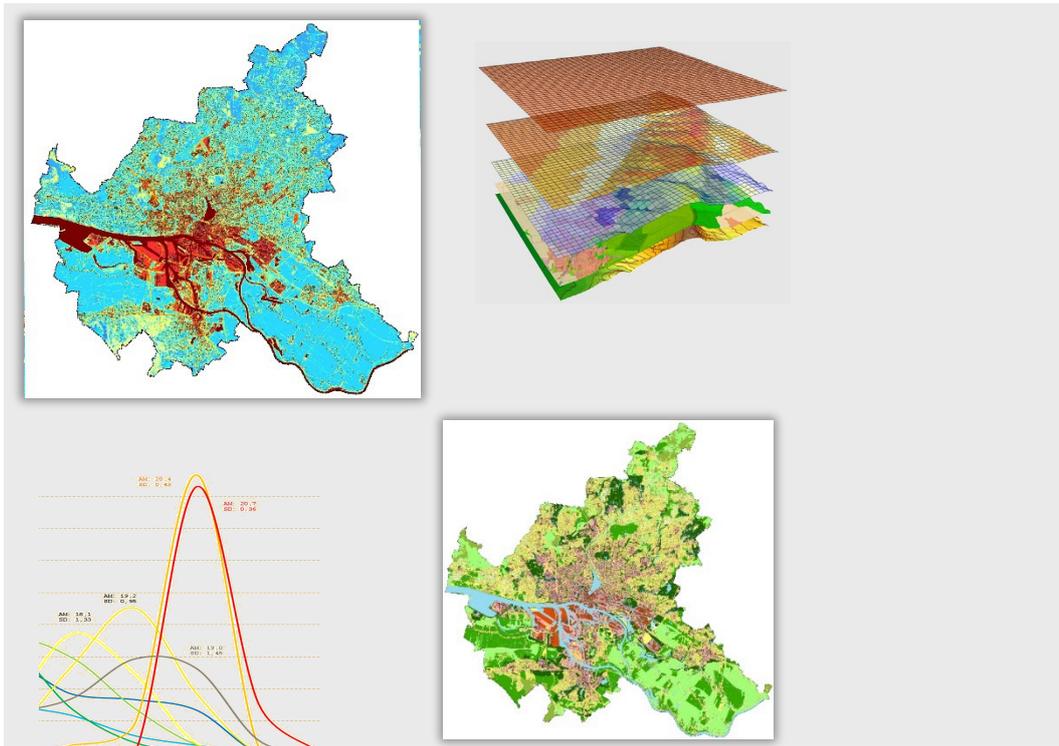


Stadtklimaanalyse Hamburg 2023



Auftraggeber:



Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft
Abteilung für Landschaftsplanung und Stadtgrün
Neuenfelder Straße 19
21109 Hamburg

Auftragnehmer:



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Grosse Pfahlstraße 5a
30161 Hannover





Inhaltsverzeichnis

Seite:

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Glossar.....	IV
Zusammenfassung	VI
1. Aufgabenstellung	1
2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen.....	3
3. Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	7
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	7
3.2 Synoptische Rahmenbedingungen.....	8
3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	11
4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....	13
4.1 Nächtliches Temperaturfeld.....	13
4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur am Tage	15
4.3 Temperaturfeld am Tage.....	17
4.4 Autochthones Windfeld	18
4.5 Kaltluftvolumenstrom	20
5 Klimaanalysekarte	25
6 Bewertungskarten Stadtklima	29
6.1 Vorgehensweise	29
6.1.1 Bewertung der Nachtsituation (Klimawirkung).....	29
6.1.2 Bewertung der Tagsituation (Aufenthaltsqualität)	32
6.2 Ergebnisse	33
6.2.1 Nachtsituation (Klimawirkung).....	33
6.2.2 Tagsituation (Aufenthaltsqualität)	39
6.3 Maßnahmenkatalog Stadtklima	43
7 Literatur	50



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse.....	1
Abb. 2.1: Geländehöhe im Modellgebiet.....	3
Abb. 2.2: Nutzungsstruktur im Bereich Stadtmitte/Außenalster	4
Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen	9
Abb. 3.2: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur um 21 Uhr während austauscharmer Wetterlagen im Sommer	10
Abb. 3.3: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an autochthonen Nächten	10
Abb. 3.4: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation.....	11
Abb. 3.5: Prinzipskizze Durchlüftungsbereiche.....	12
Abb. 4.1: Bodennahe Lufttemperatur zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)	14
Abb. 4.2: PET im Bereich St. Georg zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund).....	16
Abb. 4.3: Lufttemperatur im Bereich Innenstadt/St. Georg zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags	17
Abb. 4.4: Prinzipskizze Flurwind	18
Abb. 4.5: Nächtliches Windfeld im Bereich Pflanzen un Blumen/Dammtorpark zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens	20
Abb. 4.6: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom	21
Abb. 4.7: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern.....	22
Abb. 4.8: Kaltluftvolumenstrom im Bereich Altona zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens.....	24
Abb. 5.1: Klimaanalysekarte im Bereich Altona.....	27
Abb. 6.1: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen in der Nacht	32
Abb. 6.2: Bewertungskarte Nachtsituation für den Bereich Altona	35
Abb. 6.3: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen (Nachtsituation).....	38
Abb. 6.4: Bewertungskarte Tagsituation für den Bereich Mundsburg	41
Abb. 6.5: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen (Tagsituation).....	42
Abb. 6.6: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen	49



Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung	4
Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)	16
Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms.....	22
Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts im Siedlungsraum	30
Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden.....	33
Tab. 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Hinweise.....	36
Tab. 6.4: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Hinweise.....	37
Tab. 6.5: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Hinweise.....	39
Tab. 6.6: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Hinweise.....	40
Tab. 6.7: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen	46

Kartenverzeichnis

- Karte 1: Lufttemperatur um 4 Uhr
- Karte 2: Bodennahes Windfeld um 4 Uhr
- Karte 3: Kaltluftvolumenstrom um 4 Uhr
- Karte 4: Lufttemperatur um 14 Uhr
- Karte 5: Physiologisch Äquivalente Temperatur um 14 Uhr
- Karte 6: Klimaanalysekarte
- Karte 7: Bewertungskarte Nacht
- Karte 8: Bewertungskarte Tag



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: Grüngestaltete, 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 und lufthygienischen 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).

Grün- und Freiflächen: 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 Wälder.

Öffentliche Grünfläche: Im Gegensatz zu privaten Grünflächen sind öffentliche Grünflächen wie Park- und Friedhofsanlagen im Allgemeinen für die Bevölkerung zugänglich und können insbesondere bei hoher Wärmebelastung am Tage je nach Verschattungssituation als Entlastungsräume mit hoher Aufenthaltsqualität aufgesucht werden.

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.



Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb des bebauten Siedlungsraumes (Siedlungsflächen innerhalb des Stadtgebietes, die von einem klimatisch wirksamen → *Kaltluftvolumenstrom* $> 5 \text{ m}^3/\text{Sekunde}/\text{m}$ durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

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

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

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts einer 25 m Rasterzelle (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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.

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.

Bewertungskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung im Siedlungsraum (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Hinweisen.

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 → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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



Zusammenfassung

Im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet von Hamburg erstellt. Ziel war es, meteorologische Basisdaten in einer hohen räumlichen Auflösung zu simulieren (10 m x 10 m Raster) und die stadtklimatischen Zusammenhänge und Prozesse herauszuarbeiten – insbesondere die Kaltluftentstehungsgebiete einschließlich des Kaltluftvolumenstroms in Grün- und Freiflächen sowie die Flächen mit einem Wärmeinseleffekt. Zudem wird auch die Aufenthaltsqualität an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung bewertet. Zentraler Baustein dieses Verfahrens war das Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources). Diese Herangehensweise beinhaltet folgende wichtige Vorteile:

- Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Gesamttraum wird gewährleistet
- Neben den qualitativen Aussagen zur Ausprägung einzelner stadtklimatischer Phänomene werden auch quantitative Aussagen zu klimaökologischen Zuständen und zu Austauschprozessen möglich
- Klimaökologische Ausgleichs- und Prozessräume werden im Stadtgebiet verortet und in ihrer (möglichst exakten) räumlichen Ausprägung dargestellt
- Ein wichtiger Aspekt des klimaökologischen Ausgleichspotenziales von Freiflächen - der Kaltlufthaushalt - kann nur auf diese Weise flächendeckend untersucht werden.

Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Stadtgebiet vor. Die Nachtsituation ist dahingehend von Relevanz, da nur dann eine im Vergleich zu Siedlungsflächen intensivere Abkühlung auf Freiflächen mit Vegetation erfolgt. Dabei entstehen je nach Größe unterschiedliche Mengen an Kaltluft, welche als lokale Strömungssysteme Kalt-/Frischlufte für den Siedlungsbereich liefern und dort die Wärmebelastung während sommerlicher Hitzeperioden abmildern können. Dargestellt wird eine windschwache, austauscharme sommerliche Wettersituation für die Monate Juli / August. Diese Wetterlage ist das sogenannte Worst-Case-Szenario, das wegen seiner belastenden Wirkung auf die Gesundheit des Menschen unter besonderer Beachtung von Älteren, Kranken und Kindern zur Beurteilung der bioklimatischen Situation gemäß VDI-RL 3785 Blatt 1 herangezogen wird.

Besondere Bedeutung haben im stadtklimatischen Zusammenhang die windschwachen autochthonen Luftaustauschprozesse. Der Begriff 'autochthon' bezeichnet dabei klimatische Vorgänge, die an Ort und Stelle bzw. von selbst -also ohne Fremdwirkung, z.B. durch großräumige Windströmungen - entstehen (Gegensatz: allochthon). Verglichen mit einer „mittleren“ sommerlichen Wettersituation gehen die austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlagen häufig mit höheren Lufttemperaturen und einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einher („Worst-Case“-Szenario). Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen ohne nennenswerte übergeordnete Windströmung können nächtliche Kalt- und/oder Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Der „Antrieb“ für diesen Luftaustausch ist der Temperaturunterschied zwischen warmen Siedlungsflächen und kühleren Grün- und Freiflächen.



In bebautem Gelände üben die einzelnen Gebäude eine Hinderniswirkung auf nächtliche Kaltluftströmungen aus und verzögern diese. Als Kaltluft produzierende Bereiche werden vegetationsgeprägte Freiflächen identifiziert, wie z.B. Ackerflächen und Parkareale, aber auch Grünflächen wie Kleingärten und Friedhofsanlagen.

Die Kaltluftströmungen tragen direkt zur Frisch-/Kaltluftversorgung der angrenzenden Siedlungsflächen bei. Zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens befinden sich ca. 79 % der Siedlungsfläche im Einwirkungsbereich von Kaltluft. Überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumina entstehen im Zusammenhang mit Kaltluftabflüssen (z.B. Harburger Berge) sowie den großen Grünflächen wie dem Stadtpark und dem Altonaer Volkspark. Weitere Grünflächen mit nennenswertem Kaltluftvolumenstrom und zentraler Lage sind z.B. Planten un Blomen, der Schanzenpark sowie der Friedhof Ohlsdorf. Kleinere Grünareale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den klimatischen Einwirkungsbereich vergrößern. Eine hohe Bedeutung kommt aber auch den kleineren Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zu, sofern sie Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Zudem treten in den Ergebnissen die Landschaftsachsen als Luftaustauschbereiche hervor, welche zudem an Tagen mit starker Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstungskühle auch (kleinräumig) klimatisch günstige Aufenthaltsbereiche darstellen, deren Vernetzung eine größere klimatische Wirkung tags und nachts in verdichteten und als Siedlungsräumen mit Wärmeinseleffekt identifizierten Flächen zur Folge haben kann.

Teile der überbauten Flächen wie beispielsweise die Innenstadt weisen während austauscharmer sommerlicher Hochdruckwetterlagen einen Mangel an Durchlüftung auf und werden nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die hohe Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Eine starke Wärmebelastung am Tage ist über den stark versiegelten Straßen und Plätzen, Gleisanlagen sowie Gewerbeflächen anzutreffen. Im Hinblick auf weitere Nutzungsintensivierungen in Hamburg sollten die Funktionen der klima- und immissionsökologisch wichtigen Strukturen möglichst wenig beeinträchtigt werden. Die aus den meteorologischen Parametern zur Tag- und Nachtsituation abgeleiteten Bewertungskarten sollen dafür als Abwägungsgrundlage dienen.



1. Aufgabenstellung

Das Schutzgut Klima ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und Bestandteil der Abwägung bei der Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieser Schutzgüter. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas sowie der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft ableiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Im Auftrag der Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft der Freien und Hansestadt Hamburg wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das gesamte Stadtgebiet durchgeführt. Ziel ist die Aktualisierung der zuletzt im Jahr 2017 durchgeführten Klimaanalyse. Im Vordergrund stehen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen (auch autochthone Wetterlagen genannt), die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergehen. Technisch ermöglichen nur solche Wetterlagen eine Analyse der lokalklimatischen Situation, da übergeordnete Wetterphänomene aufgrund von großräumigen Luftdruckdifferenzen die zu analysierenden lokalen Phänomene nicht überlagern. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1.1).

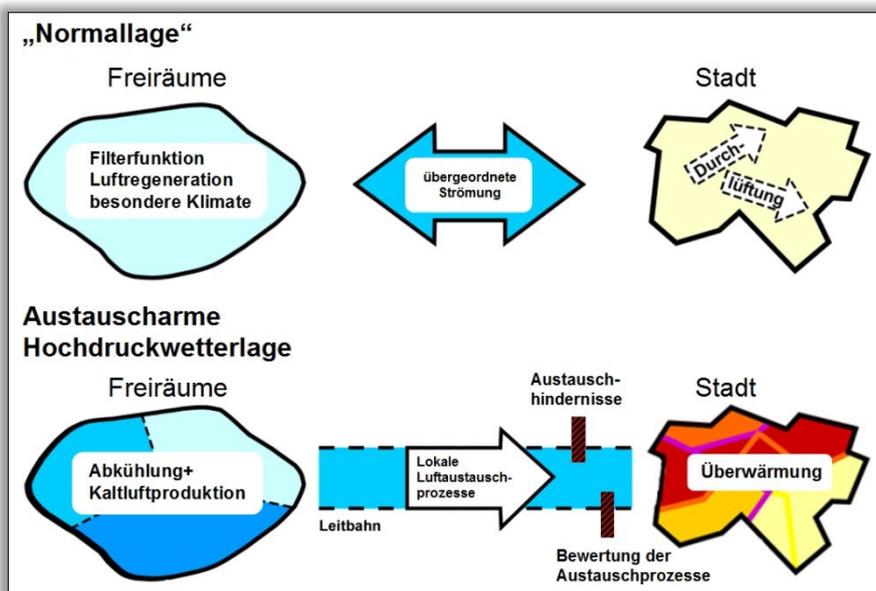


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse

Zwischen klimatisch wirksamen Grün-/Freiflächen einerseits und städtisch verdichteten Bereichen andererseits sowie verbindender Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Stadtgebiet. Wesentliches Ziel der Analyse ist, mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) und den



aus der Klimaanalyse gewonnenen Ergebnissen umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation in Hamburg durchzuführen.

Weiterhin besteht das Ziel, klimaökologisch wichtige und bioklimatisch belastete Raumstrukturen herauszuarbeiten und darzustellen. Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Stadtgebiet vor. Diese erlauben eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht (Klimaanalysekarte). Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider. Darüber hinaus werden, getrennt für die Nacht- und Tagsituation, eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und allgemeine Hinweise abgeleitet. Der vorliegende Bericht stellt die Stadtklimaanalyse dar und geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie die Analyse- und Bewertungskarten ein.

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse dienen als Grundlage zur Einschätzung und Bewertung klimatischer Bedingungen. Sie wurden mit einem 10 m x 10 m Rechenraster bereits recht feinkörnig im Maßstab 1 : 50 000 gerechnet und liefern im größeren Zusammenhang detaillierte Aussagen. Die Arbeit liefert Basisinformationen für alle Planverfahren, die je nach Einzelfall in feinerem Maßstab und orientiert an der jeweiligen Planung vertieft werden können, um Flächennutzungen und Gebäudeentwicklung vor dem Hintergrund der dargestellten Ergebnisse zu optimieren. Dies betrifft bspw. Veränderungen der Tag- und Nachttemperatur durch Verdichtung, das Fördern von Kaltluftentstehung und Bewegung und die ausreichende Versorgung mit Grünstrukturen zur Unterstützung klimatologischer Stresssituationen.



2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei einer Gesamtgröße des Untersuchungsraums von ca. 1.700 km² geht die Abgrenzung des Simulationsraumes deutlich über das Stadtgebiet hinaus und zielt darauf ab, auch außerhalb des Stadtgebietes vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 10 m. Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell mit einer Auflösung von 1 m zurückgegriffen werden (DGM1), welches das gesamte Stadtgebiet abdeckt (Abb. 2.1).

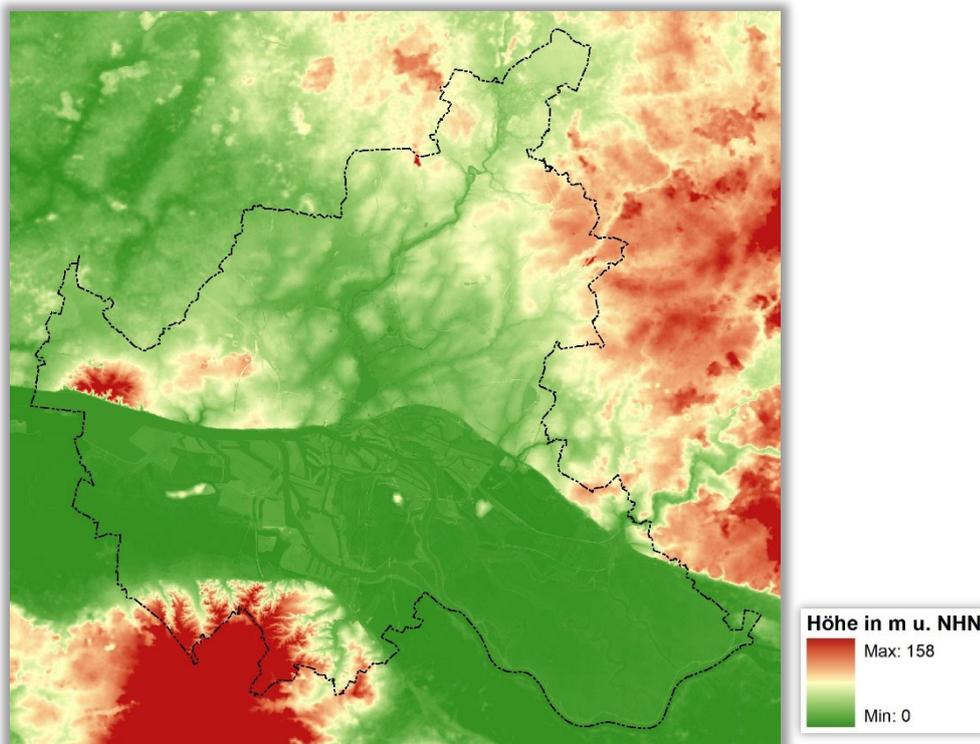


Abb. 2.1: Geländehöhe im Modellgebiet

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung der Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein 9-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- Nutzungsstruktur (Art der Landnutzung, Bodenbedeckung)
- Strukturhöhe (Gebäude- und Vegetationshöhen)
- Versiegelungsgrad.

Da das Untersuchungsgebiet in einer 10 m Auflösung (also mikroskalig) simuliert wurde, sind Gebäude sowohl in Bezug auf ihren Grundriss als auch ihrer Höhe erfasst, sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insbesondere das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Weiterhin wurden aktuelle Datensätze für die Geländehöhe (DGM) sowie ein Oberflächenmodell (DOM) für die Ableitung der Gebäudehöhen und der Vegetation mit Lage und Strukturhöhen von Grünbeständen verwendet.



Die räumliche Auflösung von 10 m ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne (insbesondere kleinkronige) Bäume auf dieser Maßstabsebene noch nicht separat ausgewiesen werden. Die verwendeten Nutzungskategorien zeigt Tab. 2.1.

Beschreibung	Versiegelungsgrad (%)	Strukturhöhe (m)
Gebäude	100	individuell
unbebaut versiegelt (Straßen)	95	0
Gewässer	0	0
Gleis	25	0,5
Rasen mit Vegetation < 2,5m	5	individuell
Rasen mit Vegetation > 2,5m	5	individuell
Versiegelt mit Vegetation > 2,5m	90	individuell
Naturferne Böden mit Vegetation < 2,5m	25	individuell
Naturferne Böden mit Vegetation > 2,5m	25	individuell

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Für die Klimamodellierung ist weniger die Nutzungsart relevant als vielmehr die Siedlungstypologie mit ihren jeweiligen Eigenschaften. Da Modellsimulationen rasterhafte Repräsentationen von Eingangsvariablen verwenden, sind für die Bereitstellung der Modelleingangsdaten die Flächeninformationen auf Rasterzellen jeweils einheitlicher Nutzung übertragen worden. Die Nutzungsstruktur zeigt exemplarisch Abbildung 2.2.

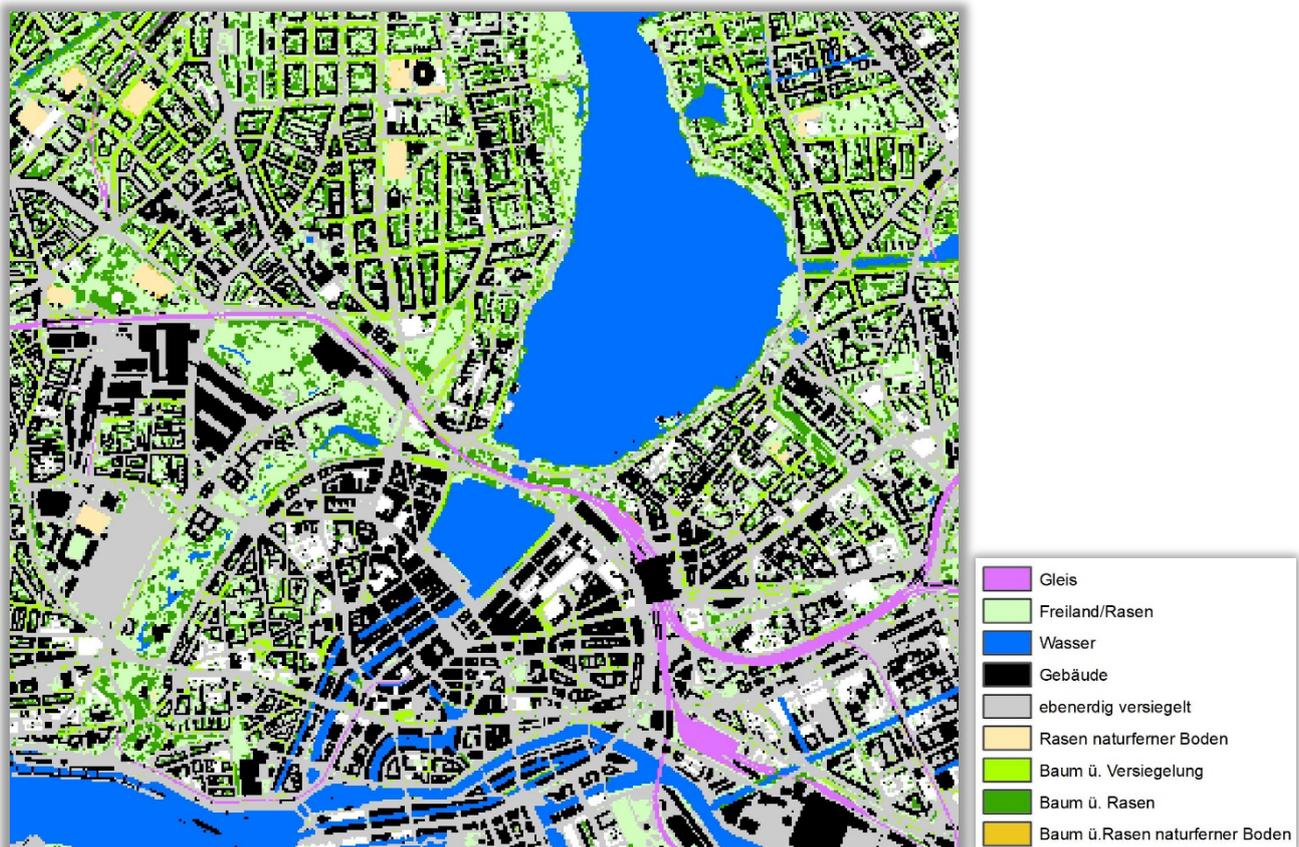


Abb. 2.2: Nutzungsstruktur im Bereich Stadtmittle/Außenalster



In die Flächenkulisse wurden zudem noch die folgenden Bebauungspläne sowie Planungen und Entwürfe im Verfahren eingearbeitet (Stand 20. Dezember 2022):

- Bergedorf 100
- Kirchwerder 33
- Kirchwerder 34
- Bergedorf 112
- Achse Wilhelmsburg
- Canyon Rissen
- Deckel A 7 (Nord, Mitte, Süd)
- Bahrenfeld 71
- Rahmenplan Diebsteich
- Diekmoor
- Fischbeker Reethen
- Grasbrook
- Mümmelmannsberg - Erweiterung östlicher Siedlungsrand
- Neue Mitte Altona
- Oberbillwerder
- Öjendorf
- Neuland 23

Allerdings haben manche Projekte nach Redaktionsschluss einen neuen Stand erhalten, der so nicht in der Simulation berücksichtigt wurde. Da sich die Siedlungstypologie mit ihrer jeweiligen Baumasse i.d.R. aber nicht verändert, sondern lediglich die Flächenkulisse der Bebauung, sind die Ergebnisse im Umfeld dieser Areale trotzdem aussagekräftig. Einige Projekte konnten aus redaktionellen Gründen nicht berücksichtigt werden (z.B. Trabrennbahn Bahrenfeld, Innovationspark Bergedorf, Innovationspark Bahrenfeld, Quartierskonzept Bahrenfeld). In diesen Bereichen können die lokalklimatischen Effekte (z.B. Hinderniswirkung auf nächtliche Kaltluftbewegungen) aus einer Überlagerung mit den Ergebnissen des Status Quo abgeschätzt werden. Es wurden auch Gebäude mit Dachbegrünung in die Flächenkulisse eingearbeitet und in ihrer klimatischen Wirkung berücksichtigt. Zusammenfassend sind für die Modellierung die folgenden Eingangsgrößen verwendet worden:

- **Digitales Geländehöhenmodell (DGM1)**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), Stand 2021
- **Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit den Strukturhöhen von Gebäuden und Vegetation**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), Stand 2020
- **Color-Infrarotbilder zur Ableitung von versiegelten und nicht versiegelten Oberflächen**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), Stand 2019
- **Baumkataster**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA), Stand 2022
- **Wassertemperatur der Elbe**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA), Stand 2022
- **Gründachkataster**
Quelle: Hamburger Stadtentwässerung (AöR) und Hamburger Wasserwerke GmbH (Hamburg Wasser), Stand 2022
- **Gebäudemodell LOD1**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), Stand 2022
- **Bebauungspläne (Entwürfe) und Großprojekte**
Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen (BSW), Stand 2022 (modifiziert)



- ALKIS-Nutzung als Grundlage für die Basisgeometrien in den Bewertungskarten

Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV), Stand 2022

Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden.



3. Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst (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 (DFG 1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist sehr 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 kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

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 2, 4, 6, 8, 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).

3.2 Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es in den Nachtstunden nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Häufig gehen die sommerlichen Hitzeperioden mit diesen Wetterlagen einher. Dahingehend wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermaßen festgelegt:

- Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- Bedeckungsgrad 0/8
- Kein überlagernder geostrophischer Wind



Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht und tragen zur Anreicherung von Luftschadstoffen bei. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist hingegen die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde und Kaltluftabflüsse), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. In Abb. 3.1 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.

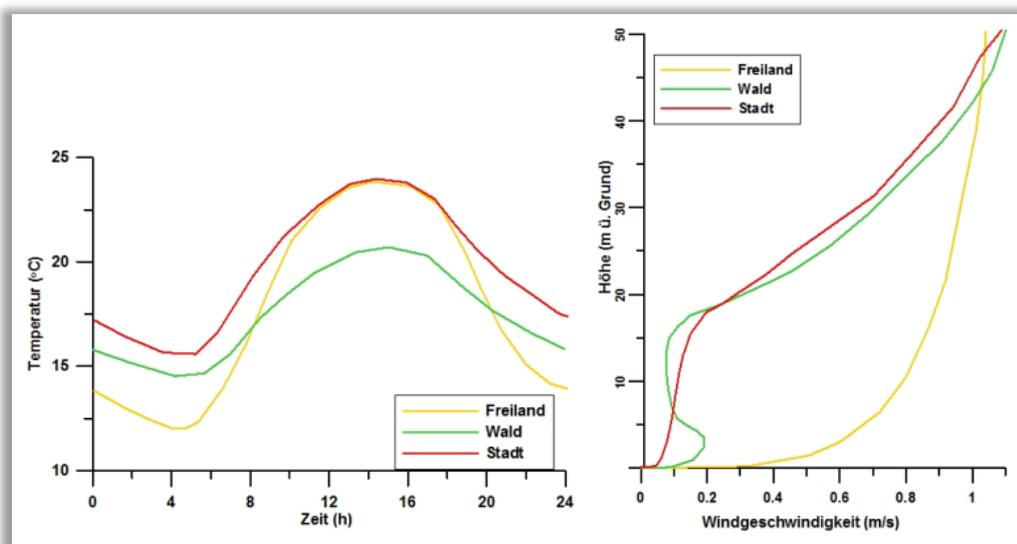


Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Hinsichtlich des Temperaturverlaufs zeigt sich, dass sowohl Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien hingegen deutlich geringer ist. Bei den durch Wiese geprägten Grünflächen trägt der Mangel an Verschattung zum hohen Temperaturniveau bei, während hier nachts die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

Für den Modellantrieb wurden langjährige Messdaten der DWD-Station Hamburg-Fuhlsbüttel ausgewertet. So beträgt die Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur um 21 Uhr während austauscharmer sommerlicher Wetterlagen 17,8 °C in 2 m über Grund (Abb. 3.2). Im langjährigen Mittel liegt in Hamburg über das Jahr betrachtet an 51,6 Tagen eine autochthone Nachtsituation vor (Abb. 3.2). In den Sommermonaten Juni, Juli und August ist das an 18,9 Tagen im Jahr der Fall, was einem Anteil von 20,5 % der Nächte entspricht.

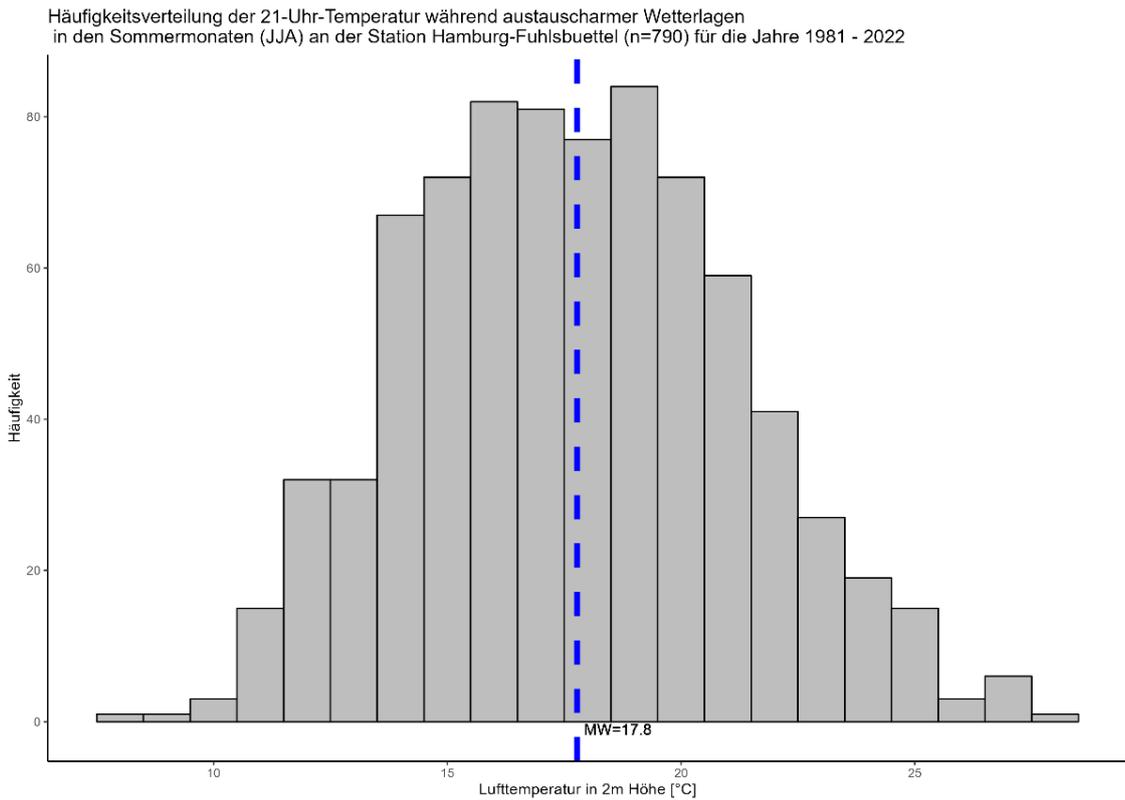


Abb. 3.2: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur um 21 Uhr während austauscharmer Wetterlagen im Sommer

langjährige mittlere monatliche Anzahl an autochthonen Nächten (51.6 pro Jahr)
1981 - 2022, Station: 1975 - Hamburg-Fuhlsbüttel

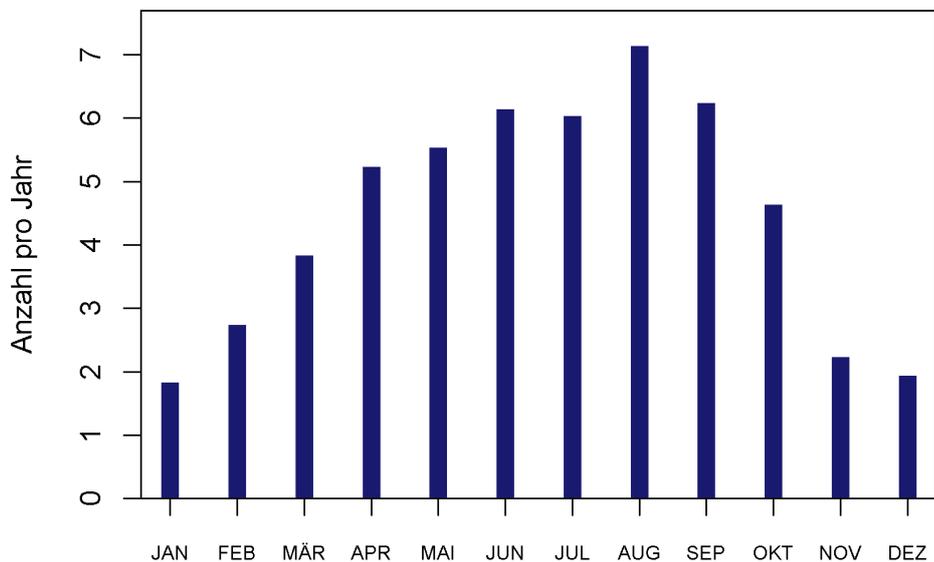


Abb. 3.3: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an autochthonen Nächten



3.3 Abgrenzung der klimaökologischen 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. 3.4).

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 auf Grundlage des ALKIS die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zentraler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche den Mittelwert der für eine Bewertung relevanten Klimaparameter, welcher die flächenspezifische Werteausprägung repräsentiert. So führt beispielsweise die hohe Oberflächenversiegelung einer Gewerbebebauung in den Nachtstunden zu einem höheren Flächenmittelwert der Lufttemperatur als eine stark durchgrünte Wohnbebauung am Ortsrand.

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 in den Bewertungskarten (vgl. Kap. 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.

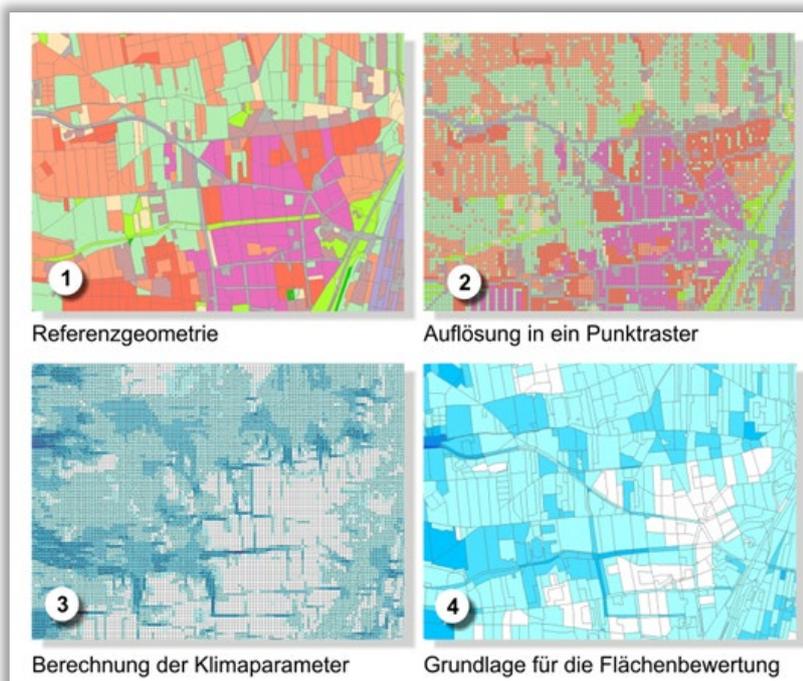


Abb. 3.4: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



BEREICHE MIT BESONDERER FUNKTION FÜR DEN LUFTAUSTAUSCH

Gering überbaute und grüne geprägte Strukturen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 3.5).

Die Ausweisung der Durchlüftungsbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird sowohl in der Klimaanalysekarte als auch der Bewertungskarte dargestellt. 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 und breite Straßenräume. Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Diese sind vor allem im Bereich der Harburger Berge, aber auch an anderen Stellen im Stadtgebiet anzutreffen (z.B. Blankenese, Stadtpark, Friedhof Olsdorf). Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte der Kaltluft, setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung.

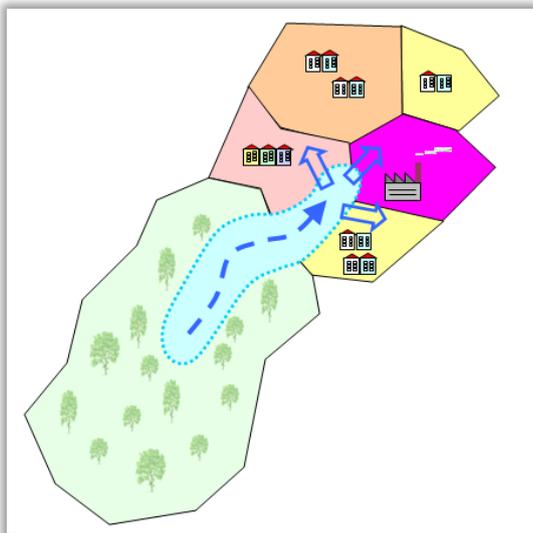


Abb. 3.5: Prinzipskizze Durchlüftungsbereiche

Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus stadtklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Diese werden je nach Reliefsituation im Stadtgebiet gesondert ausgewiesen.

In den sich anschließenden Kapiteln 4 und 5 werden die Ergebnisse der Klimaanalyse dargestellt, wobei die im Kapitel 4 beschriebenen meteorologischen Parameter als rasterbasierten Ergebnisse in einer räumlichen Auflösung von 10 m x 10 m vorliegen. Diese Parameter werden in den Bewertungskarten auf die Bezugsgeometrien übertragen (Kap. 6). Hier erfolgt die Bewertung der Ausprägung wie z.B. die nächtliche Überwärmung der Siedlungsflächen.



4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern nächtliche Lufttemperatur bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur am Tage, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Bei den für die Lufttemperatur und die PET (Physiologisch äquivalente Temperatur) dargestellten Ergebnisse handelt es sich um die Raster aus der Modellsimulation. Da auch die Gebäude rasterbasiert in die Klimasimulation eingegangen sind, diese aber keinen Außenraum repräsentieren, können im Umfeld von Gebäuden weiße Bereiche ohne Wert auftreten.

4.1 Lufttemperatur in der Nacht

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. 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. In den Verkehrsflächen wird die Lufttemperatur durch die Breite des Straßenraums und den Anteil an Grünelementen wie Straßenbäume oder Straßenbegleitgrün geprägt. Doch auch über **grünbestimmten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insbesondere 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 Gewässern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte



tägliche 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. Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 13,5 °C und Maximalwerten von bis zu 22,2 °C eine Spannweite von etwa 8,7 °C. Die mittlere Temperatur innerhalb des Stadtgebietes liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,9 °C. Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Zentrumsbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen die Kernstadt von Hamburg, die Stadtteilzentren sowie die Hafenanlagen und größere Gewerbeflächen die höchsten Temperaturen von mehr als 19,5°C auf (orange/rot), was mit dem hohen Bauvolumen und einer hohen Oberflächenversiegelung einher geht (Abb. 4.1). In den Nachtstunden bleibt das Temperaturniveau vor allem in den breiteren Straßenräume erhöht. Hingegen zeigt sich, dass die durchgrünten Blockinnenhöfe der Neustadt auch im kernstädtischen Raum nennenswert abkühlen können. Die Lufttemperaturen können hier zwischen 15 °C und 18 °C (türkis/blau) betragen und somit signifikant unter denen des vorgelagerten Straßenraumes liegen.

Zur Peripherie hin nehmen Bebauungsdichte und auch die Lufttemperatur tendenziell ab, was sich deutlich im Temperaturfeld zeigt. Gross Flottbek weist aufgrund des höheren Grünanteils eine niedrigere nächtliche Überwärmung als Ottensen auf. Aber auch im Bereich von Großsiedlungen wie Steilshoop zeigt sich die positive Wirkung größerer Abstandsflächen auf die nächtliche Abkühlung.

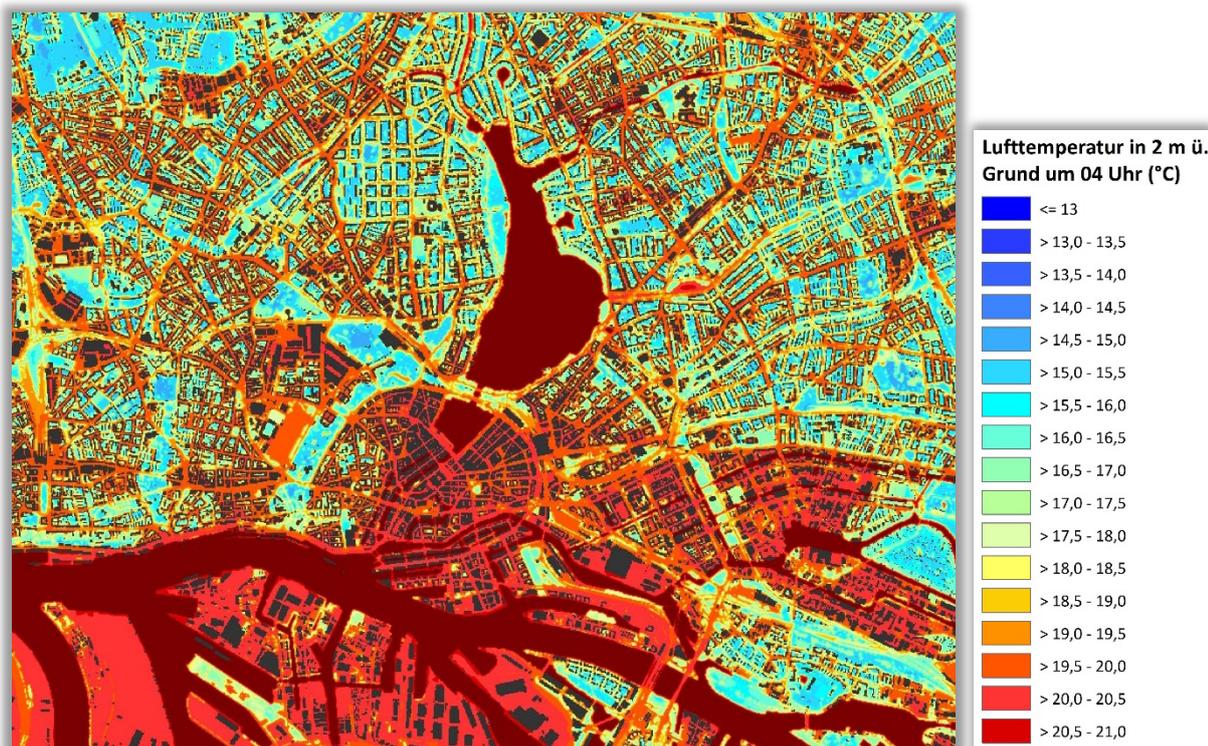


Abb. 4.1: Bodennahe Lufttemperatur zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)



In den stark durchgrüntem Siedlungstypologien wie z.B. in Blankenese sind Werte zwischen 15 °C und 16 °C zu beobachten. Innerhalb größerer Hausgärten gehen die Temperaturen lokal auch weiter zurück. Kleinräumige Kaltluftabflüsse führen zu einer zusätzlichen Abkühlung. Auch die innerstädtischen Grünflächen zeichnen sich, abhängig von ihrer Größe und Lage, mit einem niedrigeren Wertenniveau ab. So weisen Planten und Blumen, der Dammtorpark sowie die Große Wallanlage Temperaturen zwischen 15 °C und 17 °C auf. Generell begünstigt ein hoher Rasenanteil die Abkühlung in den Nachtstunden, wenngleich am Tage durch die intensivere Sonneneinstrahlung die Aufenthaltsqualität geringer ist als in den mit Bäumen bestandenen Grünräumen. Innerhalb der Baumbestände und Waldflächen ist die Lufttemperatur mit etwa 17,0 °C bis 18,5 °C höher, da das Kronendach die Abkühlung der Bodenoberfläche reduziert und zu einem „Bestandsklima“ innerhalb der Waldfläche führt. Die Abkühlung ist im Bereich der Harburger Berge am südöstlichen Stadtrand am stärksten ausgeprägt und führt zu Minimumtemperaturen von weniger als 14,0 °C, da sich die Kaltluft lokal in Senken sammelt.

4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur am Tag

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 abschätzen¹. Beispiele für solche Kenngrößen sind die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) und der UTCI (Universal Thermal Climate Index). In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Höppe 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 Hamburg 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 physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tab. 4.1; VDI 2004).

¹ 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).



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

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)¹

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird. Eine mässige Wärmebelastung mit einer PET von 29°C bis 32°C ist insbesondere unter den größeren Waldbeständen zu beobachten (hellgrün/gelb; Abb. 4.2).

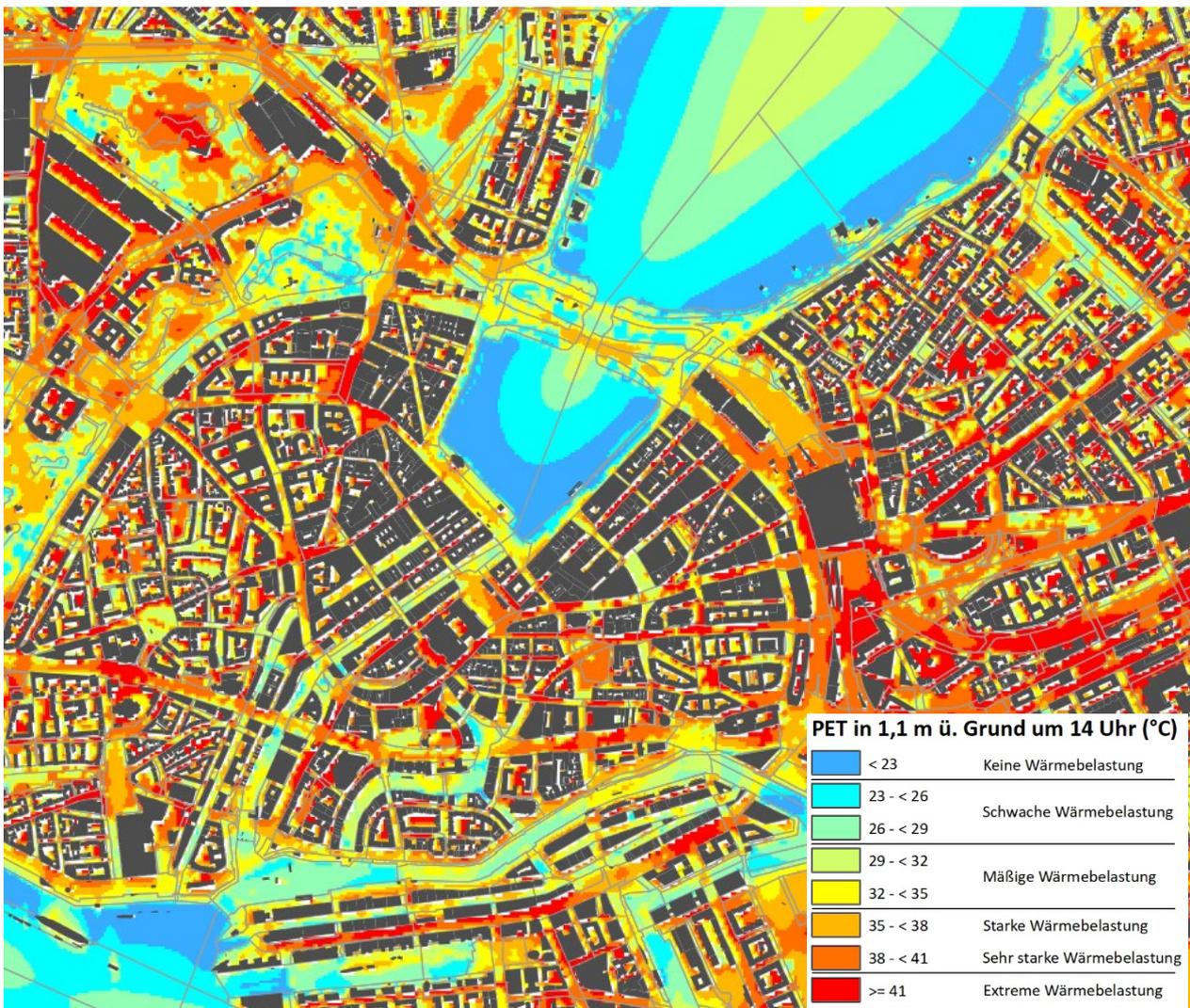


Abb. 4.2: PET im Bereich St. Georg zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags



Aber auch im Bereich größerer Baumgruppen von innerstädtischen Grünflächen wie dem Dammtorpark oder dem Schanzenpark sind günstige Aufenthaltsbedingungen anzutreffen. Dem stehen die stark besonnten Areale gegenüber, wo die Wärmebelastung mit einer PET von deutlich mehr als 35°C häufig als stark einzustufen ist (orange/rot). Die höchste Belastung tritt im Bereich großer versiegelter Plätze sowie Straßenräumen auf.

4.3 Lufttemperatur am Tag

Die Lufttemperatur am Tage ist im Wesentlichen durch die großräumige Temperatur der Luftmasse in einer Region geprägt und wird weniger stark durch Verschattung beeinflusst, wie es bei der PET der Fall ist. Daher weist die für die Tagsituation modellierte Lufttemperatur eine homogenere Ausprägung auf. Wie Abb. 4.3 zeigt, steigt die Lufttemperatur mit zunehmender baulicher Dichte an und ist in der Innenstadt, den Stadtteilzentren und auch Gewerbeflächen mit mehr als 30 °C am höchsten ausgeprägt.

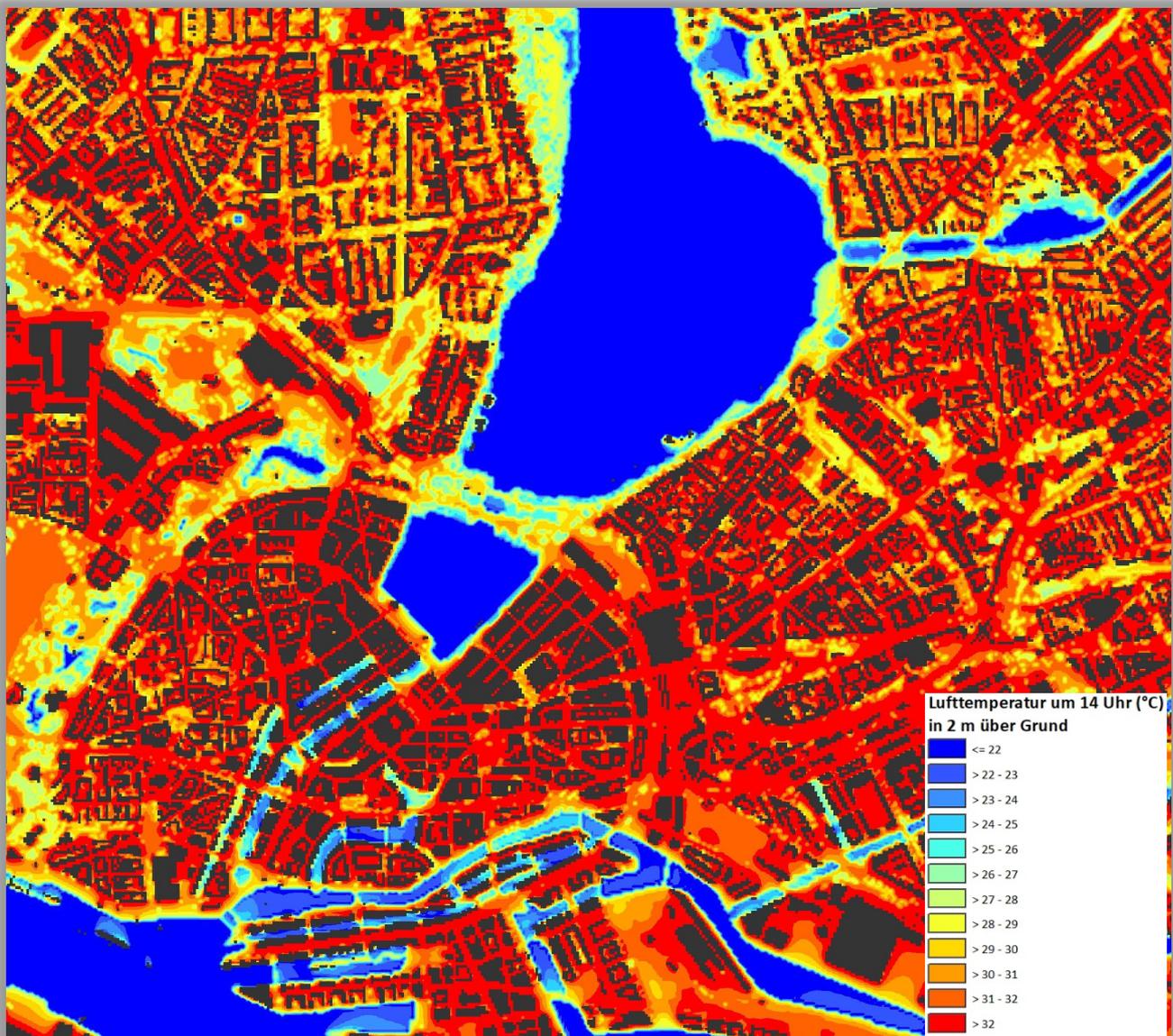


Abb. 4.3: Lufttemperatur im Bereich Innenstadt/St. Georg zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags



In Richtung auf die Gewässerflächen nehmen die Werte allmählich ab, aber auch die mit Bäumen bestandenen innerstädtischen Grünflächen treten vergleichsweise als kühlere Bereich mit Werten von 26 °C bis 28 °C hervor.

4.4 Autochthones Windfeld

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen.

An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. Mosimann et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt.

Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 4.4).

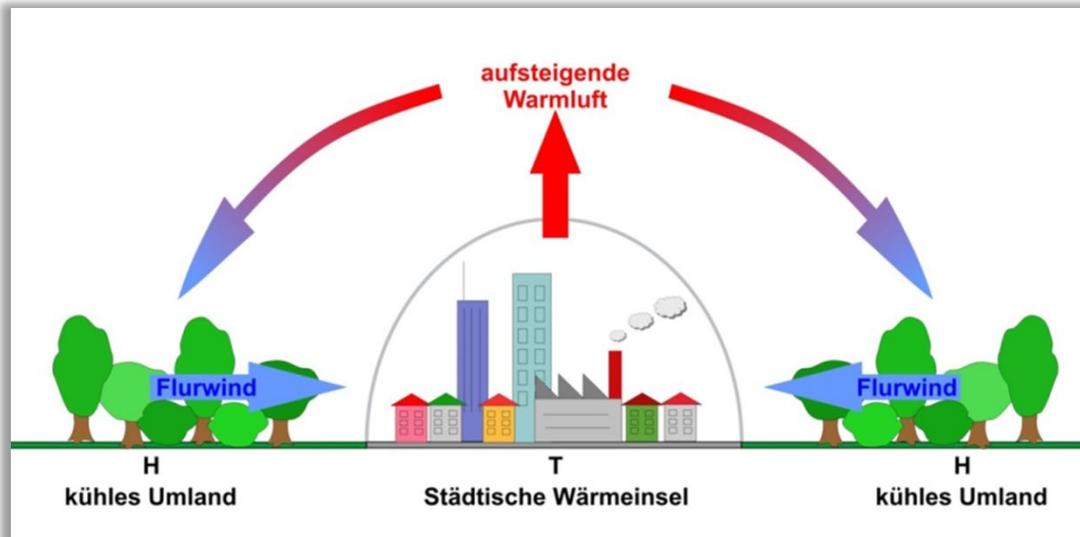


Abb. 4.4: Prinzipskizze Flurwind

Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. Kiese et al. 1992). Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bebauung abgebremst wird. Die Flur-/ Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist unterhalb von 0,5 m/s (Mosimann et al. 1999). Im Bereich stärkerer Hangneigungen wie den Harburger Bergen treten im Untersuchungsraum Kaltluftabflüsse mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s auf.



Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden. Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den großen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen. 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 der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen und für Städte in Muldenlage wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

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 ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld stellt Abb. 4.5 in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine die originäre 10 m x 10 m Auflösung haben. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen 10 m Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von $> 0,1$ m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die in Abb. 4.5 für das 2 m-Niveau im Bereich Pflanzen und Blumen/Dammtorpark beispielhaft wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von 0,6 m/s. Von den innerstädtischen Grünflächen Schanzenpark (A), Pflanzen und Blumen/ Dammtorpark (B) sowie der Großen Wallanlage (C) gehen in den Nachstunden umfangreiche Flurwindsysteme aus. Die Kaltluft wirkt über unbebaute Strukturen in die Bebauung ein, wobei breite Straßenräume und Abstandsflächen ein Eindringen in die Siedlungsflächen begünstigen. Dies zeigt sich bspw. am Valentinskamp/Dammtorstraße (D) sowie im Bereich Schäferkampsallee/Weidenkampsallee (E). Aufgrund der vergleichsweise hohen Wassertemperatur der Binnen- und Außenalster erfolgt – ausgelöst durch den horizontalen Temperaturgradienten - ein Einströmen der Kaltluft in Richtung Wasserfläche (F). Zudem können auch innerhalb durchgrünter Siedlungsstrukturen Flurwinde entstehen, welche aber dann eher geringere Quantität aufweisen.



Innerhalb dichter Baumbestände und Waldflächen bremst die Hinderniswirkung des Stammraums den bodennahen Kaltluftstrom ab. Dieser wird erst am Bestandsrand zur Bebauung hin durch den vorhandenen Temperaturunterschied beschleunigt.

In den durch Blockrandbebauung geprägten Quartieren verhindert meist die Randbebauung das Einwirken von Kaltluft in den Blockinnenraum. Lediglich die größeren stark durchgrünten Blockflächen weisen einen bodennahen Kaltluftstrom auf. Es zeigt sich außerdem, dass geöffnete Blockrandstrukturen das Einwirken von Kaltluft erleichtern und zum Abbau der Wärmebelastung beitragen können. Auf gesamtstädtischer Ebene wird zudem die wichtige Rolle größerer Grünzüge sichtbar, da sie die Kaltluft tief in die Bebauung heranführen können.

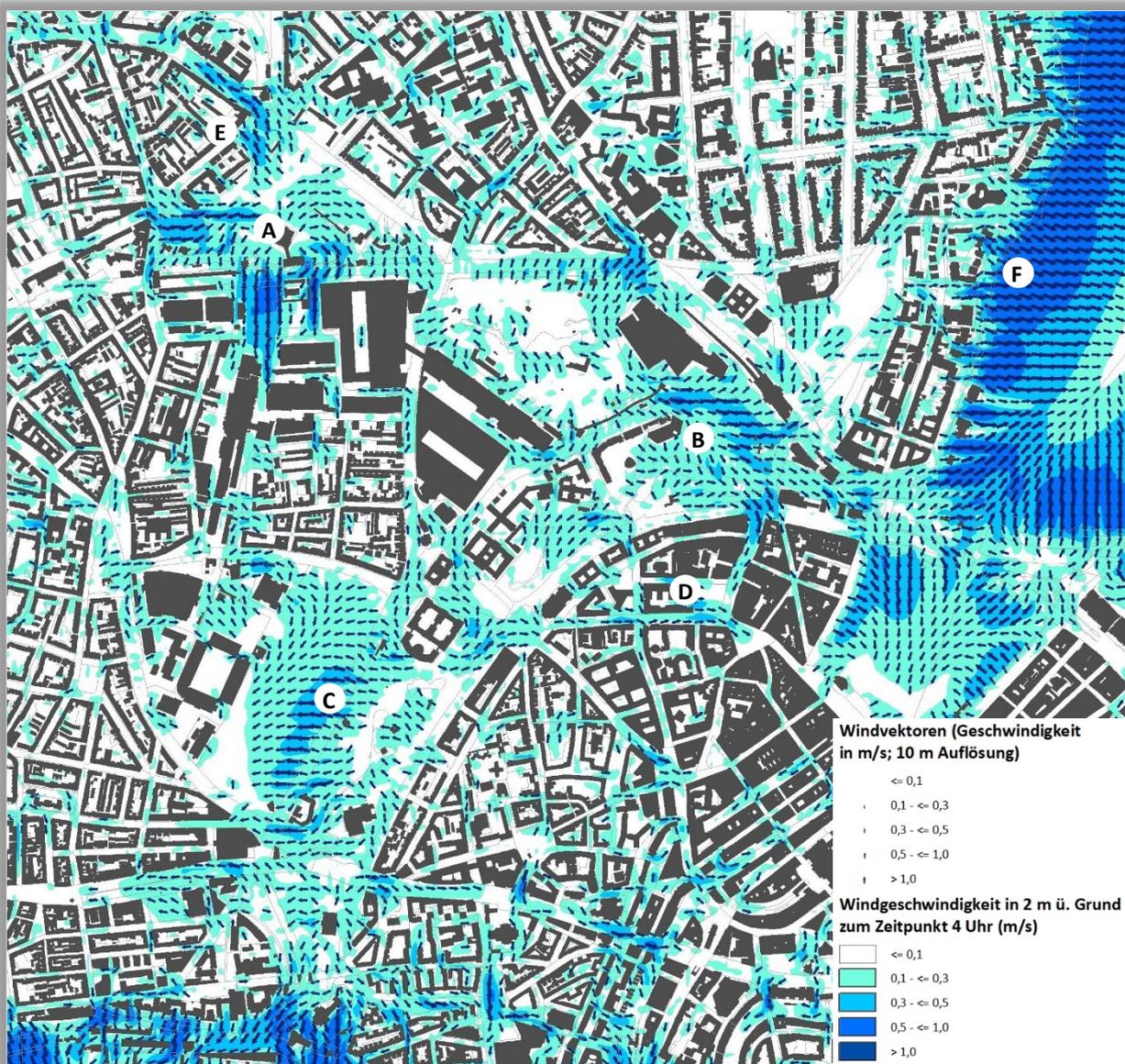


Abb. 4.5: Nächtliches Windfeld im Bereich Planten un Blomen/Dammtorpark zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund)

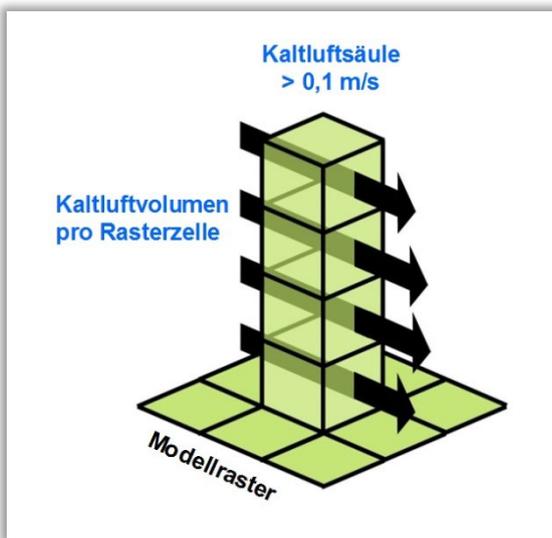
4.5 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer



Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 4 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist. Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite).



Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstromdichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 1 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht² bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb.

Abb. 4.6: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

4.6). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

STANDARDISIERUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (Z-TRANSFORMATION)

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

Wünschenswert 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, wurde der Parameter Kaltluftvolumenstrom über das Verfahren der z-

² Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit nicht höher als 0,1 m/s wird



Transformation standardisiert³. Bei einer z-Transformation wird das arithmetische Gebietsmittel des Parameters zunächst gleich Null gesetzt, anschließend werden die Originalmaßeinheiten der um dieses Gebietsmittel streuenden Werte in Vielfache der Standardabweichung umgerechnet.

Hieraus ergeben sich vier Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; s. Abb. 4.7).

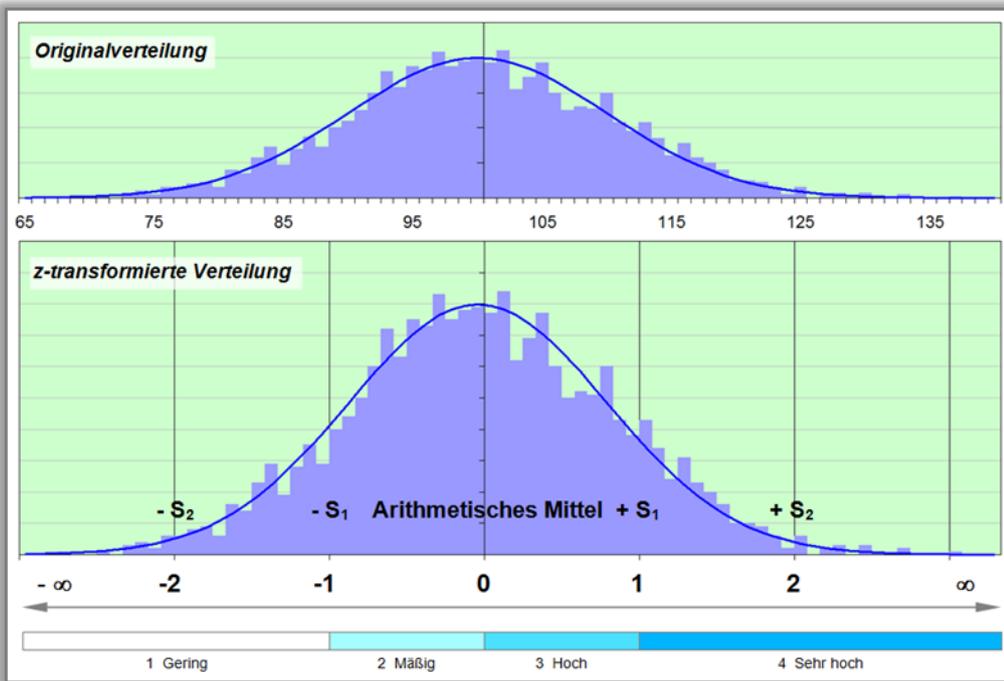


Abb. 4.7: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich somit am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Stadtgebietes. Die daraus abgeleitete qualitative Bewertung dieser meteorologischen Größe zeigt Tab. 4.2:

Mittlerer z-Wert	Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in m ³ /s um 04:00 Uhr
> 1	Sehr hoch	> 20
> 0 bis 1	Hoch	20 bis ≥ 10
> -1 bis 0	Mäßig	10 bis ≥ 5
bis -1	Gering	< 5

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mindestens 5 m³/s angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen bis mäßigen Volumenstrom aufweisen. Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer

³ Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt



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 Kaltluftsammelgebiet liegt. Letzteres kann zunächst als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und später in der Nacht 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. Gebäude, Mauern oder Straßendämme können als Strömungshindernisse wirken und auf der dem Wind zugewandten Seite (Luv) Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es dahinter im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen.

Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgröße, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abbildung 4.8 zeigt den Kaltluftstrom für den Ausschnitt Volkspark Altona/Friedhof Diebsteich in einer quantitativen Abstufung. Ausgehend vom Volkspark (**A**) als (Haupt-) Kaltluftentstehungsfläche sind mehrere Kaltluftströme zu beobachten. Die Hauptströmung setzt sich über den Friedhof Holstenkamp (**B**) sowie den Friedhof Diebsteich (**C**) nach Südosten hin fort und wirkt weit in die Bebauung ein. Zum anderen wird sich auch der Deckel über der A7 positiv auf die Durchlüftung auswirken, da hier eine weitere klimatisch wirksame Durchlüftungszone mit lokal sehr hohem Kaltluftvolumenstrom entsteht (**D**).

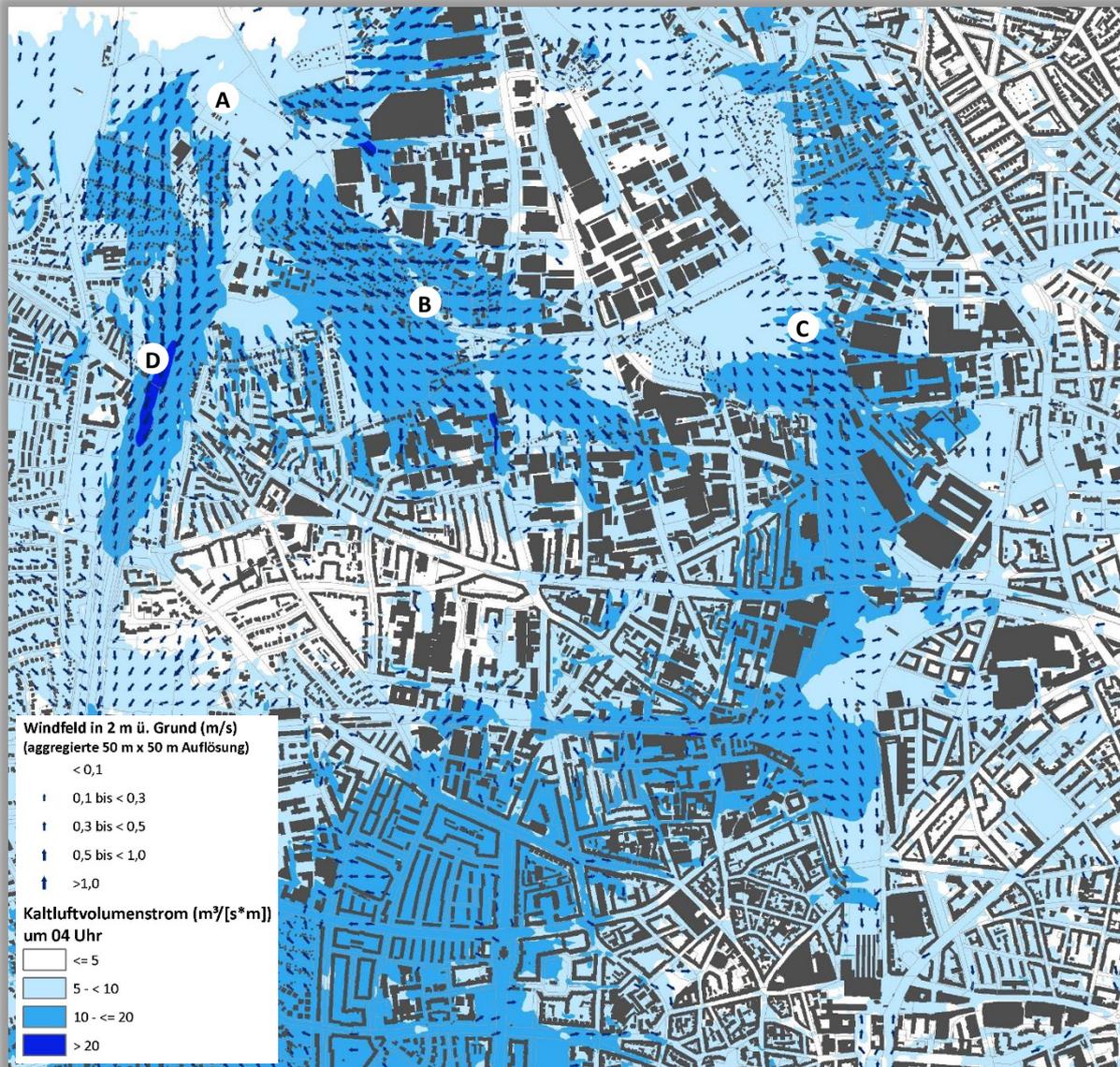


Abb. 4.8: Kaltluftvolumenstrom im Bereich Altona zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund)

Insbesondere entlang von größeren Grünachsen dringt die Kaltluft mit oft hoher bzw. sehr hoher Intensität 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 wie Mauern überwunden werden können. Darüber hinaus können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen.

Da der Kaltluftvolumenstrom das über die Höhe auch auf Dachniveau transportierte Luftvolumen repräsentiert, sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als die bodennahen Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.



5 Klimaanalysekarte

Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Stadtgebiet Hamburg zugrunde (s. Kap. 2 bis 4). Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (Wirkungsraum) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsräume). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinandergrenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (Luftleitbahnen) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges innerhalb des Stadtgebietes. Im Gegensatz zur Bewertungskarte werden in der Klimaanalysekarte nicht die ALKIS-Flächen als Bezugsgeometrien, sondern die rasterhaft vorliegenden Ergebnisse dargestellt. Damit zeigt sich deutlicher die flächeninterne Heterogenität in den Siedlungsräumen (z.B. durchgrünte Blockinnenhöfe; s. Abb. 5.1; S. 26).

KALTLUFTLIEFERUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Für die Kaltluftentstehungsflächen wird der rasterhaft berechnete Kaltluftvolumenstrom (vgl. Kap. 4.4) in einer quantitativen Abstufung dargestellt. Somit wird die räumliche Ausprägung und die Identifikation von Teilflächen mit besonders hohen Werten gut sichtbar.

LUFTAUSTAUSCH

Windvektoren in 2 m über Grund

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes als Kaltluftabfluss in Bewegung. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt 4 Uhr ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird über eine Pfeilsignatur dargestellt. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 100 m x 100 m Kantenlänge aggregiert worden sind.

Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkungsbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftstroms befinden. Zur Abgrenzung wird ein klimatisch wirksamer Kaltluftvolumenstrom von mehr als $2 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ herangezogen. Am Ende einer warmen Sommernacht werden bis 4 Uhr ca. 79 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischluft versorgt und befinden sich damit im Einwirkungsbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen. Die Reichweite einer Kaltluftströmung in die Bebauung vor allem vom Ausmaß der



Kaltluftdynamik ab. Sie ist bei Flurwinden mit Bezug zu großräumigen Kaltluftentstehungsgebieten wie dem Stadtpark oder landwirtschaftlichen Nutzflächen am intensivsten. Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt, abhängig von der Bebauungsstruktur, zwischen ca. 100 m und bis zu 700 m. Darüber hinaus spielt auch die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle. In den peripheren und vergleichsweise gering überbauten Stadtteilen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum.

FLURWINDE UND KALTLUFTABFLÜSSE

Bei den nächtlichen Windsystemen werden Flurwinde von Kaltluftabflüssen unterschieden. Während erstere durch den horizontalen Temperaturunterschied zwischen kühlen Grünflächen und warmer Bebauung ausgelöst werden, bilden sich letztere über Oberflächen mit Hangneigungen von mehr als 1 ° aus.

BEREICHE MIT BESONDERER FUNKTION FÜR DEN LUFTAUSTAUSCH

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranzuführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Durchlüftungsbereiche sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf Wirkungsräume ausgerichtet sein. Grundsätzlich kommen Tal- und Niederungsbereiche, größere Freiräume aber auch ausgedehnte Gleisareale als geeignete Strukturen in Frage. Es erfolgt hingegen keine Ausweisung für Bereiche, wo Kaltluft von Grünflächen direkt in die Bebauung strömt. In diesen Fällen grenzen Ausgleichs- und Wirkungsräume direkt aneinander, so dass eine explizite Ausweisung von entsprechenden Strukturen nicht möglich ist. Dies ist häufig bei den innerstädtischen Grünflächen gegeben.

WÄRMEINSELEFFEKT IM SIEDLUNGSGEBIET

Basierend auf den modellierten bodennahen Lufttemperaturen wird der Wärmeinseleffekt über die Absolutwerte repräsentiert. Dargestellt wird dies für alle Rasterzellen (exklusive der Gebäude), welche sich innerhalb einer Siedlungs- oder Verkehrsfläche entsprechend der Basisgeometrien befinden. Der Wärmeinseleffekt stellt die Grundlage für die anschließende Einordnung der Wärmebelastung in der Bewertungskarte Nacht dar (Kap. 6). Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologicalen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende Kaltlufteinwirkbereiche, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Mit Blick auf die gesamtstädtische Situation ist die bioklimatische Belastung bei einer Einzel- und Reihenhausbebauung mit einem vergleichsweise niedrigen Versiegelungsgrad und hohem Grünanteil am geringsten ausgeprägt. Diesen Gunsträumen stehen



Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die Innenstadt sowie Stadtteilzentren, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung. Dabei treten auch die größeren Gewerbeflächen mit einer Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie eine Zentrumsbebauung aufweisen. Abbildung 5.1 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Altona, wobei die Lufttemperatur mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Die stärkste Überwärmung mit Lufttemperaturen zwischen 19,5 °C und 20,0 °C ist im Umfeld der Gewerbeflächen an der Schnackenburgallee (A) und der Stresemannstraße (B) anzutreffen (dunkelorange).

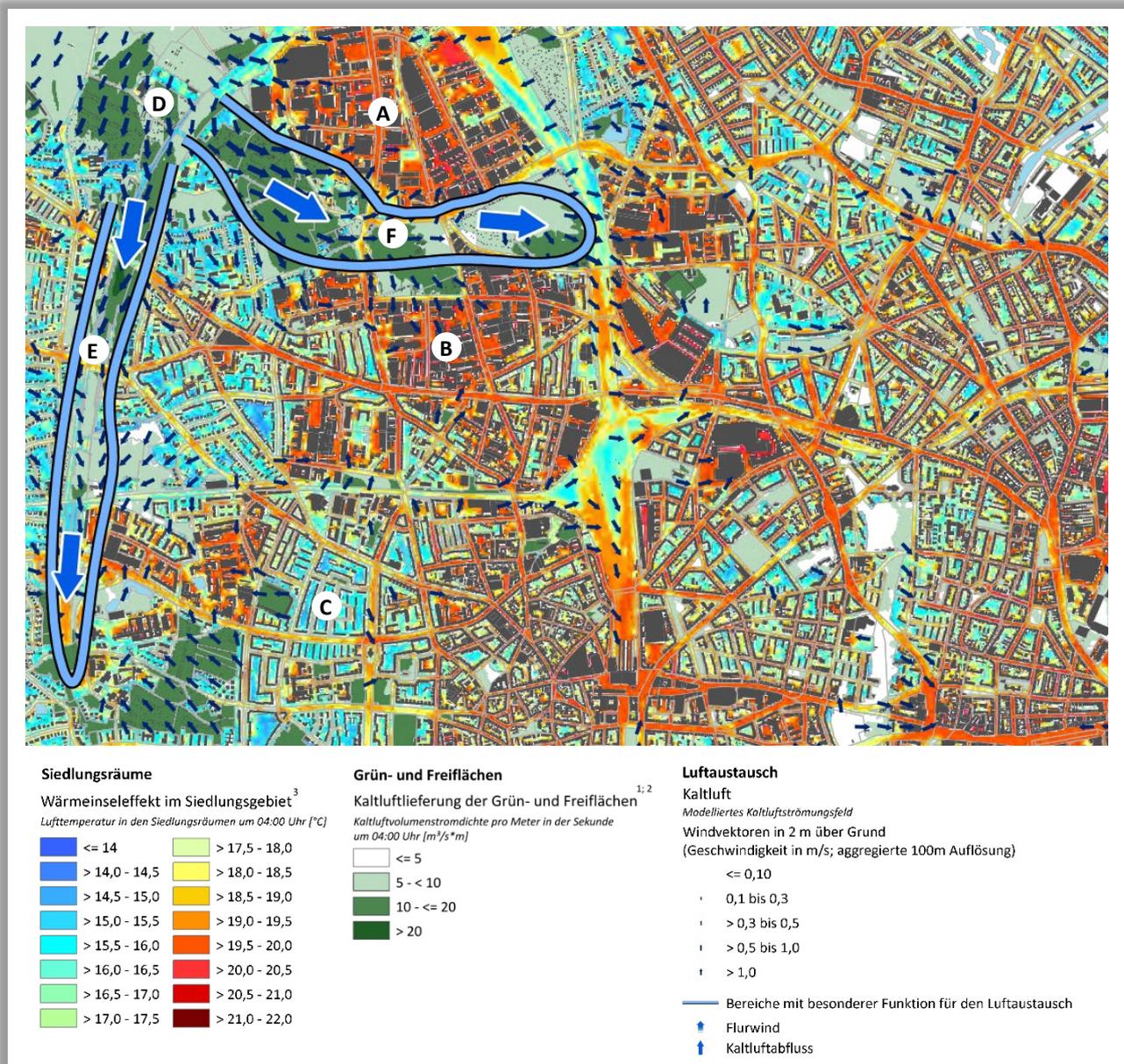


Abb. 5.1: Klimaanalysekarte im Bereich Altona

Ein bei Temperaturen um 15 °C sehr schwach ausgeprägten Wärmeineffekt (türkis) ist hingegen im Bereich der durchgrüneten Blockrandbebauung an der Behringstraße anzutreffen (C). Der Wärmeineffekt in der durch Blockrandtypologien charakterisierten Bebauung kann je nach Versiegelungs- und



Überbauungssituation (z.B. Garagenhöfe, Pkw-Stellplätze) ein breites Spektrum an nächtlicher Überwärmung aufweisen. Zudem liegt in den meisten Straßenräumen eine deutliche Überwärmung vor. Gleichzeitig wird in der Klimaanalysekarte auch die vom Volkspark Altona ausgehende Kaltluftströmung sichtbar (**D**), welche mit sehr hohem Volumen in die Bebauung eindringt (dunkelgrün).

Die zuvor in Kap. 4.4 angesprochenen Durchlüftungszonen im Bereich des Deckels über der A7 (**E**) sowie der vom Volkspark ausgehende Grünflächenverbund (**F**) werden in der Klimaanalysekarte als Bereiche mit besonderer Funktion für den Luftaustausch ausgewiesen. Aufgrund der Reliefsituation sind diese Kaltluftströme als lokale Kaltluftabflüsse einzuordnen.



6 Bewertungskarten Stadtklima

Innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Die Bewertungskarten Stadtklima stellen eine integrierende Bewertung der modellierten Klimaparameter im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihnen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

klimaökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen. Die zugeordneten Hinweise geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Maßnahmen im Rahmen der räumlichen Planung ableiten lassen.

Es wurde jeweils eine separate Bewertungskarte für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Stadtgebiet Hamburg 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 Hinweise zugeschrieben.

6.1 Vorgehensweise

6.1.1 Bewertung der Nachtsituation (Klimawirkung)

SIEDLUNGSRAUM

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation wird die nächtliche Überwärmung in den Nachtstunden (4 Uhr morgens) herangezogen. Da die Bewertungskarte die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches abbilden soll, wird hier der nächtliche Wärmeinseleffekt betrachtet. In der Nacht ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, 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 Bewertungskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über die nächtliche Überwärmung. Der nächtliche Wärmeinseleffekt wird auf der Grundlage der durchschnittlichen Lufttemperatur in den Siedlungsflächen berechnet, wobei diese um 4 Uhr nachts im Stadtgebiet bei etwa 17,1 °C beträgt.



Für die Bewertungskarte erfolgt die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über den nächtlichen Wärmeinseleffekt, welcher über das statistische Verfahren der Z-Transformation ermittelt wird (vgl. Kap. 4.5; S. 21). Die mittlere Überwärmung pro Blockfläche wird dabei in fünf Klassen untergliedert (Tabelle 6.1). Eine Wärmebelastung mit entsprechendem Bedarf an Verbesserung der Situation liegt in den Kategorien „ungünstig“ sowie „sehr ungünstig“ vor.

Mittlerer Z-Wert der Lufttemperatur um 04:00 pro Block	Spannweite der mittleren Lufttemperatur um 04:00 pro Kategorie	Bewertung
≤ -1	≥ 15,8 °C	Nicht vorhanden (sehr günstig)
> -1 bis 0	> 15,8 °C bis 17,1 °C	Schwach (günstig)
> 0 bis 1	> 17,1 bis 18,4 °C	Mäßig (weniger günstig)
> 1 bis 1.9 ⁴	≥ 18,4 °C bis < 20,0 °C	Stark (ungünstig)
>1,9	≥ 20 °C	Sehr stark (sehr ungünstig)

Tab. 6.1: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts im Siedlungsraum

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika der Grünflächen⁵ im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es 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 wird ein teilautomatisierbares Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt (vgl. Abb. 6.1). Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden. Die einzelnen Klassen für die bioklimatische Bedeutung von Außenräumen werden wie folgt bestimmt:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung:

1. Ermittlung von Siedlungsräumen mit *hoher und sehr hoher* nächtlicher Überwärmung (Flächengröße > 0,5 ha)
2. Ermittlung der an (1) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 250 m).
Grünflächen im Umfeld von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen kommt grundsätzlich eine sehr hohe Bedeutung zu. Sie sind geeignet, unabhängig von ihrem Kaltluftliefervermögen ausgleichend auf das thermische Sonderklima in ihrem meist dicht bebauten Umfeld zu wirken.
3. Ermittlung von *Bereichen mit besonderer Funktion für den Luftaustausch*
Diese Strukturen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgt manuell und orientiert sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation.

⁴ Mit Blick auf den Temperaturwert 20 °C (= Tropennacht) wurde die Z-Transformation leicht angepasst.

⁵ Als „Grünfläche“ werden hier unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung all jene Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal etwa 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Wälder.



4. Allen Grünflächen aus (2) und (3) wird eine **sehr hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.

Hohe bioklimatische Bedeutung

5. Ermittlung von Siedlungsräumen mit *mäßigem* nächtlichen Wärmeinseleffekt (Flächengröße > 0,5 ha)
6. Ermittlung der an (5) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 100 m).
Wie unter (2) erfolgt die Einstufung auch dieser Flächen unabhängig von der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter
7. Ermittlung der an (2), (3) und (4) direkt *angrenzenden Grünflächen (Umfeldflächen)*.
Bereiche, die zur Ausweisung von „Kaltluftquellgebieten“ der besonders bedeutenden Flächen dienen.
8. Grünflächen aus (6) wird generell eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen
9. Grünflächen aus (7) und wird eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen, wenn sie einen hohen Kaltluftvolumenstrom aufweisen

Mittlere bioklimatische Bedeutung

10. Waldflächen wird – wenn sie nicht bereits in eine der vorgenannten Kategorien fallen – pauschal ebenfalls eine **mittlere bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.

Wald kommt generell eine von der Stärke des nächtlichen Kaltluftliefervermögens unabhängige bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum zu.

Freiflächen, die keinem der oben genannten Kriterien entsprechen, wird eine nur **geringe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen. Die nach diesem Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Freiräume basiert zum einem auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d.h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermaßen aussagekräftig sind. So kann eine Grünfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Freiräume im direkten Umfeld von Siedlungsbereichen mit nächtlicher Überwärmung und einhergehenden ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen generell eine hohe bioklimatische Bedeutung zugesprochen. Somit verfügt eine in ihrer bioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Grünfläche über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch stark belasteten Wirkungsraum.

Eine als „Hoch“ eingestufte Grünfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch weniger günstigen Wirkungsraum mit mäßiger Überwärmung oder weist ein überdurchschnittliches Kaltluftliefervermögen auf und ist gleichzeitig als Ausgleichsraum oder Kaltluftquellgebiet einzustufen.

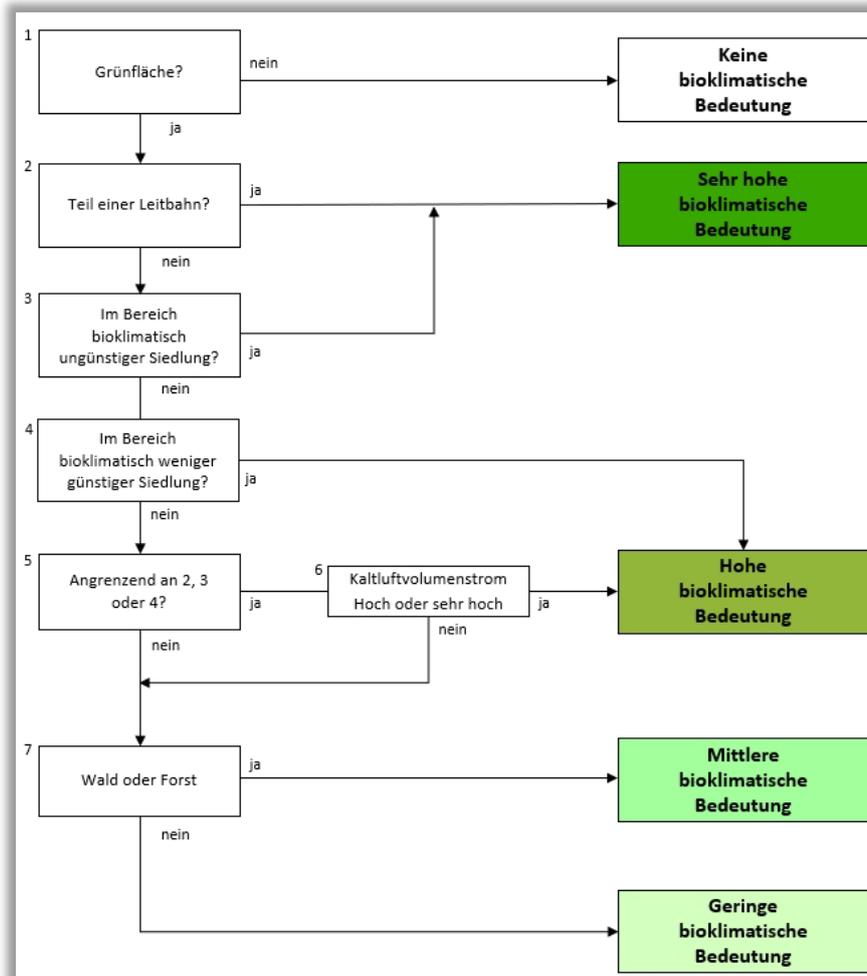


Abb. 6.1: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen in der Nacht

WEITERE KOMPONENTEN DER BEWERTUNGSKARTE NACHTSITUATION

Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkungsbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftvolumenstroms von mehr als $5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ befinden. Hier ist sowohl im bodennahen Bereich als auch darüber hinaus eine entsprechende Durchlüftung vorhanden.

Bereiche mit besonderer Funktion für den Luftaustausch

Diese Durchlüftungszonen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind aufgrund ihrer Klimafunktion elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Landschaftsachsen begünstigen vor allem am Stadtrand das Einwirken von Kaltluft aus den Kaltluftentstehungsgebieten des Umlandes. Sie können aber auch im Zusammenhang mit größeren innerstädtischen Grünflächen stehen.

6.1.2 Bewertung der Tagsituation (Aufenthaltsqualität)

Zur Bewertung der Tagsituation wird der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.2). Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. 6.2). Die Bewertung der thermischen Belastung im Stadtgebiet Hamburg orientiert sich daran.



Da die Kategorien jeweils eine Wertespanne von mehreren °C abdecken, ist zur besseren Darstellung der Belastungssituation im bebauten Siedlungsraum eine weitere Kategorie hinzugefügt worden. Diese umfasst den Temperaturbereich 38 °C bis 41 °C (als „sehr starke Wärmebelastung“) und führt zu einer besseren Differenzierung der Belastungssituation vor allem im urbanen Gebiet. Die Werteausprägung in den Grün- und Freiflächen machte diese zusätzliche Kategorie hingegen nicht notwendig.

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
38°C	<i>Heiss</i>	<i>Sehr starke Wärmebelastung</i>
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Tab. 6.2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden

Die Zuweisung der Aufenthaltsqualität von Grün- und Freiflächen in der Bewertungskarte beruht auf der jeweiligen physiologischen Belastungsstufe. So liegt eine hohe Aufenthaltsqualität bei einer schwachen oder nicht vorhandenen Wärmebelastung vor, während eine starke oder extreme Wärmebelastung zu einer geringen bzw. sehr geringen Aufenthaltsqualität führt. Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Maß für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen außerhalb von Gebäuden sowie in Grün- und Freiflächen. Diese beeinflusst zwar auch die Situation innerhalb der Gebäude, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren (z.B. gebäudebezogenen) Faktoren ab. Diese Zusammenhänge können im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht weiter vertieft werden.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Nachtsituation (Klimawirkung)

Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologicalen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas. Wie in Kap. 3.3 beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke auf Basis der nächtlichen Überwärmung ausgewiesen worden. Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen



ausgehende Kaltlufteinwirkbereiche, nur gering überwärmt oder weisen aufgrund eines hohen Grünanteils eine starke flächeninterne Abkühlung auf. Häufig sind sie auch durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Die Einwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Am Ende einer warmen Sommernacht werden in Hamburg bis 4 Uhr ca. 79 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischluft versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die Kernstadt, Stadtteilzentren sowie größere Gewerbeflächen, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung.

Abbildung 6.2 zeigt in einem Ausschnitt aus der Bewertungskarte den Bereich Altona, wobei die thermische Situation der Siedlungsräume sowie Straßen und Plätze mit einer Farbabstufung als Mittelwert für die jeweilige ALKIS-Fläche dargestellt ist. Analog zur Beschreibung des rasterbasierten Wärmeinseleffektes in der Klimaanalysekarte (vgl. Kap. 5) ist im dargestellten Ausschnitt die stärkste Überwärmung im Bereich der Gewerbeflächen südlich Leunastraße sowie der St. Pauli Hafestraße anzutreffen (rot). Die Bebauung weist je nach flächeninterner Versiegelungssituation ein breites Spektrum an Überwärmung auf. Vor allem innerhalb der Blockrandstrukturen mit begrünten Innenhöfen ist die bioklimatische Situation des Siedlungsraumes in den Nachtstunden meist als günstig einzuordnen. Der Einwirkbereich der Kaltluft ist mit einer Schraffur dargestellt.

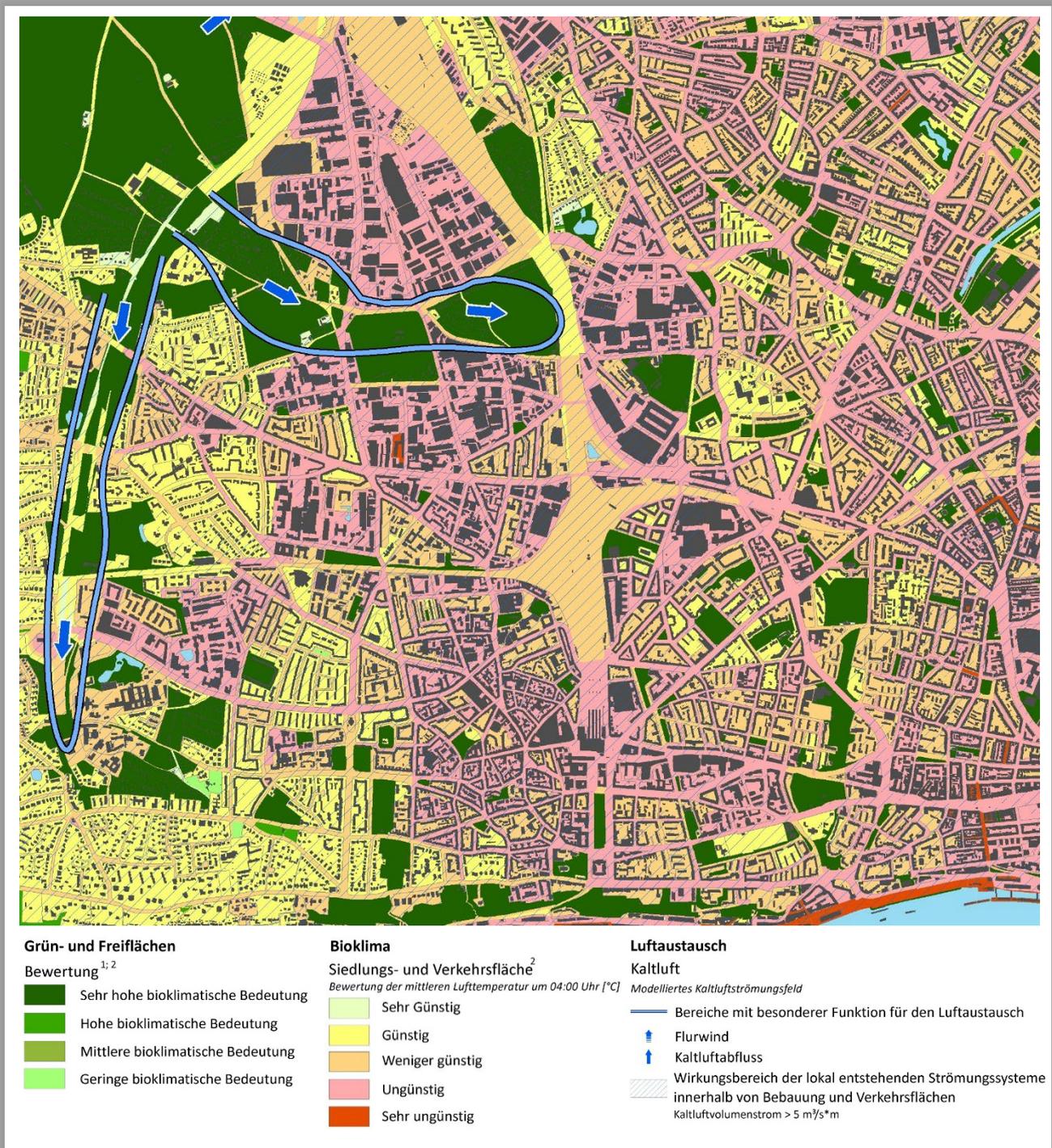


Abb. 6.2: Bewertungskarte Nachtsituation für den Bereich Altona

Flächen mit einer sehr hohen Überwärmung bzw. sehr ungünstigen bioklimatischen Situation machen unter den **Siedlungsflächen** allerdings nur einen Anteil von 6,6 % aus und sind vorwiegend in der Innenstadt sowie den größeren Gewerbeflächen anzutreffen. Bereiche mit ungünstigen Bedingungen haben einen Anteil von 14,3 %, während weniger günstige Bedingungen und damit eine mäßige Überwärmung in 17,8 % des Siedlungsraumes dominiert. Günstige Bedingungen sind in 52,3 % der Bebauung anzutreffen. Der Anteil an Siedlungsflächen ohne Überwärmung beträgt 9,0 %.



Bewertung	Flächenanteil (%)		Allgemeine Hinweise
	Siedlungsraum	Verkehrsflächen	
Keine Überwärmung <i>Bioklimatisch sehr günstig</i>	9,0	3,5	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
Geringe Überwärmung <i>Bioklimatisch günstig</i>	52,3	17,9	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Der Vegetationsanteil sollte erhalten werden.
Mässige Überwärmung <i>Bioklimatisch weniger günstig</i>	17,8	46,5	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.
Hohe Überwärmung <i>Bioklimatisch ungünstig</i>	14,3	29,5	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 hohe Überwärmung <i>Bioklimatisch sehr ungünstig</i>	6,6	2,6	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).

Tab 6.3: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Hinweise

Den **Grün- und Freiflächen** kommt zu 23,9 % eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung zuteil, während eine hohe Bedeutung 33,1 % des Grünflächenbestandszugeordnet werden kann (vgl. Tab 6.4). Eine mittlere Bedeutung liegt für 7,2 % der Grünflächen vor, wobei es sich dabei meist um Waldflächen handelt. Etwa 35,8 % 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 eher siedlungsferne und landwirtschaftlich genutzte Flächen.



Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil (%)	Allgemeine Hinweise
Gering	35,8	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit bzw. befinden sich im Umfeld von Siedlungsflächen ohne nächtliche Überwärmung. und Diese Areale weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung auf. und lassen am ehesten ein Potenzial für eine bauliche Entwicklung erkennen. Bauliche Eingriffe sollten allerdings unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. So sollten nächtliche Kaltluftströmungen zugunsten einer Bestandsbebauung nicht beeinträchtigt werden.
Mittel	7,2	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 (z.B. Baukörperstellung).
Hoch	33,0	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren bis hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
Sehr hoch	23,9	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 klimatischen Ausgleichsleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

Tab. 6.4: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Hinweise

Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss. Dies resultiert aus der Tatsache, dass durch eine Nutzungsänderung die Eigenschaft einer Grünfläche wie die Kaltentstehung bzw. -Luftlieferung möglicherweise verändert sein kann und dies einen Effekt für angrenzende Flächen hätte. Bei einer Neuplanung sollte daher die Rolle der überplanten Fläche für den angrenzenden Bestand auf Grundlage der vorhandenen Ergebnisse (z.B. Klimaanalysekarte; Kap.5) eingeschätzt werden. Wenn ersichtlich wird, dass ein Gebäude den Kaltluftstrom durch eine abriegelnde Wirkung voraussichtlich massiv abschwächen wird, ist eine Abwägungsrelevanz gegeben. Es existiert dahingehend aber kein Schwellenwert. Die Relevanz nimmt allerdings mit den zu erwartenden Auswirkungen zu und ist bei umfänglichen Bauvorhaben potenziell hoch. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Grünflächen mit sehr hoher Bedeutung bzw. Grünflächen mit einer Funktion als Kaltluftleitbahn überplant werden und deren Funktion als Kaltluftliefergebiet oder Durchlüftungsbereich beeinträchtigt werden könnte.

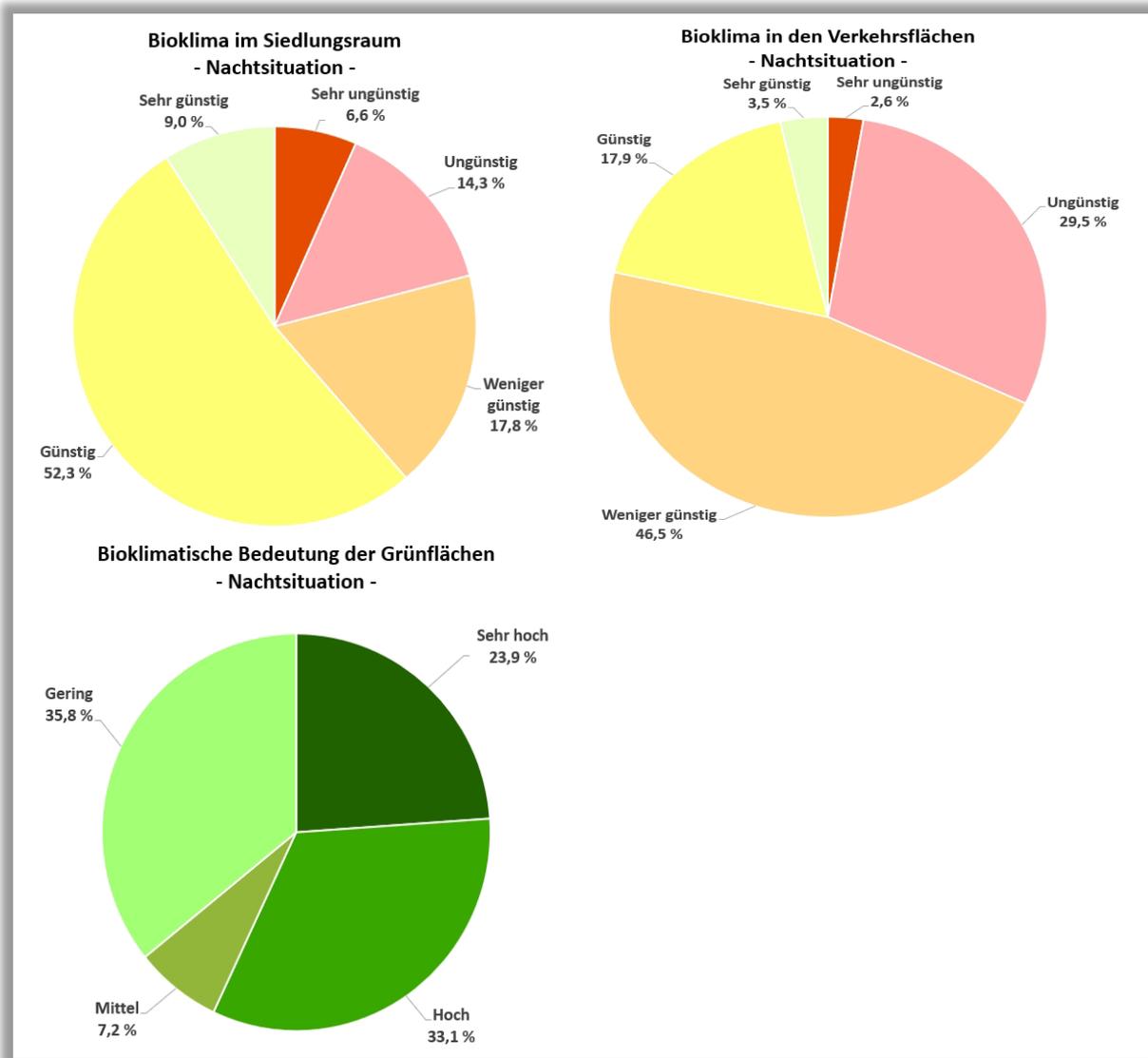


Abb. 6.3: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen (Nachtsituation)



6.2.2 Tagsituation (Aufenthaltsqualität)

Am Tage sind deutliche Unterschiede in der Aufenthaltsqualität sowohl in den bebauten bzw. versiegelten Bereichen als auch den Grünflächen zu erkennen (Abb. 6.4). **Urbane Siedlungsflächen** lassen verbreitet eine starke und sehr starke bioklimatische Belastung erkennen (44,2 % bzw. 38,1 %), wobei eine extreme Belastung auf 4,5 % der Flächen vorliegt. Dies betrifft meist Gewerbeflächen, welche oftmals große versiegelte Areale aufweisen und in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude aufweisen, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage hoch ausfällt. **Straßen, Wege und Plätze** weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung ebenfalls verbreitet thermische Belastungen auf. Bei diesem Flächentyp liegt generell eine große Bandbreite struktureller Ausprägungen vor - von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschatteten Straßenabschnitten. Der Flächenanteil mit extremer Belastung ist mit 3,6 % allerdings geringer als in den Siedlungsflächen (Tab. 6.5).

Eine mässige Belastung ist mit einem Anteil von 13 % in den eher peripheren Siedlungsflächen mit höherem Anteil mit Schatten spendenden Grünstrukturen zu beobachten. Vor allem im Nahbereich zu Waldflächen zeigt sich die positive Wirkung größerer Baumbestände für die angrenzende Bebauung (Abb. 6.4). Areale mit schwacher Belastung spielen mit einem Flächenanteil von 0,3 % im Siedlungsraum bzw. 1,9 % in den Verkehrsflächen eine untergeordnete Rolle.

Belastungssituation	Flächenanteil (%)		Allgemeine Hinweise
	Siedlungsraum	Straßen/Fußwegenetz	
Schwach (PET < 29 °C)	0,3	1,9	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.
Mäßig (PET 29 °C bis < 35 °C)	13,0	26,2	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.
Stark (PET 35 °C bis < 38 °C)	44,2	34,7	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsigelung. 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 stark (PET 38 °C bis < 41 °C)	38,1	33,6	
Extrem (PET > 41 °C)	4,5	3,6	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsigelung. 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.

Tab. 6.5: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Hinweise



Knapp 15 % der **Grünflächen** im Hamburger Stadtgebiet kann eine hohe Aufenthaltsqualität mit geringer PET zugeschrieben werden, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich je nach Lage als (potenzielle) Rückzugsorte und Aufenthaltsbereiche für die Bevölkerung (Tab. 6.6). Dabei handelt es sich vor allem um Waldflächen sowie Parkanlagen mit ausgeprägtem Baumbestand. Zudem weisen 22,4 % der Grünflächen eine mäßige Aufenthaltsqualität auf. Die übrigen Flächen im Stadtgebiet erlauben aufgrund der meist starken Sonneneinstrahlung keinen Rückzugsort und tragen zu einem Anteil an Grünflächen mit geringer bzw. sehr geringer Aufenthaltsqualität in Höhe von 60,6 % bzw. 2,2 % bei. In diese Kategorie sind auch die landwirtschaftlich genutzten Areale einzuordnen.

Aufenthaltsqualität der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Hinweise
Hoch (PET < 29 °C)	14,8	Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die nach Möglichkeit fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), eine gute Erreichbarkeit sollte dahingehend gewährleistet sein.
Mäßig (PET 29 °C bis < 35 °C)	22,4	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) sowie ggf. auszubauen. Zudem kann es sich um siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung handeln, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Aufenthaltsbereiche am Tage dienen können.
Gering (PET 38 °C bis < 41 °C)	60,6	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion). Eher schlechte Eignung als Aufenthaltsbereich. Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
Sehr gering (PET > 41 °C)	2,2	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).

Tab. 6.6: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Hinweise

Einen Ausschnitt aus der Bewertungskarte für die Tagsituation ist in Abb. 6.4 dargestellt. Hier zeichnen sich deutlich die Straßenbereiche häufig mit einer sehr starken Belastung ab, wobei einzelne intensiv besonnte Abschnitte auch mit extremer Belastung hervortreten. Östlich der Außenalster weisen hingegen mehrere Straßenzüge aufgrund einer Verschattung durch großkronige Straßenbäume eine mäßige Wärmebelastung auf. In den bebauten Siedlungsflächen dominiert je nach Siedlungstypologie und versiegelten bzw. verschattenden Flächenanteilen eine starke bis sehr starke Belastung. Gleiches gilt für die Gewerbe- und Industrieflächen.

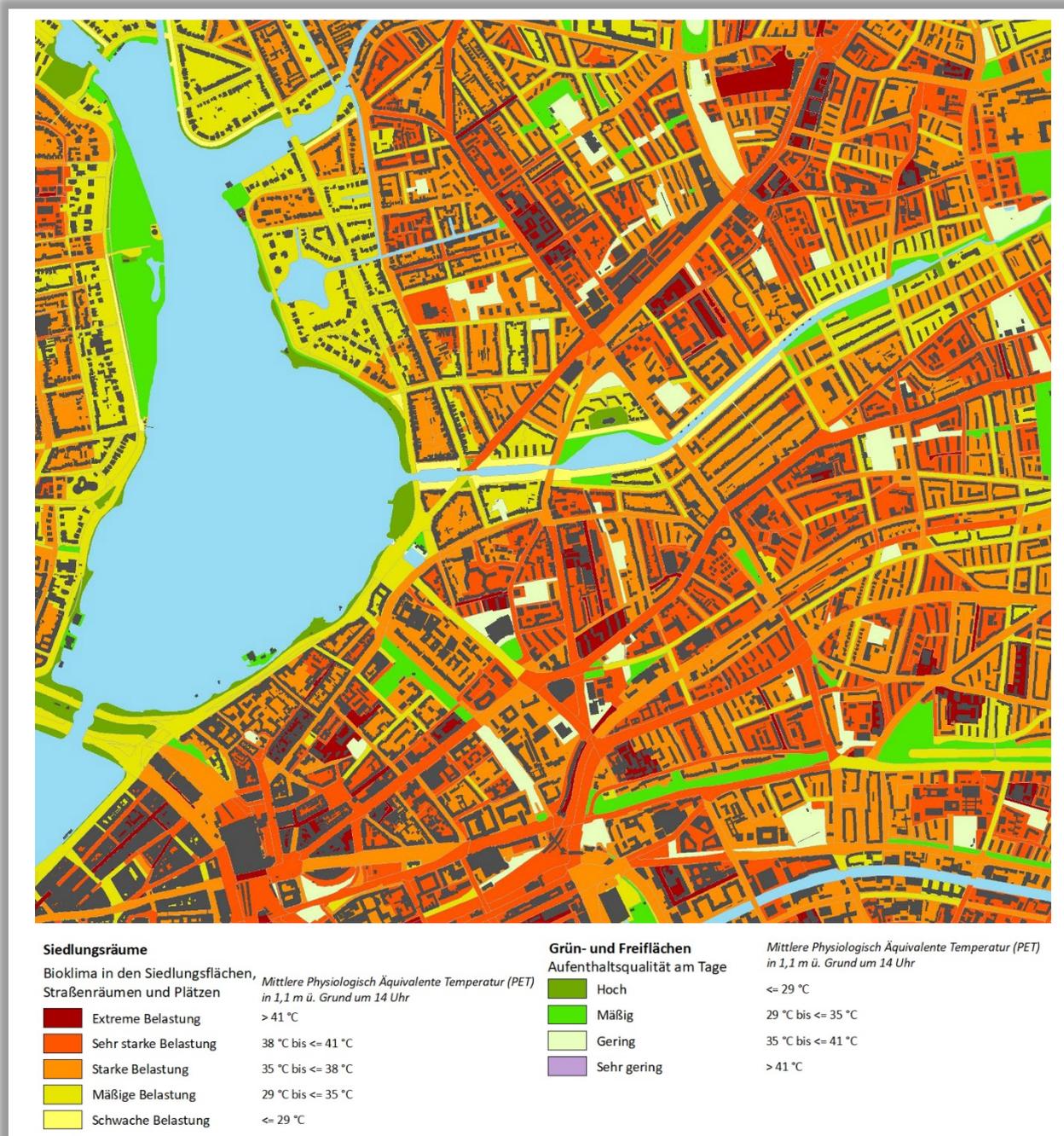


Abb. 6.4: Bewertungskarte Tagsituation für den Bereich Mundsburg

Diese Einstufung beruht, wie in Kap. 3.3 beschrieben, auf einer Mittelwertsbetrachtung für die jeweilige Fläche. Daher kann lokal im Bereich von Baumgruppen die Aufenthaltsqualität durchaus auch hoch ausgeprägt sein. In zahlreichen Grünflächen können Bäume durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert (z.B. Lohmühlenpark). Rasenflächen weisen allerdings nur eine geringe Aufenthaltsqualität auf. Der geringen Aufenthaltsqualität am Tage steht in den Nachtstunden allerdings die vergleichsweise starke Abkühlung der durch Rasen geprägten Teilflächen gegenüber.

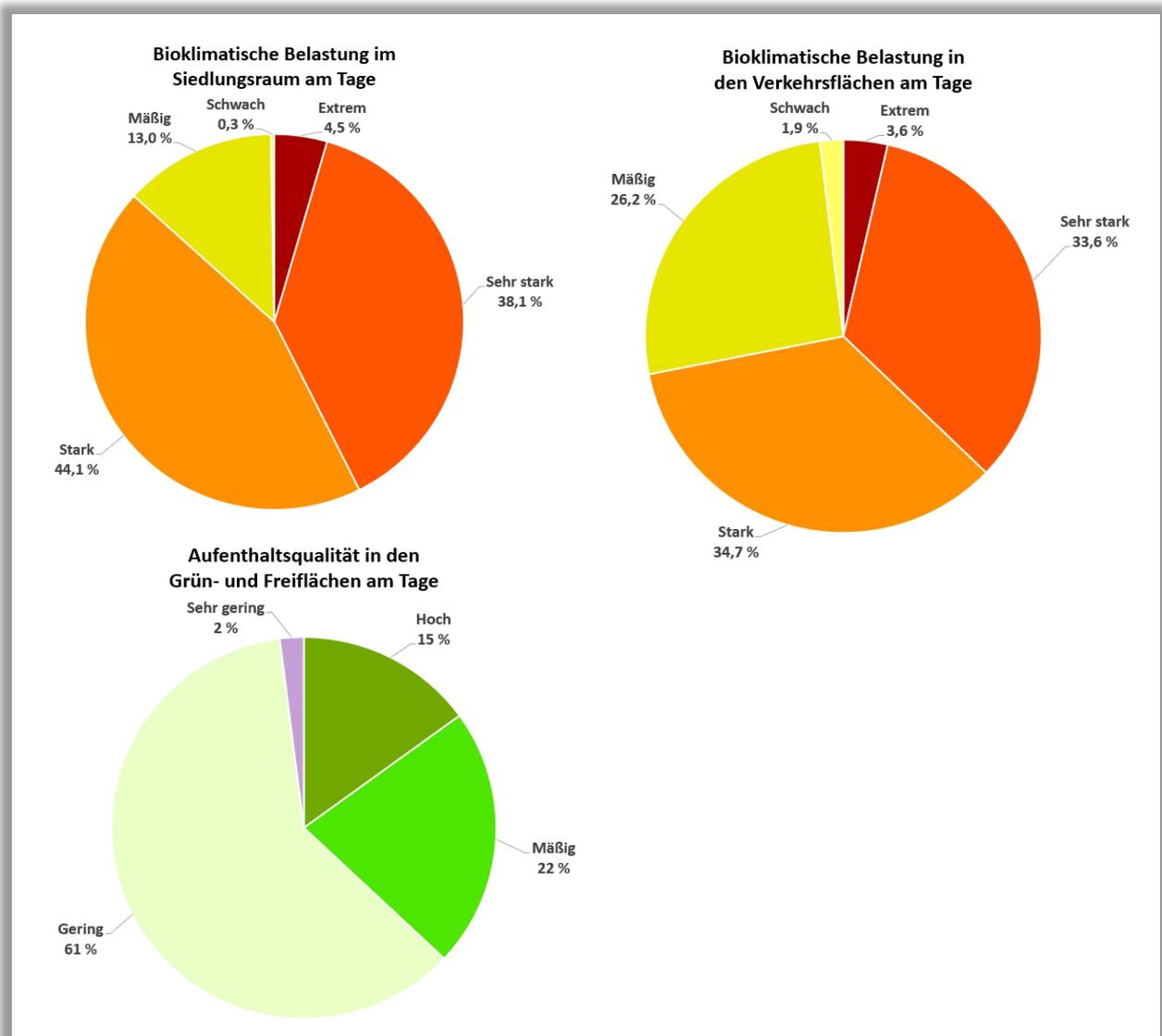


Abb. 6.5: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen (Tagsituation)



6.3 Maßnahmenkatalog Stadtklima

Für Hamburg wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen zusammengefasst, wobei die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 19 Einzelmaßnahmen vom Flächentyp und den Bewertungen in den Bewertungskarten (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt) abhängt. Sie gehen über die in Kapitel 6.2 formulierten allgemeinen Hinweise hinaus und sind als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Maßnahme einer genaueren Überprüfung bedürfen (z.B. beruht die Empfehlung Dachbegrünung auf der stadtklimatischen Situation, ohne zu berücksichtigen, ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich wäre). Die Maßnahmen sind stichpunktartig in Tab. 6.7 (S. 45) beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Außenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die Wirkung der Maßnahmen wird qualitativ beschrieben, da verifizierte Daten nur sehr vereinzelt für ganz spezielle Fallstudien zur Verfügung stehen. Zum anderen hängt die Wirkung stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Hamburger Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Soweit möglich sollte der **Grünanteil** im Stadtgebiet erhöht werden, insb. in thermisch belasteten Bereichen (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). 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 Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

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



Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Großkronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. „Projekt Stadtgrün 2021“ der LWG Bayern⁶ oder GALK-Straßenbaumliste⁷).

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M05: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen).

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange 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. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M19: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). 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. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente⁸ oder energetische Sanierung⁹ sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

Bei **Nachverdichtung** 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

⁶ www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/085113/index.php (Abruf 12.08.2019)

⁷ www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste (Abruf 12.08.2019)

⁸ Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Außenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

⁹ Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermäßiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.



geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Ziel ist es, die Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf das urbane Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz. Dahingehend weisen vor allem die Siedlungsflächen mit geringer bis mäßiger nächtlicher Überwärmung ein Entwicklungspotenzial auf. Dabei handelt es sich vor allem um Bebauungstypologien mit Reihenhaus- und Zeilenbebauung. Aufgrund des im Vergleich zu Innenstadtlagen geringen Überbauungsgrad bieten sich Chancen, im Zuge einer weiteren Verdichtung auch Grünareale mit hoher Aufenthaltsqualität am Tage zu realisieren. Die Nachverdichtung im Innenstadtbereich bietet das Potenzial, gleichzeitig auch Maßnahmen zur Hitzeminderung und Niederschlagsmanagement einzubinden. Damit könnte die (stadtklimatische) Situation gegenüber dem Ausgangszustand trotz Nutzungsintensivierung erhalten bleiben sogar verbessert werden. Eine weitere wichtige Rolle spielt auch der Ausbau von Netzwerken wie z.B. Trinkpatenschaften in Quartieren mit hoher Einwohnerdichte bzw. hohem Anteil an älteren Menschen.

Eine räumliche Zuordnung der in Tab. 6.7 zusammengestellten Maßnahmen kann näherungsweise über die Belastungssituation am Tage bzw. in der Nacht erfolgen. So sind Maßnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Freien vor allem dort prioritär, wo die thermische Belastung sehr stark ausgeprägt ist (vgl. Bewertungskarte Tag). Gleiches gilt für den gebäudebezogenen Wärmeschutz.

Mit Blick auf die Verbesserung der Durchlüftung in den Nachtstunden sind Maßnahmen in Bereichen mit ausgeprägter nächtlicher Überwärmung bzw. ungünstigen / sehr ungünstigen Bedingungen sinnvoll. Einige dicht bebaute Siedlungsflächen im Hamburger Stadtgebiet weisen allerdings sowohl am Tage als auch in der Nacht bioklimatisch ungünstige Bedingungen auf. In den Bereichen ohne nennenswertes Einwirken von Kaltluft kommt mit Blick auf das stark versiegelte Umfeld der flächeninternen Abkühlung eine besondere Rolle zu: Durch ein günstiges „Binnenklima“ wird die Überwärmung während sommerlicher Hitzeperioden insgesamt abgefedert. Dies kommt sowohl dem Aufenthalt im Freien am Tage als auch einem erholsamen Schlaf in nur mäßig überwärmten Wohnräumen zugute.



Tab. 6.7: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM				
01	Innen-/Hinterhofbegrünung	Vegetation und Entsiegelung	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität 	Hinterhöfe
02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität 	Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Straßen, Wege, Plätze
04	Entsiegelung	Rasenflächen oder Teilversiegelung (Schotter, Rasengittersteine, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts Synergien zum Niederschlagsmanagement 	Straßen, Wege, Plätze, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
05	Begrünung und Verschattung von Straßenraum, Wegen sowie Plätzen	Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung von Haltestellen, Sonnensegel, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts 	Straßen, Wege, Plätze
06	Begrünung und Verschattung von Parkplätzen	Bäume, Sträucher oder Überdachung	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts Deposition und Filterung von Luftschadstoffen Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität 	Parkplätze
07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Vielfältigkeit der Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen, Straßen, Wege, Plätze



08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	<ul style="list-style-type: none">▪ Bedeutung für den Kaltlufthaushalt▪ Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagsmanagement	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
09	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	<ul style="list-style-type: none">▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Standgewässer▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks)▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts über der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken	Gewässer, Grün- und Freiflächen

VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

11	Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten	Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufglockerte Bebauung) <ul style="list-style-type: none">▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung▪ Reduktion des Wärmestaus	Neubau, Gebäudekomplexe (auf winterliche Behaglichkeit in den Innenräumen achten)
12	Entdichtung (Rückbau)	Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen <ul style="list-style-type: none">▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts▪ Verbesserung der Durchlüftung▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement	Blockinnenhöfe (Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen)
13	Vermeidung von Austauschbarrieren	<ul style="list-style-type: none">▪ Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen▪ Schutz des Luftaustauschsystems	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Straßen, Wege, Plätze
14	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	<ul style="list-style-type: none">▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung▪ Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, Felder, Kleingärten und Parklandschaften (im Außen- und Innenbereich), die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft▪ Synergien zur Biodiversität	Grün- und Freiflächen

REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM



15	Dachbegrünung	Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none">▪ Verbesserung des Innenraumklimas▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement, Biodiversität und Klimaschutz	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
16	Fassadenbegrünung	Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none">▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas▪ Synergien zur Luftreinhaltung, Biodiversität, Lärm- und Gebäudeschutz	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
17	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie, geeignete Raumlüftung (Verhalten der Bewohner)	<ul style="list-style-type: none">▪ Wirkung tagsüber und nachts▪ Verbesserung des Innenraumklimas▪ Synergien zum Klimaschutz	Gebäude, v.a. Südfassaden und in Bezug auf Fenster- und sonstige Glasflächen (Neubau und Bestand)
18	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	Dämmung von Gebäuden, Erhöhung der Albedo	<ul style="list-style-type: none">▪ In erster Linie Klimaschutzmaßnahme▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber	Gebäude (Bestand)
19	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer (etwa im Krankenhaus))	<ul style="list-style-type: none">▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)



WEITERE HINWEISE ZUR AUFENTHALTSQUALITÄT VON GRÜNFLÄCHEN

Eine intensive Begrünung des Straßenraums und die Aufwertung der Bestandsbebauung mit Bäumen steigern die Aufenthaltsqualität im Freien beträchtlich, da somit große beschattete Bereiche geschaffen werden. Damit das Gehen/Radfahren im Schatten ermöglicht. Dieser Aspekt hat vor allem deshalb Relevanz, die siedlungsnah Grünfläche an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung zu verbessern. Im Übergangsbereich einer Grünfläche zur Bebauung sollte allerdings auf dichte Vegetationselemente wie Gehölze und Hecken verzichtet werden, da diese die bodennahe Kaltluftströmung beeinträchtigen können. Ein weiteres klimaausgleichendes Gestaltungselement können Brunnenanlagen in Platzbereichen bzw. Freiflächen darstellen. Insbesondere die Temperaturspitzen können kleinräumig durch die durch Wasserflächen erzeugte Verdunstungskälte reduziert werden und die Aufenthaltsqualität im Freien verbessern. Für die strukturelle Ausgestaltung der Grünanlage lassen sich die folgenden Hinweise geben.

Innerstädtische Grün- und Freiflächen sollten möglichst vielfältige Mikroklimata bereitstellen, wobei als Leitbild der erweiterte „Savannentyp“ dienen kann (KUTTLER 2013). Er besteht zu einem grossen Anteil aus Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z.B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind (Abb. 6.6). Ziel sollte sein, möglichst vielgestaltige „Klimaoasen“ zu schaffen, welche ein abwechslungsreiches Angebot für die unterschiedlichen Nutzungsansprüche der Menschen (z.B. windoffene und windgeschützte Bereiche, offene „Sonnenwiesen“, beschattete Bereiche) darstellen. Durch diese heterogene Anordnung wird sichergestellt, dass sowohl die nächtliche Abkühlung der Luft als auch der Aufenthalt am Tage für alle Zielgruppen optimiert ist.



Abb. 6.6: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen



7 Literatur

- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.
- 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. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992
- 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. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- 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.