnt, steht nachts die Belastung in Wohnsiedlungsflächen im Vordergrund und Maßnahmen sind vor allem für den Erhalt bzw. möglichst die Verbesserung der Situation in belasteten Flächen nötig. Doch sollten aufgrund der hohen Belastungen Gewerbeflächen nicht außer Acht gelassen werden, insb. wenn sie einen räumlichen Bezug zu Wohnbebauungen aufweisen.

Den Grünflächen im Braunschweiger Stadtgebiet kommt etwa zur Hälfte eine *Hohe bis Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* zuteil (knapp 27 % bzw. 25 %; Tabelle 8). Diese gilt in Bezug auf das derzeit vorhandene Siedlungsgebiet. Knapp 16 % der Grünflächen weisen eine *Geringe Bedeutung* auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar – mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Wald- und Ackerflächen bzw. Straßenbegleitgrün. Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss.

TAGSITUATION

Auch am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine *Mittlere bioklimatische Belastung* (65 %) und der Anteil (*Sehr*) *Günstiger* Flächen überwiegt gegenüber *Ungünstigen*



(24 % gegenüber 11 %, *Sehr ungünstig* bewertete Flächen sind zu vernachlässigen; Abb. 18, Tabelle 9). Dies liegt daran, dass die meisten Wohnflächentypen Grünflächen mit schattenspendenden Grünstrukturen aufweisen bzw. die dichte sowie hohe Zentrumsbebauung für Schattenwurf zwischen den Gebäuden sorgt. Gewerbeflächen beinhalten dagegen oftmals große versiegelte Freiflächen, in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage höher ausfällt (70 % *Ungünstige* bzw. *Sehr ungünstige Flächen*).

Straßen, Wege und Plätze weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung insgesamt die höchsten thermischen Belastungen auf (Tabelle 5). Um die relativen Unterschiede innerhalb des Straßenraums abzugrenzen und im Kartenbild darzustellen, wurden die Klassengrenzen bei der z-Transformation im Vergleich zu den Siedlungsflächen modifiziert (s.o.), sodass die Flächenanteile der Belastungsstufen des Straßenraums nicht direkt mit denen der Siedlungsflächen vergleichbar sind. Die thermische Belastung am Tage variierte innerhalb des Straßenraums stärker als im Siedlungs- und Gewerberaum. *Ungünstige* bis *Sehr ungünstige* Situationen treten häufiger auf (ca. 32 % bzw. 16 %), doch sind auch nennenswerte Anteile *Günstiger* bis *Sehr günstiger* Flächen vorhanden (jeweils ca. 8 %; Tabelle 9). Diese Bandbreite ist auf die unterschiedlichen Flächentypen zurückzuführen – von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschattete Straßenabschnitte.

Knapp 30 % der Grünflächen wird eine mindestens *Hohe Bedeutung* zugeschrieben, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung (Tabelle 10). Die vielen und weitläufigen landwirtschaftlichen Flächen im Stadtgebiet Braunschweigs erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzug und sorgen für einen hohen Anteil an Grünflächen *Geringer Bedeutung* (53 %).

Tabelle 8: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	15,8	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen
2 = Mittlere	32,8	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
3 = Hohe	26,7	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
4 = Sehr hohe	24,7	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).



Tabelle 9: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]			Allgemeine Planungshinweise
	Siedlung	Gewerbe	Straße	
1 = Sehr günstig	5,5	1,8	7,6	Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
2 = Günstig	18,1	7,7	8,1	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
3 = Mittel	64,9	20,2	37,0	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
4 = Ungünstig	11,4	41,5	31,5	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
5 = Sehr ungünstig	0,1	28,8	15,8	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse bestätigen die Einschätzung der Stadtklimaanalyse 2012, dass es in Braunschweig thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt. Deren bioklimatische Situation sollte mindestens erhalten, möglichst durch geeignete Maßnahmen verbessert werden. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Kaltluftleitbahnen bzw. kleinräumige Ausgleichsströmungen durchströmt, doch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtkerns ab und fällt in der Innenstadt sowie einigen Bereiche der Ringgebiete 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 diesem Gutachten nicht näher betrachtete, Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen und insb. die Funktion der Kaltluftleitbahnen erhalten, d.h. auf deren Bebauung verzichtet werden.

Die Aufteilung in eine PHK für die Nacht- und eine für die Tagsituation hat den Vorteil, dass die einzelnen Flächen separat bewertet werden und mögliche Maßnahmen entsprechend zugeordnet werden können. Während einige Flächen für beide Zeitpunkte dieselben Tendenzen annehmen – z.B. sind innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage i.d.R. positiv zu sehen, Gewerbefläche dagegen eher jeweils ungünstig einzustufen – treten andere Flächen auf, die unterschiedliche Bewertungen zu den beiden Zeitpunkten erfahren. So steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist sehr geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber. In einer kombinierten PHK für die Nacht- und Tagsituation würden solch verschiedene Bewertungen



womöglich zu Lasten der Genauigkeit zu einem mittleren Zustand zusammengefasst. Mit der Aufteilung ist allerdings geboten, beide PHKs bei Bauvorhaben bzw. zur Beurteilung von Flächen(nutzungsänderungen) zu Rate zu ziehen.

AUSBLICK: STADTKLIMATISCHE MASSNAHMEN

Den bewerteten Siedlungs- und Grünflächen sind jeweils allgemeine Planungshinweise zugeordnet, die eine erste Einschätzung möglicher Maßnahmen erlauben, doch bezogen auf den Einzelfall genauer betrachtet werden müssen. Im nächsten Schritt der Stadtklimaanalyse Braunschweig werden Aussagen zum Klimawandel und zur Betroffenheit in der Bevölkerung gemacht. Daraus sollen konkrete Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Erhalt des thermischen Komforts sowie Reduzierung von Hitzestress während hochsommerlichen Extremsituationen abgeleitet werden, die über das allgemeine Niveau der Planungshinweise hinausgehen. Diese werden in Form eines Maßnahmenkataloges in einem separaten Bericht zusammengefasst, doch soll an dieser Stelle bereits ein kurzer Überblick über stadtklimatische Maßnahmen bzw. Empfehlungen gegeben werden (vgl. MUNLV 2010, MVI 2012).

Soweit möglich sollte der Grünanteil im Stadtgebiet erhöht werden, insb. in thermisch belasteten Bereichen (Pocket-Parks, großflächige Grünanlagen). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Größe) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekten zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

Neben ihres Potenzials zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen Bäume (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung

Tabelle 10: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	53,2	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
2 = Mittlere	18,0	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
3 = Hohe	17,3	Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsort dienen können.
4 = Sehr hohe	11,6	Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.

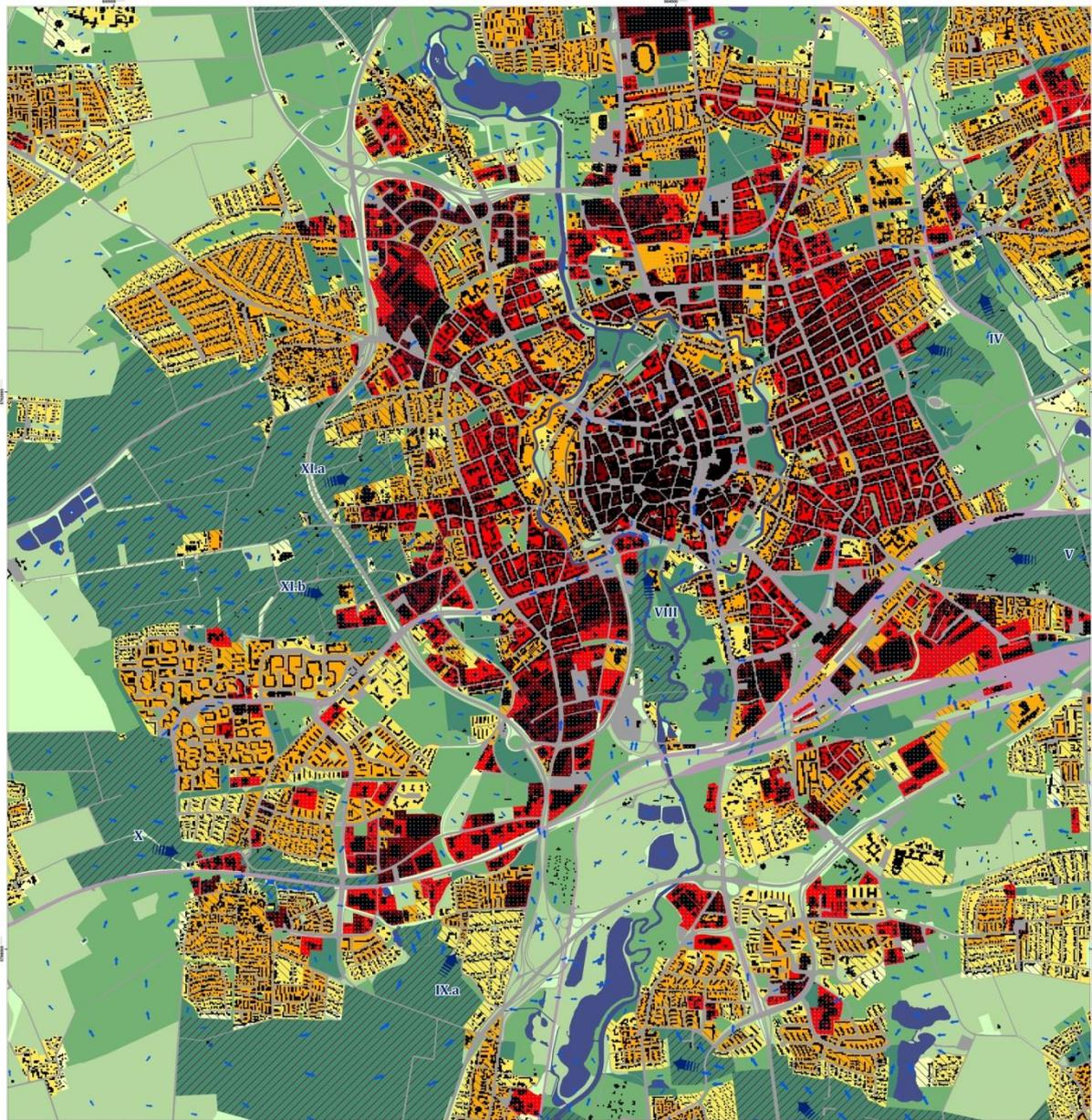


entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der vertikale Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten.

Klimaangepasstes Bauen ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei der Verdichtung sind entsprechende Maßnahmen möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlaf- bzw. Arbeitszimmern der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird.

Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente oder Wärmedämmung sind auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude.

Bei Nachverdichtungen im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss.



Stadtklimaanalyse Braunschweig: Planungshinweiskarte Nachtsituation

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

- **Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimatologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsgerecht zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchdringbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
- **Hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimatologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchdringbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
- **Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimatologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- **Geringe bioklimatische Bedeutung**
Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

Siedlungs- und Gewerbeflächen - Wirkungsräume
Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen.

- **Sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimatischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- **Günstige bioklimatische Situation**
Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimatischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
- **Mittlere bioklimatische Situation**
Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- **Ungünstige bioklimatische Situation**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
- **Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsektungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Luftaustausch (modelliertes Kaltluftströmungsfeld)

- Kaltluftbahn (Brennspur: I, II, ..., XIII)
- Kaltluftvolumenstrom Mittel / Hoch / Sehr hoch
- Kaltluftentstehungsbereich
- Kaltluftwirkebereich innerhalb der Bebauung

Sonstiges

- Gebäude
- Giesfläche
- Straßen-/Parkplatzfläche
- Gewässer
- Gewerbefläche

Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)
Koordinatensystem: UTM (ETRS89)

0 0,4 0,8 Kilometer

Auftraggeber: Stadt Braunschweig

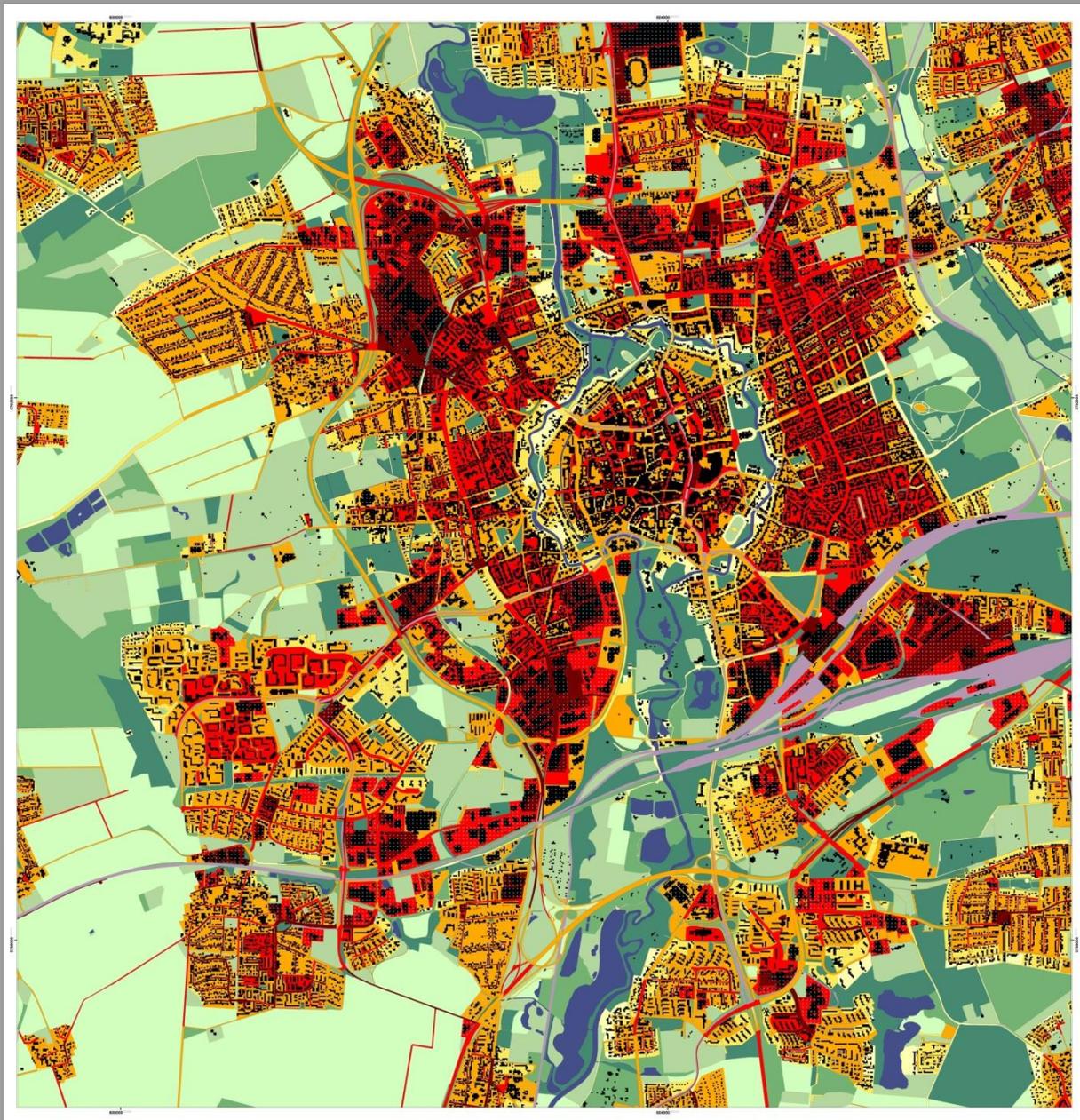
Stadt Braunschweig
FB Stadtplanung u. Umweltschutz
Abteilung Umweltschutz
Richard-Wagner-Strasse 1
38106 Braunschweig

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltingenieur GmbH

GEO-NET
Grüne Planstraße 5 a
30151 Hannover
Tel: (0511) 398 72 00
E-Mail: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

Hammer, Oktober 2017

Abb. 17: Planungshinweiskarte Nachtsituation für einen Ausschnitts des Braunschweiger Stadtgebiets (gesamstädtische Darstellung im A3-Format in Abb. A 7 im Anhang)



Stadtklimaanalyse Braunschweig: Planungshinweiskarte Tagsituation

<p>Grün- und Freiflächen - Ausgleichsräume Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und diese nicht einschränken.</p> <ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe bioklimatische Bedeutung Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die vollständig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten. Hohe bioklimatische Bedeutung Siedlungsnahe Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente (vorwiegend) überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsernaute Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fulltaufender Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können. Mittlere bioklimatische Bedeutung Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsgebieten (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavertikal). Geringe bioklimatische Bedeutung Freiflächen bzw. siedlungsernaute Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavertikal). <p>Sonstiges</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäude Gewässer Gleisfläche Gewerbefläche 	<p>Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie Straßen, Wege und Plätze - Wirkungsräume</p> <ul style="list-style-type: none"> Sehr geringe bioklimatische Belastung Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Geringe bioklimatische Belastung Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden. Mittlere bioklimatische Belastung Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des Stellenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten vollständig erreichbar und zugänglich sein. Hohe bioklimatische Belastung Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entlastung. Dies gilt auch für Flächen des Stellenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten vollständig gut erreichbar und zugänglich sein. Sehr hohe bioklimatische Belastung Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung z.B. Pocket-Parks, Verschattung und Entlastung. Dies gilt auch für Flächen des Stellenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten vollständig gut erreichbar und zugänglich sein.
---	--

Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)

Koordinatensystem: UTM (ETRS89)

0 0,4 0,8 Kilometer

Auftraggeber: Stadt Braunschweig

Stadt Braunschweig
FB Stadtplanung u. Umweltschutz
Abteilung Umweltschutz
Richard-Wagner-Strasse 1
38106 Braunschweig

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH

GEO-NET
Größe Planblatte 5 x
30181 Hannover 72 00
Tel. (0511) 369 72 00
Email: info@gco-net.de
Internet: www.gco-net.de

Hannover, Oktober 2017

Abb. 18: Planungshinweiskarte Tagsituation für einen Ausschnitts des Braunschweiger Stadtgebiets (gesamstädtische Darstellung im A3-Format in Abb. A 8 im Anhang)



7 Zusammenfassung und Ausblick

Die aktuelle Stadtklimaanalyse für Braunschweig schreibt die mesoskaligen Untersuchungen der Jahre 2005 bzw. 2012 in deutlich höherer räumlicher Auflösung fort 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 samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld getroffen werden.

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. Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel). Zur Innwertsetzung und Erstellung von Planungskarten wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen.

Die Klimaanalysekarten spiegeln die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen für das gesamte Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulichen die strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeinseleffekt (bis zu 8 K höhere Temperaturen im Stadtkern verglichen mit siedlungsfernen Freiflächen), bilden die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab (Flurwinde) und identifizieren 13 für die Durchströmung des Stadtgebiets besonders wichtige Kaltluftleitbahnbereiche.

Die Planungshinweiskarten quantifizieren die Belastung in den Siedlungsflächen (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume im Stadtgebiet Braunschweigs. In der Nacht ist ein erholsamer Schlaf von besonderer Bedeutung, sodass in der Bewertung die reinen Wohngebiete im Vordergrund stehen. Am Tage ist die Aufenthaltsqualität im Freien der maßgebliche Parameter und es werden sowohl Gewerbeflächen als auch der Straßenraum untersucht.

In der Nacht belastete Siedlungsflächen treten insb. in der Innenstadt sowie den umliegenden Ringgebieten auf, während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert. Am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine mittlere Belastung, Gewerbeflächen sowie der Straßenraum dagegen oftmals ungünstige bioklimatische Bedingungen. An Sommertagen bieten knapp 30 % der Grünflächen im Braunschweiger Stadtgebiet eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung. In der Nacht weist etwa die Hälfte der Grünflächen eine hohe Bedeutung in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen auf. Während insb. innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage in der Regel eine positive Wirkung ausüben, steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist sehr geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber (hohe Einstrahlung). Folglich gilt es beide Planungshinweiskarten bei der Beurteilung von Flächen zu betrachten.

Aus den bisherigen Ergebnissen der Stadtklimaanalyse kann festgehalten werden, dass es in Braunschweig thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt, deren bioklimatische Situation 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 sowie einigen Bereiche der Ringgebiete 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 diesem Gutachten nicht näher betrachtete, Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen.

Bis hierhin sind den bewerteten Siedlungs- und Grünflächen jeweils allgemeine Planungshinweise zugeordnet, die eine erste Einschätzung möglicher Maßnahmen bzw. Gebote erlauben, doch bezogen auf den Einzelfall genauer betrachtet werden müssen. In einem zweiten Teil der Stadtklimaanalyse werden die Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima untersucht und ein Betroffenheiten im Ist- sowie zukünftigen Zustand bestimmt. Aus den Ergebnissen beider Teile wird ein Katalog mit konkreten Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Erhalt des thermischen Komforts sowie Reduzierung von Hitzestress während hochsommerlichen Extremsituationen abgeleitet.

Zusammen mit dem gerade in Erarbeitung befindlichen Integrierten Stadtentwicklungskonzept (ISEK) 2030 sollen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in die geplante Erstellung eines neuen Flächennutzungsplans (FNP) einfließen.



Quellenverzeichnis

- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2017a) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon
- DWD (2017b) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>
- GEO-NET (2006) – GEO-NET Umweltconsulting GmbH: Modellierung meteorologischer und lufthygienischer Felder im Stadtgebiet Braunschweig unter Anwendung des mesoskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodells FITNAH. Gutachten im Auftrag der Stadt Braunschweig.
- GEO-NET (2007) – GEO-NET Umweltconsulting GmbH: Klima- und immissionsökologische Funktionen im Stadtgebiet Braunschweig. Gutachten im Auftrag der Stadt Braunschweig.
- Gewerbeaufsichtsamt (2011) - Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim: Modellgestützte Voruntersuchungen zur Fortschreibung des Luftreinhalteplanes im Rahmen der NO₂-Notifizierung. Braunschweig.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- HBEFA (2017) – Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr: HBEFA Version 3.3. Hintergrundbericht. Online: www.hbefa.net/e/documents/reports.html
- Hergert (1991): Klimatische und lufthygienische Situation am Kronsberg und die Beeinträchtigung der klimaökologischen Ausgleichswirkung durch Bebauung. Diplomarbeit an der Universität Hannover.
- Höppe, P. und H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1): S. 22-29.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan.* Nr. 114.
- Kiese, O. (1998): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. *Landschaft + Stadt* 20, H.2: S. 67-71.
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig.* Band 13.
- Kuttler, W. (2009): *Klimatologie.* Paderborn.
- Kuttler, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. *Environmental Sciences Europe* 2011: 23:21.
- Malberg, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie-Eine Einführung.* 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Mosimann et al. (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. *Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen.* Heft 4/99: S. 202-275.
- MUNLV (2010) – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: *Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.*
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: *Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.*
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- SCHÖNWIESE, C.- D. (2008): *Klimatologie.* 3. Auflage. Stuttgart.
- Sonnenverlauf (2017): Online-Dienst zu Solardaten verschiedener Standorte. Online: www.sonnenverlauf.de
- Stadt Braunschweig (1999): *Landschaftsrahmenplan gemäß § 5 Niedersächsisches Naturschutzgesetz für die Stadt Braunschweig.*
- Stadt Braunschweig (2007): *Luftreinhalte- und Aktionsplan.*



Stadt Braunschweig (2017): Luftreinhalte- und Aktionsplan Braunschweig.

Online: www.braunschweig.de/leben/umwelt_naturschutz/luft/luftreinhalteplanung.html

Stadt Braunschweig 2016: Braunschweig in der Statistik. Fünfundzwanzigste Folge 2016.

Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II). Forschungsbericht KLIMOPASS.

Steinicke & Streifeneder (2012) - Steinicke & Streifeneder Umweltuntersuchungen GbR und Richter & Röckle Immissionen Meteorologie Akustik: Stadtklimaanalyse Braunschweig. Gutachten im Auftrag der Stadt Braunschweig.

UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raumtemperatur.

Online: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur

VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.

VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.



Anhang

Tab. A 1: Sonnenstand in Braunschweig am 15.07.2017 zu vier verschiedenen Zeiten als Grundlage für die Berechnung der Verschattung (nach Sonnenverlauf 2017) und Einteilung in Verschattungsklassen.

Uhrzeit	Azimut [°]	Sonnenhöhe [°]	Verschattungsklasse	Verschattungsanteil
11:00	124,2	48,6	Hoch	ab 60 %
13:00	169,2	58,8	Mittel	45 % bis < 60 %
15:00	220,2	54,0	Gering	30 % bis < 45 %
17:00	254,5	38,6	Freifläche	< 30 %

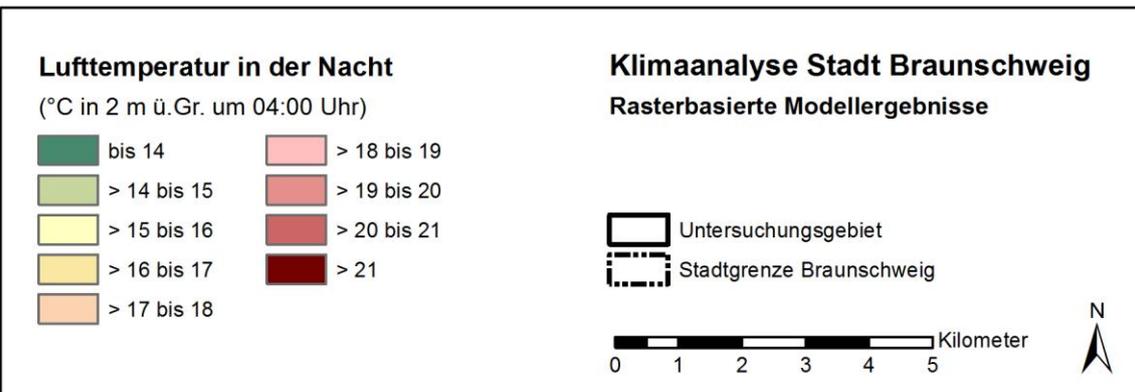
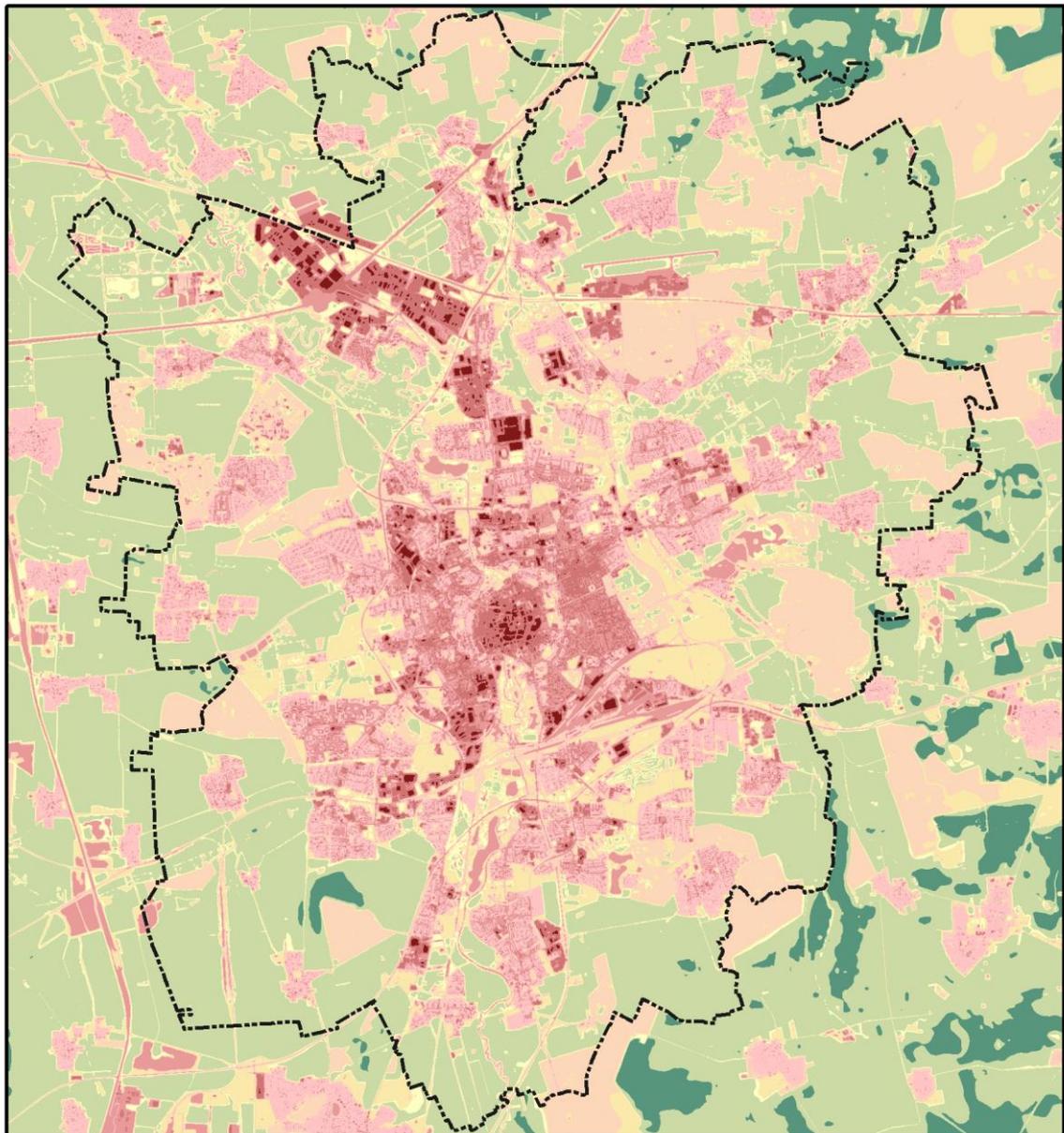


Abb. A 1: Nächtliches Temperaturfeld im Untersuchungsgebiet

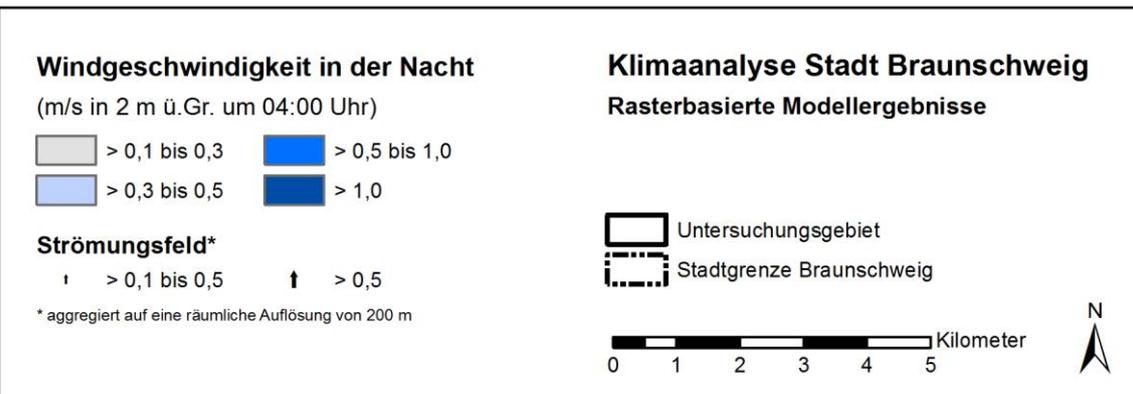
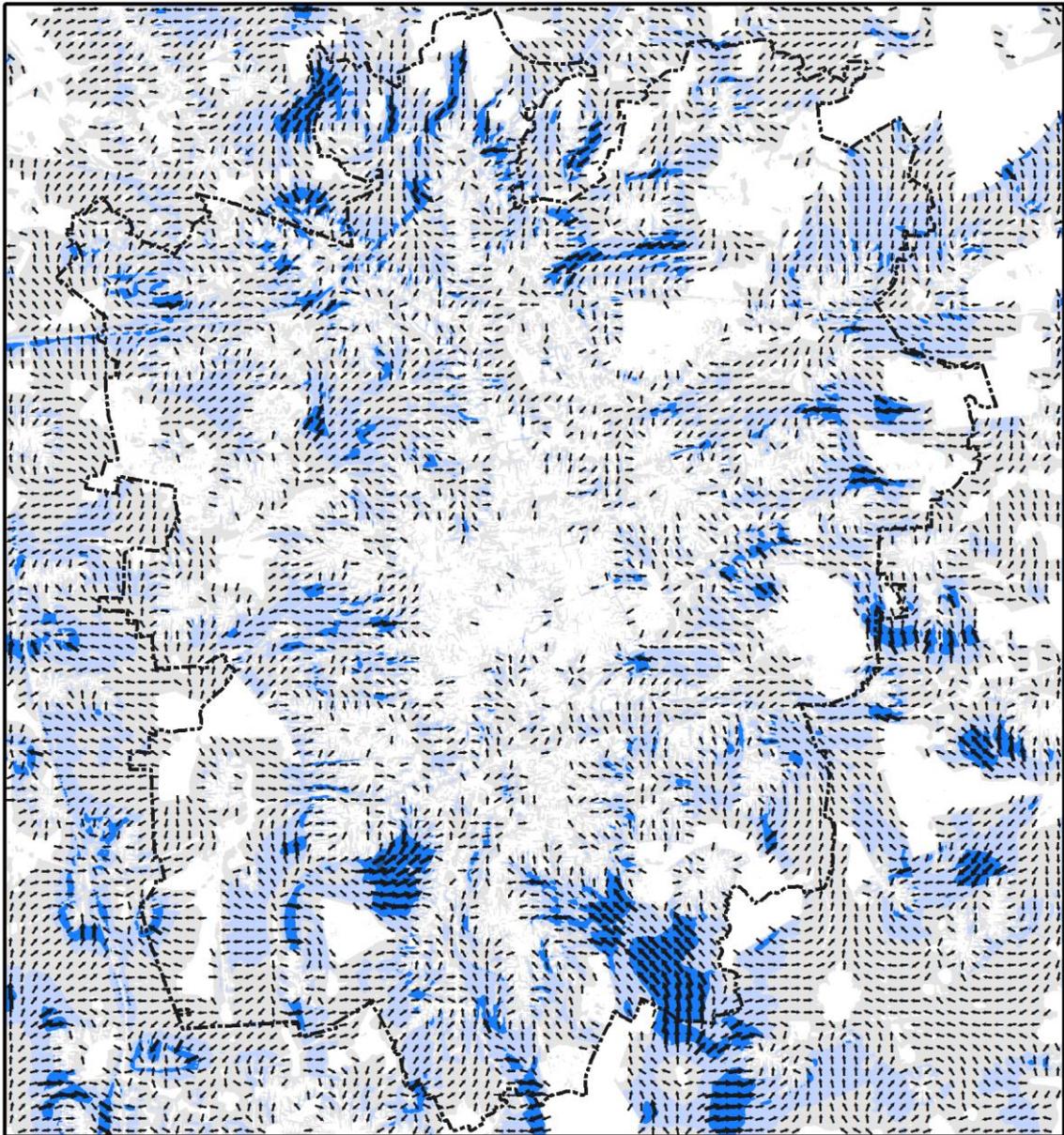


Abb. A 2: Nächtliches Kaltluftströmungsfeld im Untersuchungsgebiet

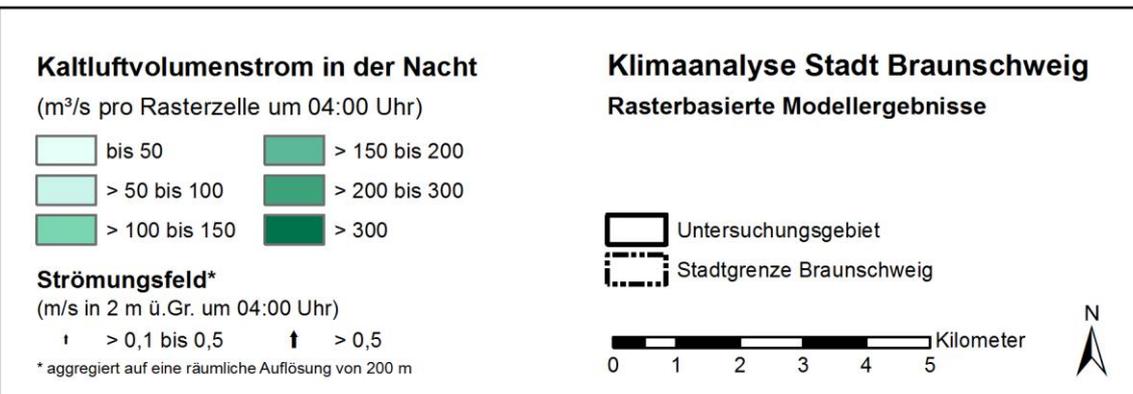
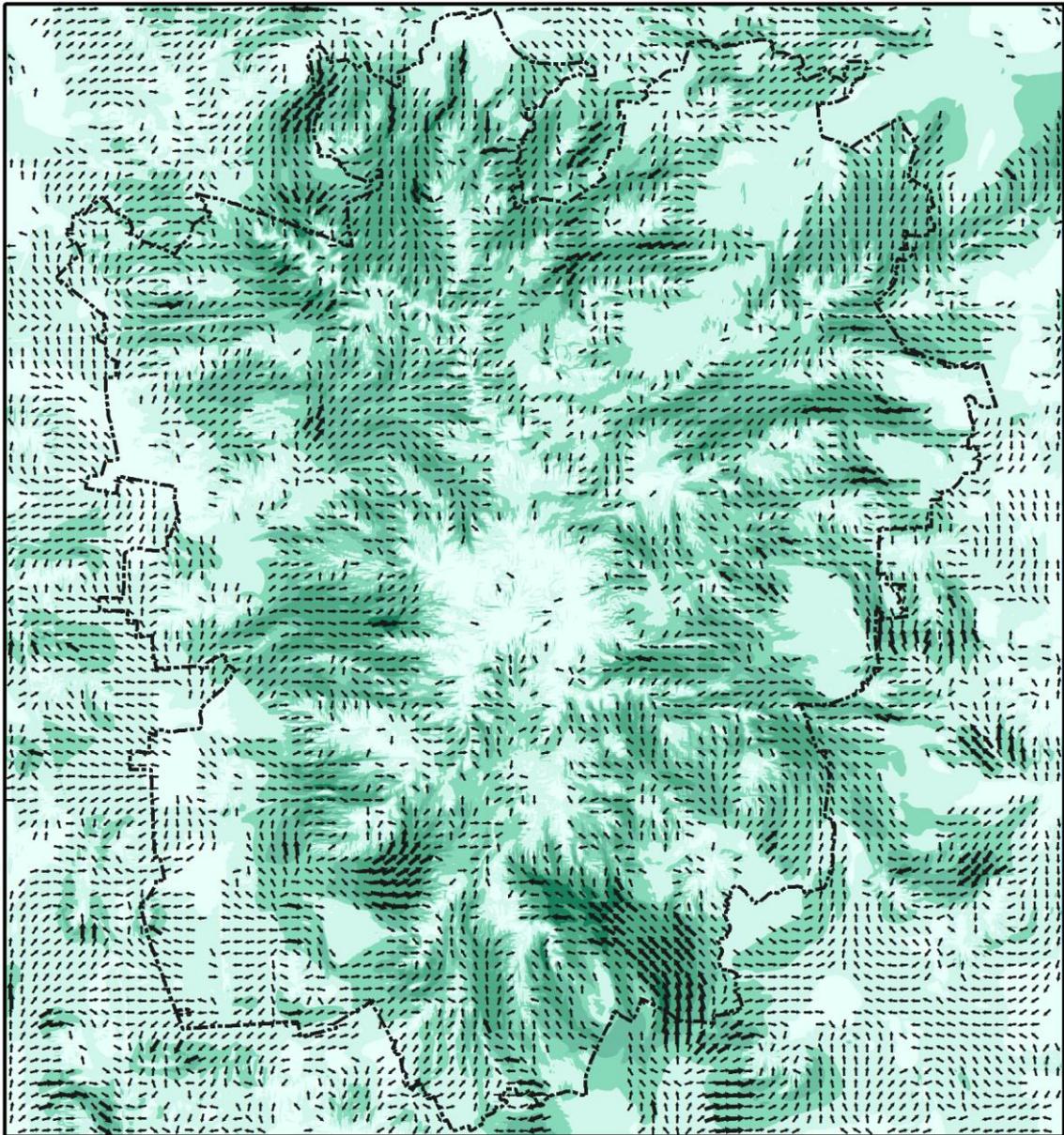


Abb. A 3: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Untersuchungsgebiet

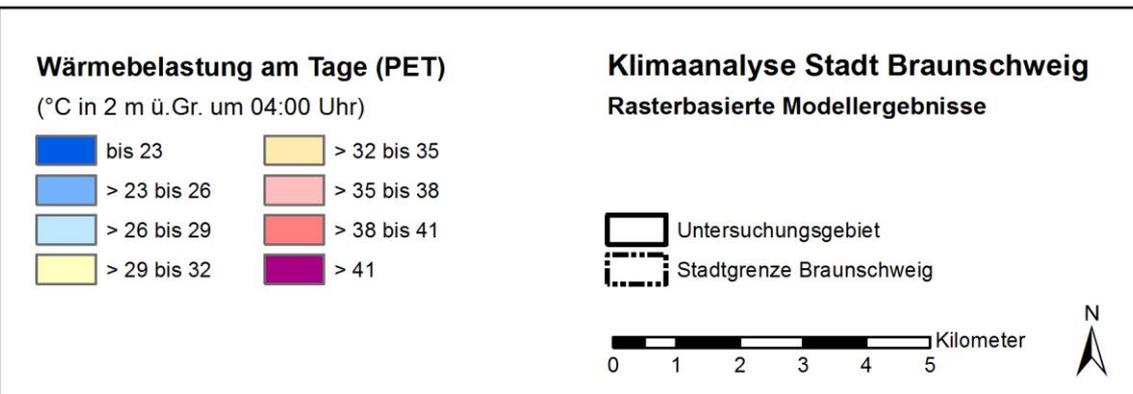
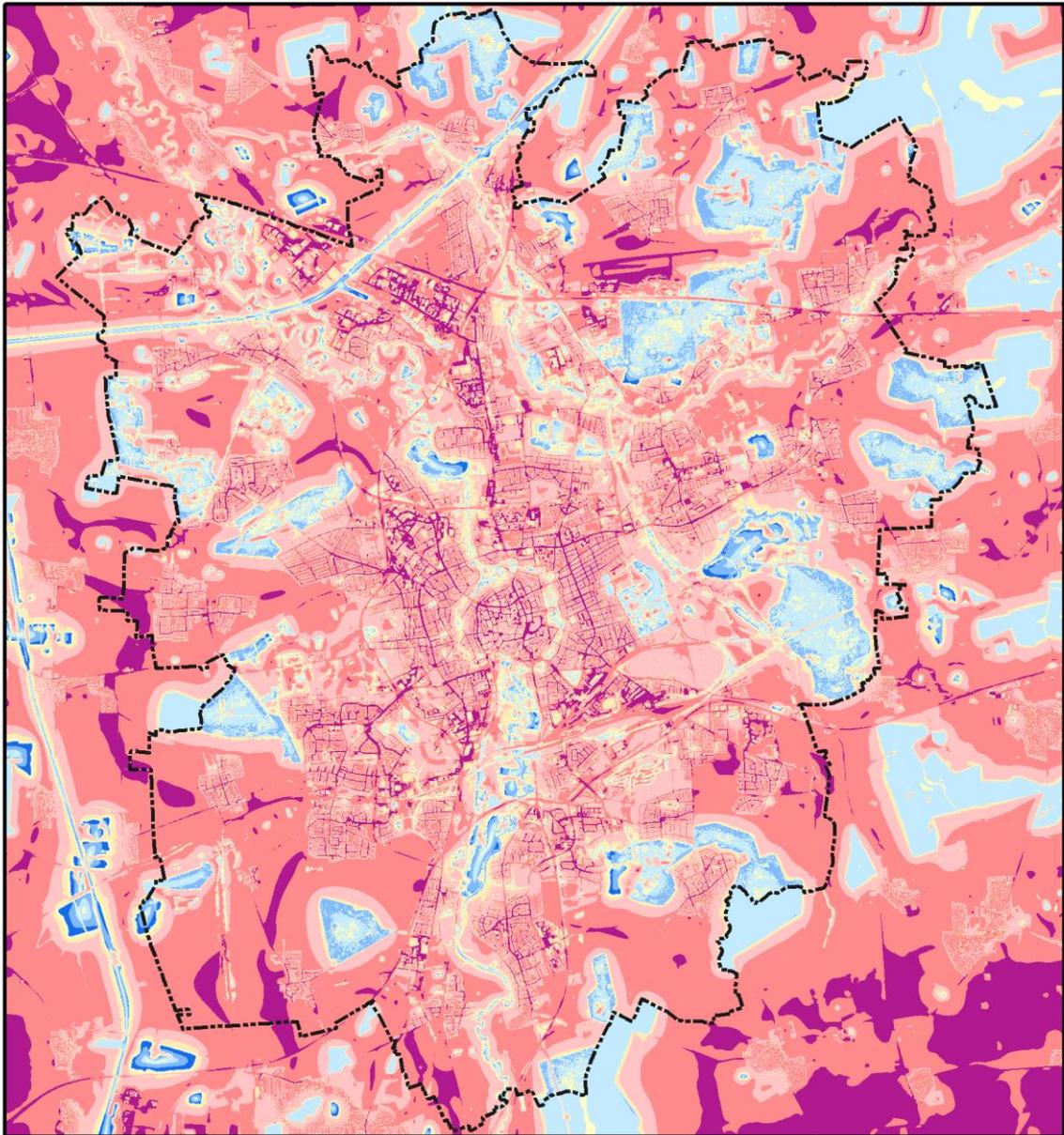
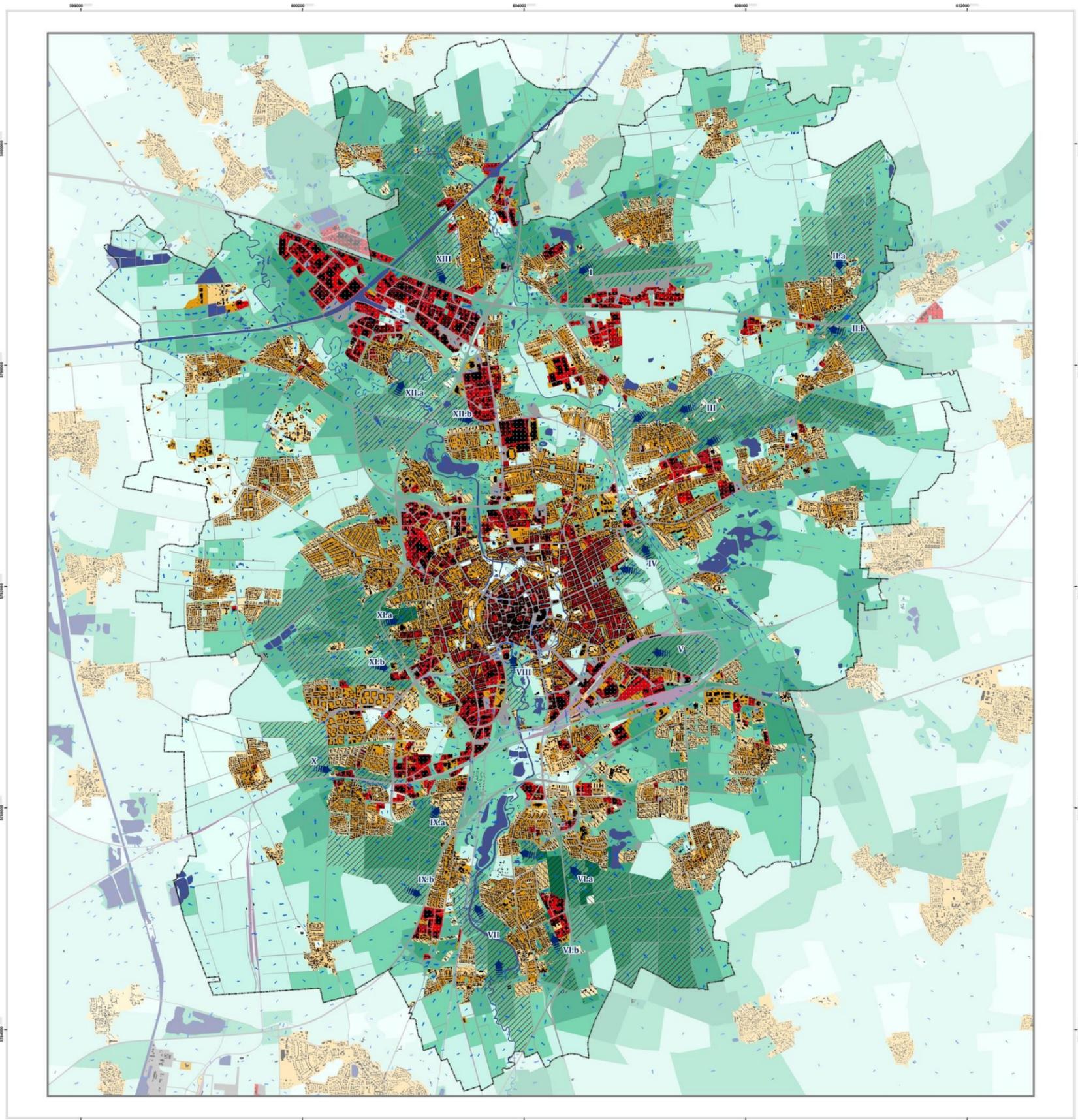


Abb. A 4: Wärmebelastung am Tage im Untersuchungsgebiet (PET = Physiologisch Äquivalente Temperatur)

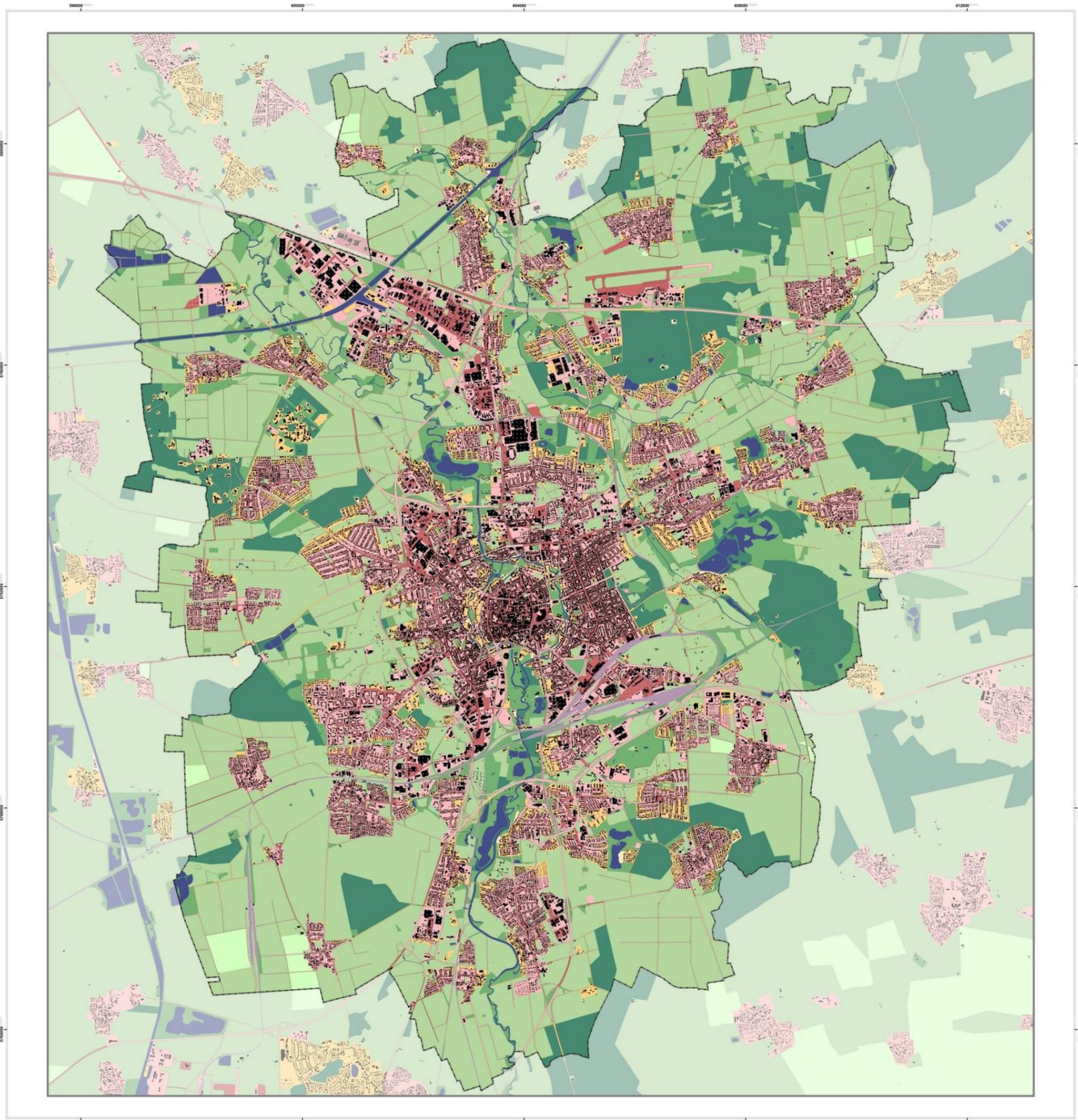


Stadtklimaanalyse Braunschweig: Klimaanalysekarte Nachtsituation

Grün- und Freiflächen	Siedlungsräume	Sonstiges	Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)
Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen^{1,2} Kaltluftvolumenstrom pro Rasterzelle um 04:00 Uhr [m³/s]	Wärmeineffekt im Siedlungsgebiet³ Temperaturabweichung zu Freiflächen um 04:00 Uhr [K]	— Stadtgebiet Braunschweig ■ Gebäude im Stadtgebiet ■ Gleisfläche ■ Straßen-/Parkplatzfläche ■ Gewässer ■ Gewerbefläche	0 1 2 3 Kilometer N Koordinatensystem: UTM (ETRS89)
bis 50 > 50 bis 100 > 100 bis 150 > 150 bis 200 > 200 bis 300 > 300	bis 2 > 2 bis 3 > 3 bis 4 > 4 bis 5 > 5 bis 6 > 6		Auftraggeber: Stadt Braunschweig Stadt Braunschweig FB Stadtplanung und Umweltschutz Abteilung Umweltschutz Richard-Wagner-Straße 1 38106 Braunschweig Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH GEO-NET Große Pfahstraße 5 a 30161 Hannover Tel. (0511) 388 72 00 Email: info@geo-net.de Internet: www.geo-net.de Hannover, September 2017
Modelliertes Kaltluftströmungsfeld² Kaltluftbahn (Benennung: I, II, ..., XIII) Kaltluftentstehungsgebiet Hauptströmungsrichtung der Flurwinde ⁴ Windgeschwindigkeit bis 0,3 / > 0,3 bis 0,5 / > 0,5 m/s	Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung ⁶		

1. Die Analyse der klimakologischen Funktionen bezieht sich auf die Nachtsituation während einer austauschenden sommerlichen Hochdruckwetterlage, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist. Dabei tritt häufig eine überdurchschnittlich hohe Wärmebelastung in den Siedlungsräumen auf, die zugleich mit lufthygienischen Belastungen einher gehen kann. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.
 2. Der Kaltluftvolumenstrom charakterisiert den Zustrom von Kaltluft und wird vor allem durch den Temperaturunterschied zwischen kühlen Grünflächen und erwärmten Siedlungsarealen "angetrieben". Dabei bestimmt die Größe einer Kaltluft produzierenden Fläche auch die Menge des insgesamt zur Verfügung stehenden Kaltluftvolumens. Darüber hinaus wird die Bildung von Kaltluft durch weitere Eigenschaften wie Bewuchs, Bodenfeuchte und Geländeneigung beeinflusst.
 3. Auf Grundlage der Kaltluftmodellierung ausgewiesene Leitbahnstrukturen und deren speisenden Kaltluftentstehungsgebiete.
 4. Flurwinde über Grün- und Freiflächen ab 1 ha Flächengröße sowie über Straßen-, Gleis- und Gewässerflächen mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens 0,1 m/s.
 5. Der nächtliche Wärmeineffekt beruht auf dem Temperaturunterschied zwischen Siedlungs- und Gewerbeflächen zu unversiegelten Freiflächen im Umland. Unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen weisen diese eine mittlere Lufttemperatur von 14,4 °C auf (in 2 m über Grund). Dargestellt ist die Abweichung der Lufttemperatur in Siedlungsräumen von diesem Bezugswert. Nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 kann näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden, sodass die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe für die Bewertung der Nachtsituation darstellt.
 6. Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 105 m³/s durchflossen werden (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

Abb. A 5: Klimaanalysekarte Nachtsituation



Stadtklimaanalyse Braunschweig: Klimaanalysekarte Tagsituation

Siedlungsräume und Straßen, Wege, Plätze

Bioklimatische Situation¹
Basierend auf der PET um 14:00 Uhr

Light yellow	bis 32 °C	Mäßige Wärmebelastung
Yellow	> 32 bis 35 °C	
Orange	> 35 bis 38 °C	Starke Wärmebelastung
Red-orange	> 38 bis 41 °C	
Red	> 41 °C	Extreme Wärmebelastung

Grün- und Freiflächen

Bioklimatische Situation¹
Basierend auf der PET um 14:00 Uhr

Dark green	bis 29 °C	Schwache Wärmebelastung
Medium green	> 29 bis 35 °C	Mäßige Wärmebelastung
Light green	> 35 bis 41 °C	Starke Wärmebelastung
Very light green	> 41 °C	Extreme Wärmebelastung

Sonstiges

Black outline	Stadtgebiet Braunschweig
Black fill	Gebäude im Stadtgebiet
Grey fill	Gleisfläche
Blue fill	Gewässer
Blue dotted fill	Gewerbefläche

Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)

Koordinatensystem: UTM (ETRS89)



Auftraggeber: Stadt Braunschweig



Stadt Braunschweig
FB Stadtplanung und Umweltschutz
Abteilung Umweltschutz
Richard-Wagner-Straße 1
38106 Braunschweig

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH

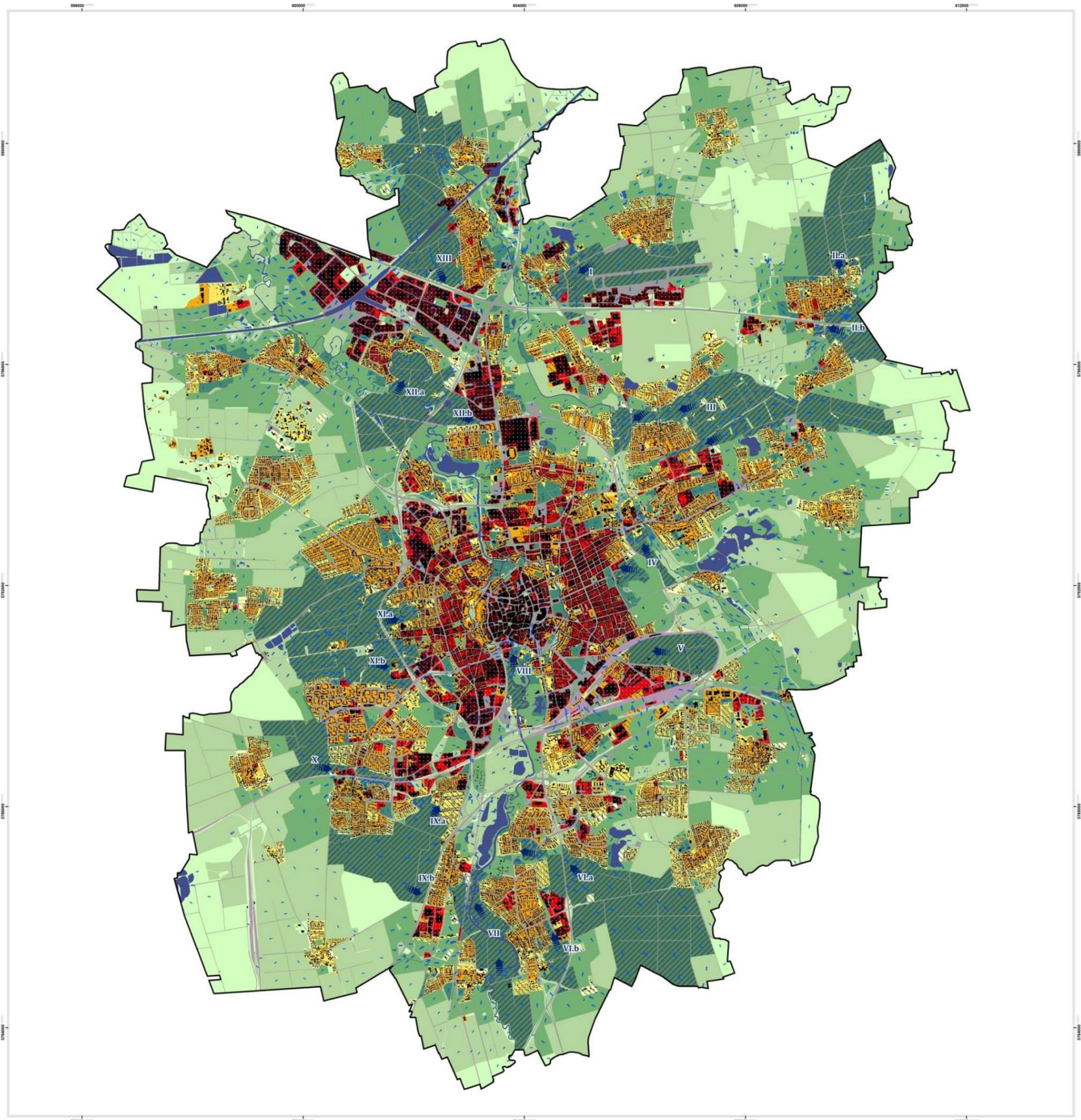


Große Pfahstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

Hannover, September 2017

1. Die Analyse der bioklimatischen Situation bezieht sich auf die Tagsituation während einer austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlage, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist. Die Zuordnung zu einer thermophysiologicalen Belastungsstufe erfolgt gemäß VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9.

Abb. A 6: Klimaanalysekarte Tagsituation



Stadtklimaanalyse Braunschweig: Planungshinweiskarte Nachtsituation

Grün- und Freiflächen - Ausgleichsräume

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

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
- Hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
- Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- Geringe bioklimatische Bedeutung**
Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.

Siedlungs- und Gewerbeflächen - Wirkungsräume

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen.

- Sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- Günstige bioklimatische Situation**
Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Luftaustausch (modelliertes Kaltluftströmungsfeld)

- Kaltluftleitbahn (Benennung: I, II, ..., XIII)
- Kaltluftvolumenstrom Mittel / Hoch / Sehr hoch
- Kaltluftentstehungsgebiet
- Kaltluftfeinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung

Sonstiges

- Gebäude
- Gleisfläche
- Straßen-/Parkplatzfläche
- Gewässer
- Gewerbefläche

Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)
Koordinatensystem: UTM (ETRS89)

0 1 2 Kilometer

Auftraggeber: Stadt Braunschweig

Stadt Braunschweig
FB Stadtplanung u. Umweltschutz
Richard-Wagner-Straße 1
38106 Braunschweig

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH

GEO-NET
Große Pflastraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

Hannover, Oktober 2017

Abb. A 7: Planungshinweiskarte Nachtsituation



Stadtklimaanalyse Braunschweig: Planungshinweiskarte Tagsituation

Grün- und Freiflächen - Ausgleichsräume

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken.

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.
- Hohe bioklimatische Bedeutung**
Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsfere Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können.
- Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- Geringe bioklimatische Bedeutung**
Freiflächen bzw. siedlungsfere Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).

Sonstiges

- Gebäude
- Gewässer
- Gleisfläche
- Gewerbefläche

Siedlungs- und Gewerbeflächen sowie Straßen, Wege und Plätze - Wirkungsräume

- Sehr geringe bioklimatische Belastung**
Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
- Geringe bioklimatische Belastung**
Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
- Mittlere bioklimatische Belastung**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Hohe bioklimatische Belastung**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entseigerung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr hohe bioklimatische Belastung**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entseigerung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)
Koordinatensystem: UTM (ETRS89)



Auftraggeber: Stadt Braunschweig
Stadt Braunschweig
FB Stadtplanung u. Umweltschutz
Abteilung Umweltschutz
Richard-Wagner-Strasse 1
38106 Braunschweig

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
GEO-NET
Große Pflaßstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

Hannover, Oktober 2017

Abb. A 8: Planungshinweiskarte Tagsituation