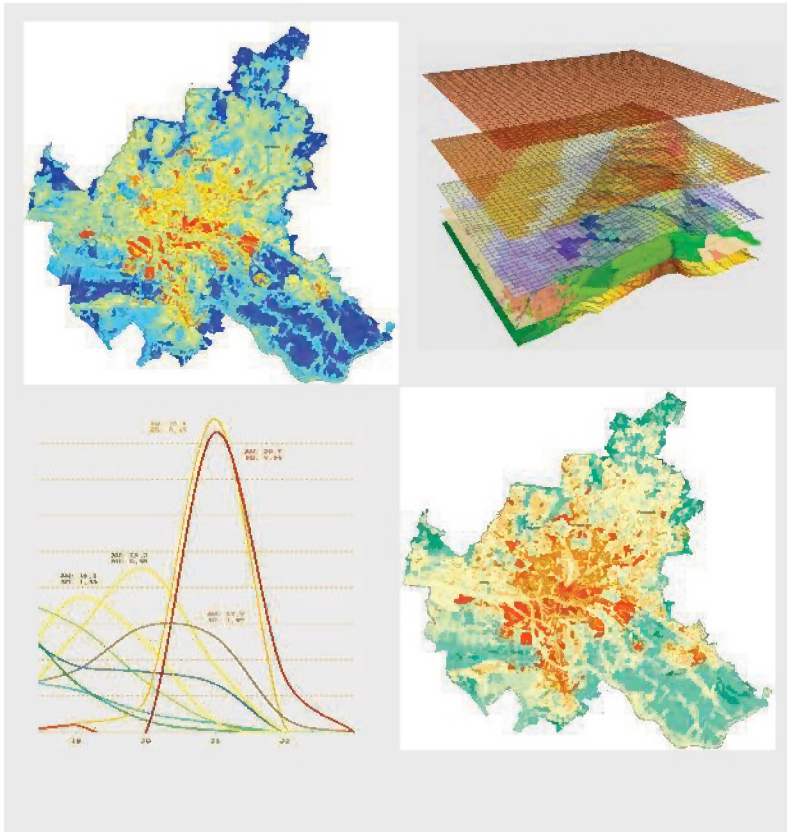


# Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für die Freie und Hansestadt Hamburg

Aktualisierte Klimaanalyse 2017 - Dokumentation



Auftraggeber:

**Freie und Hansestadt Hamburg**  
Behörde für Umwelt und Energie  
Landschaftsplanung und Stadtgrün  
Neuenfelder Straße 19  
21109 Hamburg

gefördert mit Mitteln der  
Leitstelle Klimaschutz Hamburg,  
Behörde für Umwelt und Energie



**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**

Große Pfahlstraße 5a  
3 0 1 6 1 Hannover  
Tel. (0511) 3887200  
FAX (0511) 3887201  
[www.geo-net.de](http://www.geo-net.de)

In Zusammenarbeit mit:

**Prof. Dr. G. Gross**

Anerkannt beratender Meteorologe (DMG),  
Öffentlich bestellter Gutachter für Immissionsfragen  
Und Kleinklima der IHK Hannover-Hildesheim

Hannover, April 2018



## Vorwort

Hamburg verzeichnet seit mehreren Jahren eine hohe Bautätigkeit – insbesondere beim Wohnungsbau, aber auch im Zusammenhang mit anderen Themen wie bspw. Straßenbau oder Bereitstellung neuer Flächen für Industrie und Gewerbe. Vor diesem Hintergrund wurde die „Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg und Klimaszenario 2050“ aus dem Jahre 2012 (GEO-NET) aktualisiert und den heutigen fachlichen und rechtlichen Anforderungen von Planungsprozessen angepasst. Die Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, Abteilung Landschaftsplanung und Stadtgrün legt nun zur fachlichen Bearbeitung von Klimaaspekten in Planungsprozessen die **„Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für die Freie und Hansestadt Hamburg – aktualisierte Klimaanalyse 2017“** vor.

Die Arbeit wurde mit Mitteln aus dem Hamburger Klimaplan der Leistelle Klimaschutz der Behörde für Umwelt und Energie Hamburg erstellt. Erarbeitet wurden die fachlichen Inhalte von GEO-NET, Hannover. Die Ergebnisse sind in einem umfangreichen GIS-Kartenwerk mit begleitender Dokumentation verfügbar.

**Behörde für Umwelt und Energie**  
**Amt für Naturschutz, Grünplanung und Energie**  
**Abteilung Landschaftsplanung und Stadtgrün**  
**Dr. Maja Berghausen**

Neuenfelder Straße 19 - 21109 Hamburg  
Tel. 040 42840 8048

April 2018



## Inhaltsverzeichnis

Seite:

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Geländehöhe .....	3
2.2 Nutzungsstruktur .....	4
<b>3. Methodik .....</b>	<b>9</b>
3.1 Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH.....	9
3.2 Standardisierung des Parameters Kaltluftvolumenstrom .....	15
3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	16
3.3.1 Grün- und Freiflächen .....	16
3.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen.....	17
<b>4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....</b>	<b>19</b>
4.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld.....	19
4.3 Autochthones Windfeld und Kaltluftvolumenstrom.....	23
4.4 Kaltluftvolumenstrom .....	25
4.4 Nächtlicher Wärmeinseleffekt .....	27
<b>5 Klimaökologische Funktionen während einer austauscharmen Sommerwetterlage.....</b>	<b>29</b>
<b>7 Hinweise zur Verringerung der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen sowie zur Aufenthaltsqualität von Grünflächen .....</b>	<b>32</b>
<b>8 Literatur.....</b>	<b>34</b>
<b>7 Glossar.....</b>	<b>35</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prozessorientierte Analyse .....	V
Abb. 2: Geländehöhe im Stadtgebiet Hamburg .....	3
Abb. 3: Für die Klimasimulation parametrisierte Nutzungsstruktur im Stadtgebiet Hamburg.....	4
Abb. 4: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m) bei einem digitalem Geländehöhenmodell.....	10
Abb. 5: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit.....	12
Abb. 6: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle.....	13
Abb. 7: Eingangsdaten für die Modellrechnung.....	13
Abb. 8: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen.....	14
Abb. 9: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern.....	15
Abb. 10: Lufttemperatur zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage).....	21
Abb. 11: Lufttemperatur zum Zeitpunkt 14 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage).....	22
Abb. 12: Prinzipskizze Flurwind .....	23
Abb. 13: Strömungsgeschwindigkeit des nächtlichen Windfeldes zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage).....	25
Abb. 14: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.....	26
Abb. 15: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage).....	27
Abb. 16: Nächtlicher Wärmeinseleffekt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage) .....	28
Abb. 17: Klimafunktionen im Bereich Hamburg-Nord/Wandsbek.....	31
Abb. 18: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen.....	33

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung.....	5
Tab. 2: Berücksichtigte Bebauungspläne.....	6
Tab. 3: Bewertung des Kaltluftvolumenstroms innerhalb von Grünflächen.....	17
Tab. 4: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts in Siedlungsflächen.....	18



## Zusammenfassung

Im Auftrag der Behörde für Energie und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet Hamburgs erstellt. Die Untersuchung stellt eine Aktualisierung der erstmals 2011/2012 für die gesamte Stadtfläche Hamburgs durchgeführte Analyse dar, bei der ein einheitliches numerisches Klimamodell angewendet wurde. Dabei wurden klimarelevante Bebauungspläne und -entwürfe mit einer Größe von mehr als 3 ha in die Datenbasis eingearbeitet. Ziel war es, meteorologische Basisdaten in einer hohen räumlichen Auflösung zu simulieren (mindestens Raster 50 m x 50 m, 2 m über Grund) und die stadtklimatischen Zusammenhänge und Prozesse herauszuarbeiten – insbesondere die Kaltluftentstehungsgebiete einschließlich des Kaltluftvolumenstroms in Grün- und Freiflächen sowie die Flächen mit einem Wärmeinseleffekt. 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 steht hier im Vordergrund, 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 ist 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 (Abb. 1). Der „Antrieb“ für diesen Luftaustausch ist der



Temperaturunterschied zwischen warmen Siedlungsflächen und kühleren Grün- und Freiflächen. Die modellierten Klimaparameter der austauscharmen Wettersituation sind in einem weiteren Schritt zu einer aktuellen, komplexen und hochauflösenden Karte der Klima- und immissionsökologischen Funktionen aggregiert und in einer Klimaanalyseskarte dargestellt worden.

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 Hamburg.

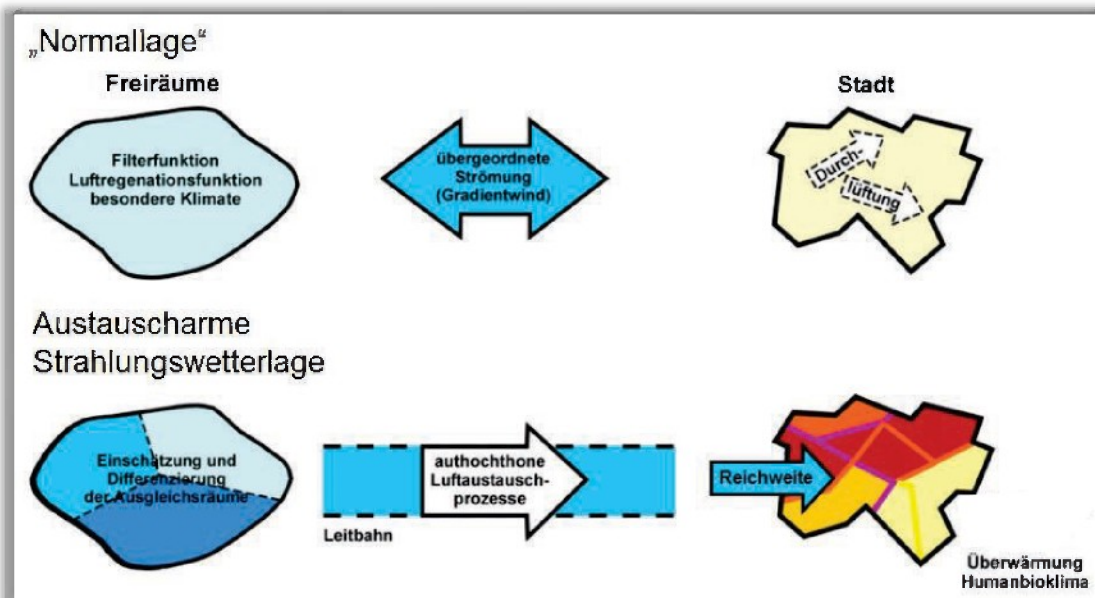


Abb. 1: Prozessorientierte Analyse

In bebautem Gelände üben die einzelnen Gebäude eine Hinderniswirkung auf die Strömung 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 Stadtteile bei. Überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumina entstehen über den großen Grünflächen wie dem Stadtpark und dem Altonaer Volkspark. Weitere Grünflächen mit nennenswertem Kaltluftvolumenstrom und zentraler Lage sind z.B. Pflanzen und Blumen, 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.

Es hat sich gezeigt, dass eine gering überbaute Einzel- und Reihenhausbebauung besser durchströmt wird als eine Block- und Blockrandbebauung oder die verdichtete Innenstadt. Die Spanne der Eindringtiefe



beträgt zwischen 150 m im Innenstadtbereich und bis zu 1000 m z. B. im Raum Blankenese. Hier ermöglichen die über den angrenzenden ausgedehnten Freiflächen entstehenden Kaltluftvolumina und die gut durchströmte Einzel- und Reihenhausbauung eine flächenhafte Durchlüftung.

Erhebliche Teile der überbauten Flächen in Hamburg 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.

Dies betrifft vor allem die innerstädtischen Siedlungsflächen sowie die gewerblich genutzten Areale. Im Hinblick auf weitere Nutzungsintensivierungen im Stadtgebiet Hamburg sollten die Funktionen der klima- und immissionsökologisch wichtigen Strukturen möglichst wenig beeinträchtigt werden. Bei konkreten Planungsvorhaben wie z.B. Bebauungsplänen ist auf Basis der vorliegenden Karten im Einzelfall zu prüfen, ob Aussagen in detaillierterer räumlicher Auflösung und Schärfe und eine entsprechende vertiefende Untersuchung nötig sind. Räumlich hochauflösende Aussagen z.B. zu Wirkungen einzelner Gebäude und zur Verschattung durch Bäume an konkreten Standorten sind auf Basis dieser Analyse nicht möglich. Dazu ist es erforderlich, geeignete mikroskalige Modellansätze zu verwenden.





## 1. Aufgabenstellung

Das Schutzgut Klima ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und Bestandteil der Abwägung in Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele ist das Vorliegen flächenbezogener Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieses Schutzgutes. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und im Nebeneffekt indirekt auch für die Luftqualität ableiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt somit ab auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse für die Gesundheit des Menschen in belastenden und austauscharmen sommerlichen Wetterlagen.

Im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) im Jahr 2017 eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet Hamburgs durchgeführt. Simuliert wurde die austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlage, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung und geringem Luftaustausch in den Siedlungsräumen einhergeht (Worst-Case-Szenario, siehe auch VDI-RL 3785 Blatt 1). Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.

Die mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) gewonnenen Ergebnisse der Klimaanalyse haben zu einer umfassenden Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Stadtgebiet von Hamburg geführt. Die durchgeführten Untersuchungen haben darüber hinaus zum Ziel, klimaökologisch wichtige und bioklimatisch belastete Raumstrukturen herauszuarbeiten und darzustellen. Es werden Kaltluftentstehungsgebiete, Flächen für den Luftaustausch und Flächen mit Wärmeinseleffekt als wichtige Bausteine für die Landschaftsplanung erarbeitet. Wichtige Aufgabe war wegen der hohen Bauaktivität in der Stadt seit 2012 darüber hinaus die Flächenkulisse zu aktualisieren und neue Projekte zu berücksichtigen. Ziel ist weiterhin, auf die Zukunft gerichtete Maßnahmen zum Schutz der relevanten Flächen bzw. zur klimaangepassten Entwicklung aufzuzeigen.

Mit dieser Untersuchung wird die „Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg – Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050“ (2012) von GEO-NET aktualisiert und den geänderten Anforderungen angepasst.

### Analyse der stadtklimatischen Zusammenhänge

Das Ergebnis ist eine aktuelle, komplexe und hochauflösende Karte der klimaökologischen Funktionen (Klimaanalysekarte). Als Grundlage für die Bewertung dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse.

Methodischer Ausgangspunkt für die Analyse der klimaökologischen Funktionen ist die Gliederung des Stadtgebietes in:





- bioklimatisch belastete Siedlungsräume einerseits und
- Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits.
- Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (*Kaltluftleitbahnen*) beide miteinander verbinden.

Aus der Abgrenzung der unterschiedlich wärmebelasteten Siedlungsflächen, den Grünräumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Hamburger Stadtgebiet in Form einer *Klimaanalysekarte*.

Dieses Vorgehen unterscheidet sich damit von der früher verbreiteten - und sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stützenden - statischen Betrachtung auf der Basis von Klimatopen, in welchen ein, den unterschiedlichen Nutzungen entsprechendes, einheitliches Mikroklima unabhängig von der Lage des Klimatops angenommen wird (VDI 1997). Während eine Thermalscannerbefliegung lediglich die Oberflächentemperatur darstellt, nicht aber die eigentliche Lufttemperatur oder Kaltluftströmungen erfasst, bietet die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Des Weiteren ermöglicht nur die numerische Simulation eine Prognose zukünftiger Entwicklungen. Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt fundierte Aussagen für den Maßstabsbereich 1 : 50 000 bis 1 : 20 000 (Maßstab von Flächennutzungsplan und Landschaftsprogramm). Eine abschätzende Beurteilung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen ist aber auch auf Bebauungsplanebene gegeben.



## 2. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei Gesamtgröße des Untersuchungsraums von ca. 1.560 km<sup>2</sup> geht die Abgrenzung des 40 km x 39 km großen Untersuchungsraumes z.T. deutlich über das Stadtgebiet Hamburgs (755.1 km<sup>2</sup>) hinaus und zielt darauf ab, auch außerhalb des Stadtgebiets 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 50 m.

### 2.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell der Behörde für Umwelt und Energie mit einer Auflösung von 5 m zurückgegriffen werden. Für das nähere Umland wurde das Geländemodell durch DTED-Höhendaten ergänzt (Digital Terrain Elevation Data - NGA 2004). Darauf basierend wurde das für die Modellrechnung erforderliche Raster mit einer Auflösung von 50 m erzeugt (Abb. 2).

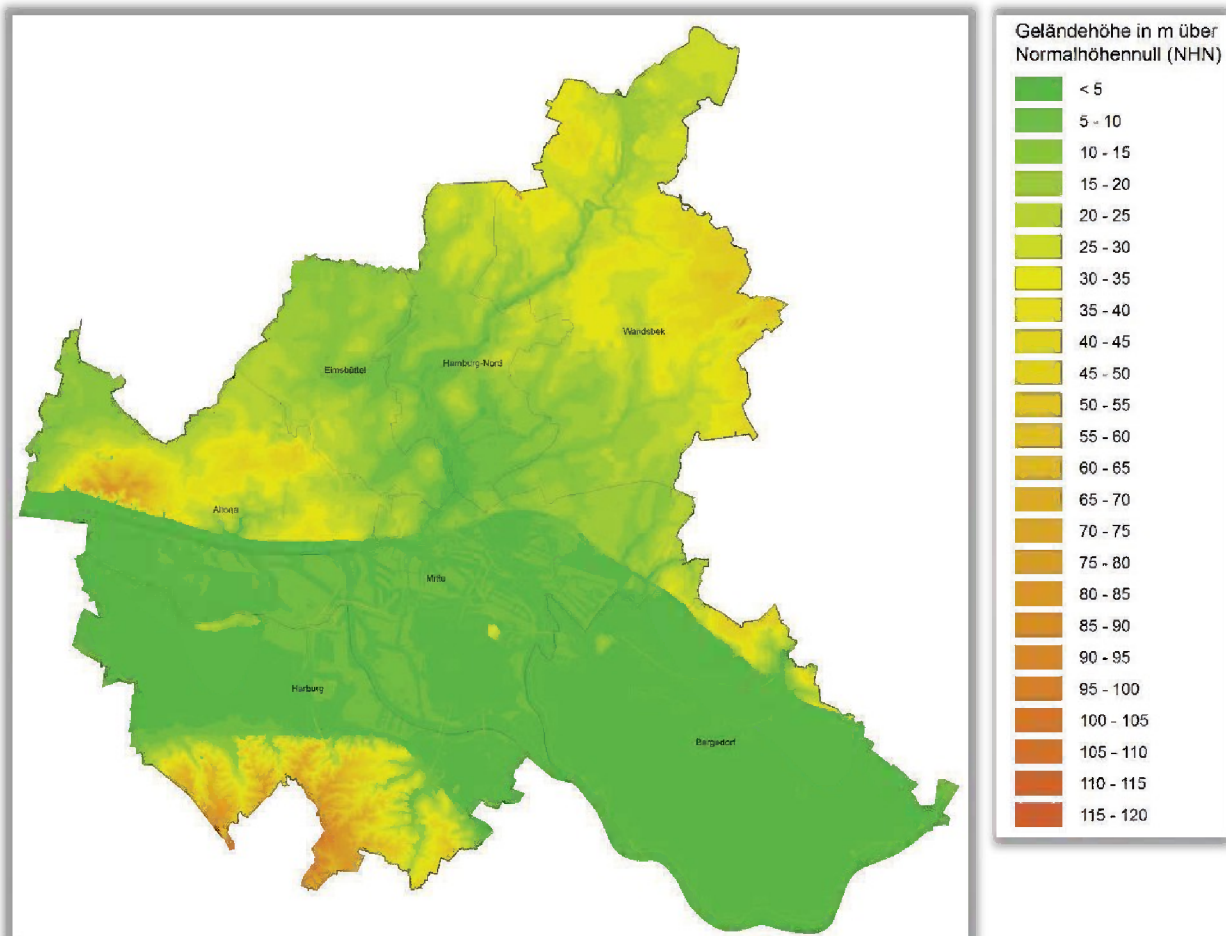


Abb. 2: Geländehöhe im Stadtgebiet Hamburg

Die höchste Erhebung im Stadtgebiet Hamburg ist mit ca. 116 m ü. NHN (Normalhöhennull) der Hasselbrack in den Harburger Bergen. Der mit mehr als 150 m ü. NN höchste Geländepunkt des Modellgebietes liegt hingegen weiter südlich außerhalb von Hamburg. Die niedrigsten Geländehöhen sind mit weniger als 5 m



vor allem in den Bereichen Billwerder, Altes Land und Wilhelmsburg anzutreffen. Lokal liegen sie aber auch unterhalb des Meeresspiegels. Somit ergibt sich eine maximale Höhendifferenz von etwa 150 m innerhalb des Untersuchungsraumes.

## 2.2 Nutzungsstruktur

Für die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen wurde das Biotopkataster der Stadt Hamburg herangezogen und durch Daten aus der digitalen Stadtgrundkarte ergänzt (STADT HAMBURG 2016). Zudem wurden klimarelevante Bebauungspläne und -entwürfe mit einer Größe von mehr als 3 Hektar in die Datenbasis eingearbeitet. Der Schwellenwert von 3 ha wurde hinsichtlich einer potenziellen klimatischen Auswirkung definiert. Es wurden die Planungen berücksichtigt, welche bis zum 14.09.2016 als Redaktionsschluss vorlagen. Eine Übersicht über die berücksichtigten Bebauungspläne gibt Tab. 2. Die Nutzungsstruktur im Stadtgebiet zeigt Abbildung 3 als Datenpunkte der Modellrechnung mit einer Auflösung von 50 m x 50 m:

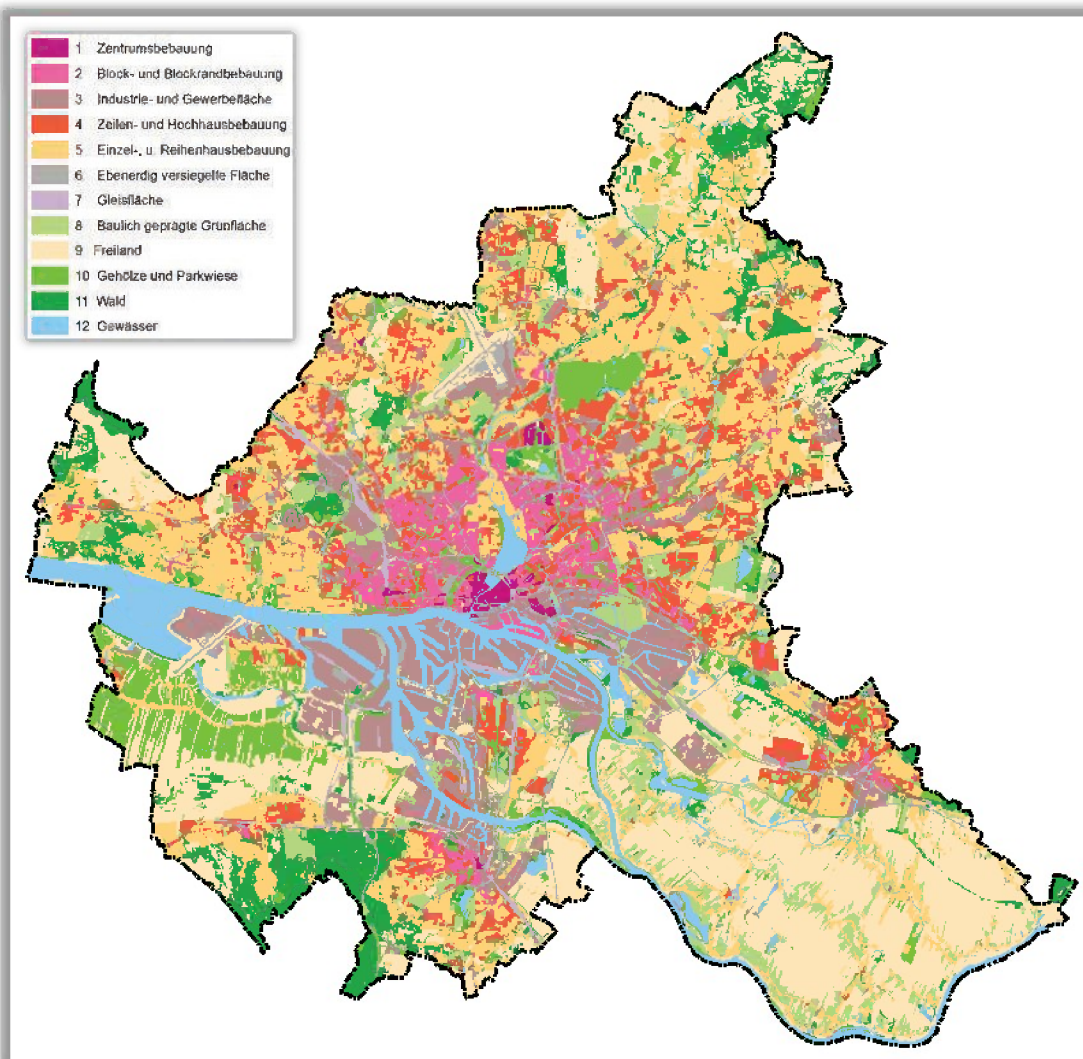


Abb. 3: Für die Klimasimulation parametrisierte Nutzungsstruktur im Stadtgebiet Hamburg

Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben. Da auf Maßstabsebene der gesamtstädtischen Klimamodellierung keine Einzelgebäude aufgelöst wurden, sind für die Einordnung der Strukturhöhe und des Oberflächenversiegelungsgrades nutzungsklassifiziert vorliegende Literaturdaten



(u.a. MOSIMANN et al. 1999) genutzt worden, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen aus mehreren deutschen Städten beruhen. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein vereinfachter, 12-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet. Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen möglich zu machen. Die verwendeten Nutzungskategorien zeigt Tab. 1.

Klasse	Flächentyp	Beschreibung	Mittlerer Versiegelungsgrad (%)	Mittlere Strukturhöhe (m)
1	Zentrumsbebauung	Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist.	95	25,0
2	Block- und Blockrandbebauung	Vergleichsweise dicht bebaute und häufig auch stark versiegelte Siedlungsfläche. Baustrukturell ist sie meist durch geschlossene Blockinnenhöfe geprägt. Sie umfasst sowohl Vorkriegs- als auch Nachkriegsbauten.	78	15,0
3	Industrie- und Gewerbefläche	Sie weist einen ähnlich hohen Versiegelungsgrad wie die Zentrumsbebauung auf, gleichzeitig ist der versiegelte Flächenanteil oft größer als der mit Gebäuden bestandene.	87	10,0
4	Zeilen- und Hochhausbebauung	Zu diesem Flächentyp zählen sowohl freistehende Punkthochhäuser als auch halboffene Blockrandbebauung und Zeilenbebauung. Gemeinsames Merkmal ist ein relativ hoher Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt.	55	15,0
5	Einzel- und Reihenhausbebauung	Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbebauung und einer Zeilenbebauung ist fließend.	41	5,0
6	Straßenraum	Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.	95	0,0
7	Gleisfläche	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe.	25	0,5
8	Baulich geprägte Grünfläche	Unter diesem Flächentyp sind vegetationsgeprägte Flächen zusammengefasst, welche zugleich auch einen gewissen Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen) und/oder Bebauung aufweisen. Dazu zählen z.B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze. Es überwiegt aber letztlich die Eigenschaft als Grünfläche.	25	5,0
9	Freiland	Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.	5	1,0
10	Gehölz	Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün.	5	2,0
11	Wald	Waldflächen sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.	5	12,5
12	Wasserfläche	Still- und Fließgewässer.	0	0

Tab. 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung nach Mosimann et al. (1999)



Für die Klimamodellierung ist weniger die Nutzungsart relevant als vielmehr die Nutzungsstruktur und damit der Flächentyp. Maßgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie z.B. Versiegelungsgrad, Bebauungsdichte und Strukturhöhe aus. Daher gilt es eine Einstufung zu finden, welche am ehesten die strukturelle Eigenschaft einer Fläche widerspiegelt. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. In Tab. 2 sind die berücksichtigten klimarelevanten Bebauungsplanentwürfe und Bebauungspläne und weitere flächenrelevante Planungen mit einer Flächengröße von mehr als 3 ha zusammengestellt. Darüber hinaus wurden alle im sogenannten Planungshinweissystem (PLIS, Stand September 2016) geführten B-Planentwürfe und Flächen hinsichtlich ihrer Klimarelevanz geprüft.

Tab. 2: Berücksichtigte Bebauungspläne

Nummer	Bezeichnung Bebauungsplan
1	A7 Deckel Altona (12 Teilflächen)
2	Altenwerder West Vollhöfner Weiden)
3	Altona Nord 26 (Neue Mitte Altona)
4	Altona-Nord27 (Holsten-Brauerei)
5	Altona-Nord27-Bahrenfeld72 (Fernbahnhof Diebsteich)
6	Alsterdorf22/Winterhude22 (Gleisdreieck Alsterdorf, Busbetriebshof)
7	Barmbek Süd 36 (Dehnheide)
8	Barmbek Nord 11 (Schlicksweg, Steilshoper Straße)
9	Bergedorf 110 (Weidenbaumsweg)
10	Bergedorf 119 / Curslack 21 (Curslack Heerweg)
11	Billstedt113 (Haferblöcken Ost)
12	Billwerder29 (Mittlerer Landweg)
13	Bergedorf 100 (westlich Kampbille)
14	Eidelstedt74 (Hörgensweg)
15	Eidelstedt75 (Duvenacker)
16	Finkenwerder 32 (Norderkirchenweg)
17	Fuhlsbüttel 23 (Ohkamp)
18	Gartenstadt Öjendorf, Glinder Straße
19	Groß Borstel 25 (Tarpenbek, Kellerblek)
20	Hafencity





Fortsetzung  
Tab. 2

21	Hammerbrook12 (Sonnin Park)
22	Hummelsbuettel28 (Rehagen)
23	Kirchwerder33 (Kirchenheerweg)
24	Kirchwerder34 (nördlich Schule)
25	Langenhorn 22 (Ochsenzoll Nord)
26	Lemsahl-Mellingstedt 20 (Lemsahler Landstraße)
27	Lohbruügge 92(Tienrade / Haempten)
28	Lokstedt62 (Süderfeldstraße)
29	Lokstedt64 (Julius Vosseler Straße)
30	Marmstorf29 (Elfenwiese)
31	Mümmelmansberg Ost, Beim Saaren
32	Neuenfelde 17 (Nincoper Deich)
33	Neugraben-Fischbek66 (Heidkamp/Röttiger Kaserne)
34	Neugraben-Fischbek67 (Fischer Reethen)
35	Neuland23 (Neuländer Straße)
36	Neustadt46
37	Neugraben Fischbek 65 (Vogelkamp)
38	Oberbillwerder (FNP Wohnbaufläche)
39	Ochsenwerder 13 (Beim Avenberg)
40	Ohlsdorf 26 (Am Weißenberge)
41	Othmarschen 40 (Othmarschenpark)
42	Othmarschen19-Ottensen 51
43	Poppenbuettel43 (Poppenbüttler Berg)
44	Rahlstedt131 (Gewerbepark Victoria)
45	Rissen45-Sülldorf 22
46	Rothenburgsort17
47	Schnelsen86 (Hogenfelder Kamp)
48	Schnelsen87 (A7 Decken Schnelsen)





Fortsetzung  
Tab. 2

50	Stellingen 65 –(A7 Deckel Stellingen)
51	Suelldorf 3 (Op'n Hainholt)
52	Schnelsen 88 (Holsteiner Chasse)
53	Stellingen61 (Vogt Kölln Straße)
54	Stellingen62 (Sportplatzring)
55	Stellingen65 (A7 Deckel Stellingen)
56	Verlegung Wilhelmsburger Reichsstraße (FNP-Blatt FP 01/15)
57	Wilhelmsburg g NordSüdAchse (ELA)
58	Wilhelmsburg 91(Wilhelmsburger Rathausviertel)
59	Wilhelmsburg 97 (Langenhövel)
60	Winterhude11-Barmbek-Nord10 (Güterbahnhof Barmbek)
61	Wilhelmsburg97
62	Winterhude 42/Alsterdorf42 (Hebebrandstraße)
63	Winterhude11-Barmbek Nord 10 (Güterbahnhof Barmbek)
64	Wohldorf-Ohlstedt 19 (Bredenbekkamp)



### 3. Methodik

#### 3.1 Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH

##### Allgemeines

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst 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 meso- (und) mikroskaligen 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 oder einer Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von einigen Metern bis hin zu Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene müssen diese in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet werden. Beispiele für solche mesoskaligen Phänomene sind der Einfluss orographischer Hindernisse auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde oder auch Düseneffekte in Straßen, sowie das Phänomen der urbanen Wärmeinsel.

Obwohl die allgemeine Struktur und die physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Allgemeinen bekannt sind, gibt es nach wie vor noch offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragung auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen der mesoskaligen Phänomene und deren unterschiedlichem Erscheinungsbild in komplexem Gelände, was es schwierig macht, auf Grundlage einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten. Mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen kann dieser Nachteil 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.



Die Verteilung der lokalklimatisch relevanten 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 immer nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Mesoskalige Modelle wie FITNAH 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, die nicht gemessen wurden und Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln.

Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert werden können und auf diese Art und Weise stadtklimatisch optimierte Lösungen gefunden werden können.

### Grundgleichungen

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Alle mesoskaligen Modelle basieren daher, wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, 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 noch erweitert werden um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung der stadtklimatologisch wichtigen Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom mesoskaligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst (vgl. Abb. 4).

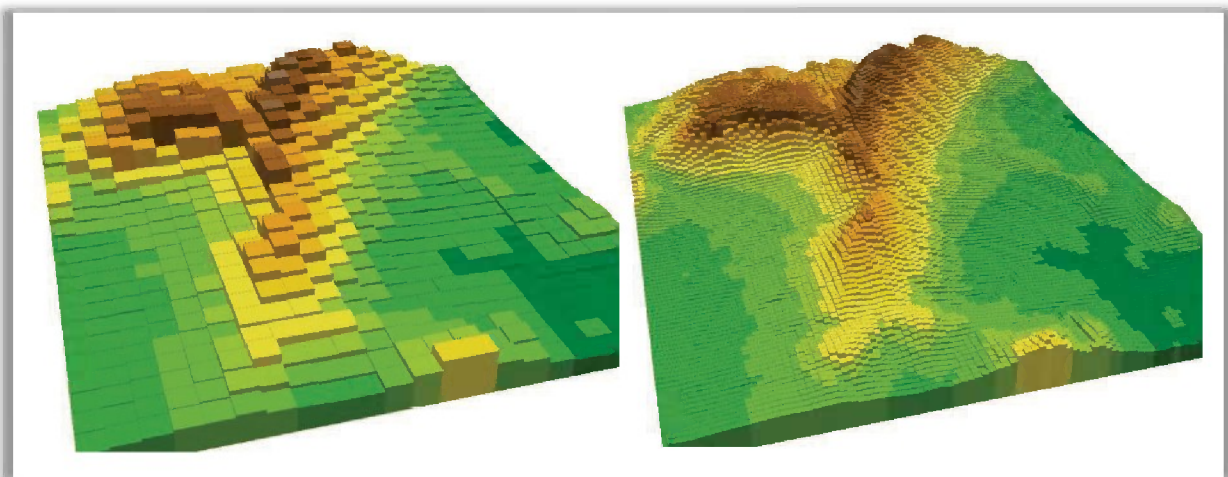


Abb. 4: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m) bei einem digitalem Geländehöhenmodell



Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und an die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH verwendete räumliche Maschenweite 50 m x 50 m. Bei allen Modellrechnungen ist die vertikale Gitterweite nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre sind die Rechenflächen besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m. Nach oben hin wird der Abstand  $\Delta z$  immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m über Grund. 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 über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen).

### Parametrisierungen

Das mesoskalige Modell FITNAH berechnet alle meteorologischen Variablen als repräsentative Werte für das entsprechende Raster. Mit der Rasterweite wird somit auch die Dimension der räumlich noch auflösbaren Strukturen festgelegt. Typische Rasterweiten sind 25m x 25m bis 1000m x 1000m. Sie decken damit in etwa den Maßstabsbereich von 1:20 000 bis 1:100 000 ab und gehen mit der Planungsebene Flächennutzungsplan bzw. Regionalplan einher. Sind diese Strukturen von ihrer räumlichen Ausprägung her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden). Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben die berechnet werden sollen, so müssen diese in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung).

Die beiden wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude der Strömung in den Weg und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, die summarische Wirkung über eine Rasterzelle mit Gebäuden ist aber eine Verzögerung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Hindernisse die Turbulenz verstärkt. Auch die Temperaturverteilung wird in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Diese Effekte können über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Porosität (Abb. 5). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

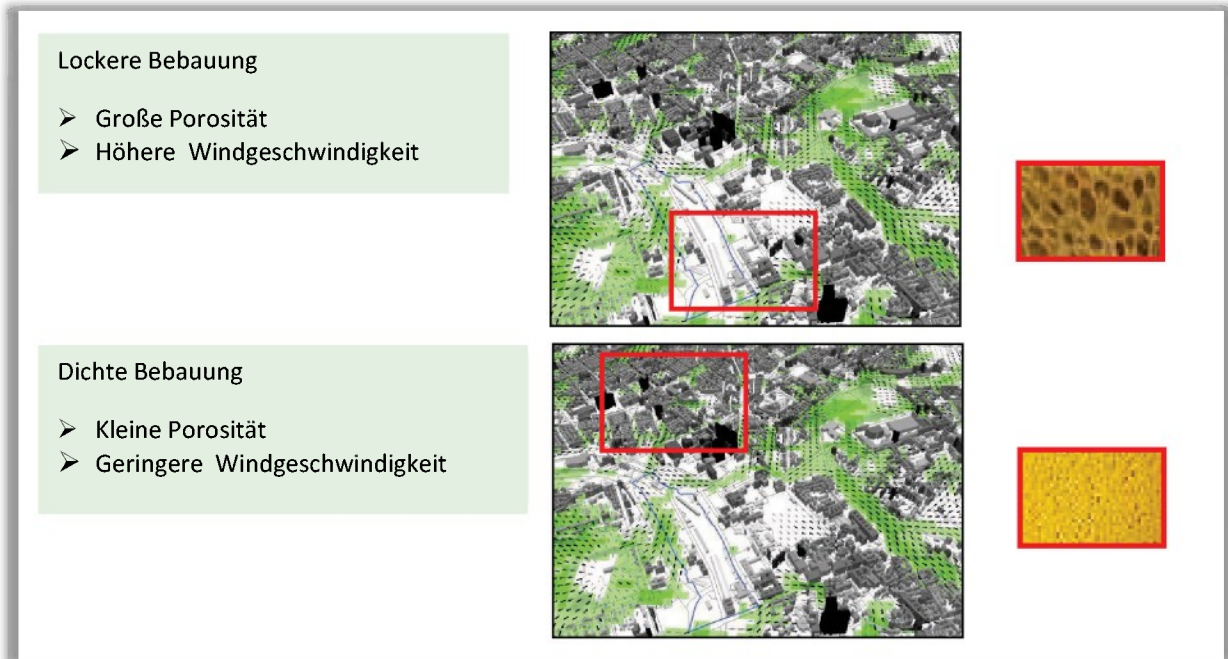


Abb. 5: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

Eine Strömung ist nur noch in den offenen Poren möglich, was für die mittlere Geschwindigkeit eine deutliche Verzögerung bedeutet. Die Temperatur wird durch die gebäudespezifischen Parameter wie Gebäudehöhe, Überbauungsgrad oder anthropogene Abwärme bestimmt und damit das Temperaturfeld der bodennahen Atmosphäre bis in die mittlere Höhe der Bebauung modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß, 1989).

Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind in der Regel so klein, dass sie nicht vom Raster des Modells aufgelöst werden können und damit parametrisiert werden müssen. Eine solche Parametrisierung muss in der Lage sein, die Windberuhigung im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im oberen Kronenraum und die nächtliche Abkühlung bzw. die mittägliche Erwärmung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erfassen (Abb. 6). Bei FITNAH werden zusätzliche Terme in das Gleichungssystem eingeführt, die zum einen über einen Widerstandsterm die Modifizierung des Windfeldes gewährleistet und zum anderen den Strahlungshaushalt im Bereich eines Baumbestandes modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß, 1993).



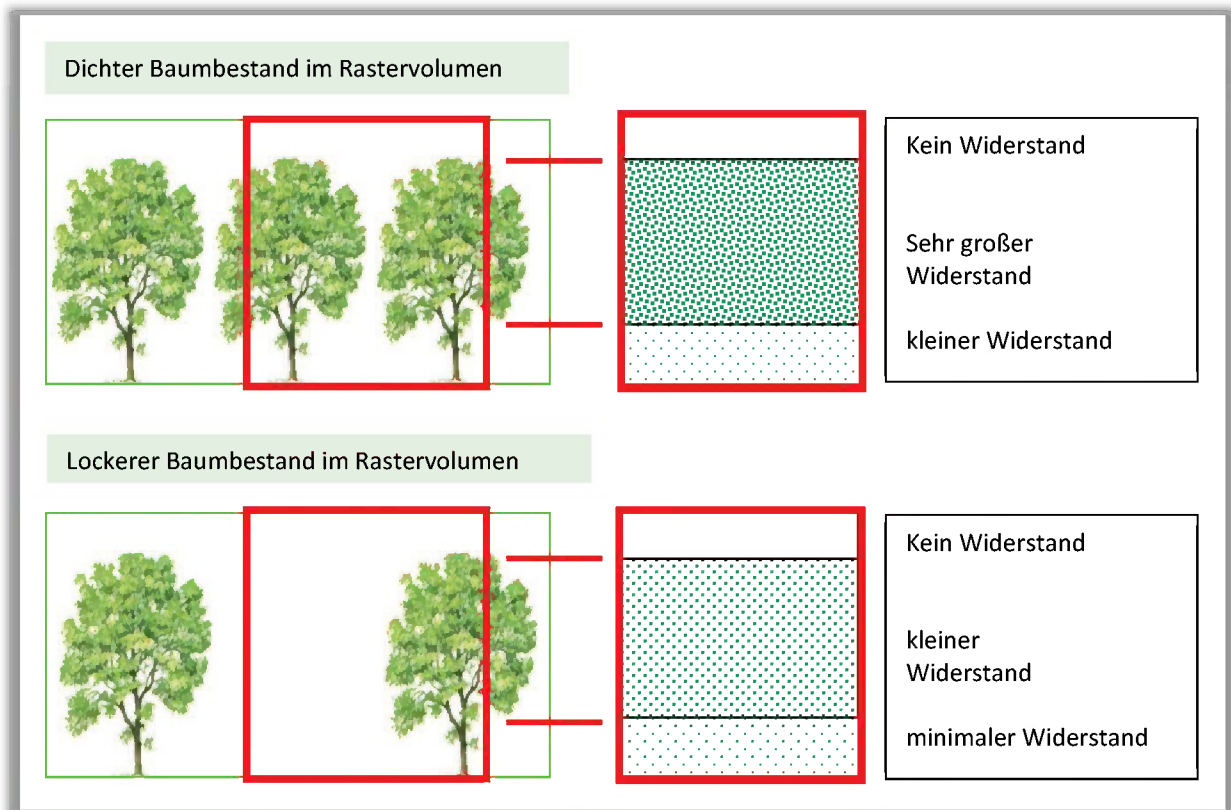


Abb. 6: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

Die beschriebenen Parametrisierungen sind geeignet, die aus Beobachtungen her bekannten, charakteristische Veränderung der verschiedenen meteorologischen Variablen im Bereich von Städten und Wäldern mit FITNAH zu berechnen.

### Eingangsdaten

Bei numerischen Modellen wie FITNAH muss zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten zur Verfügung stehen (Abb. 7). Diese müssen zum einen die Landschaft charakterisieren, für welche die lokalklimatische Studie durchgeführt werden soll, und zum anderen auch die großskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren.

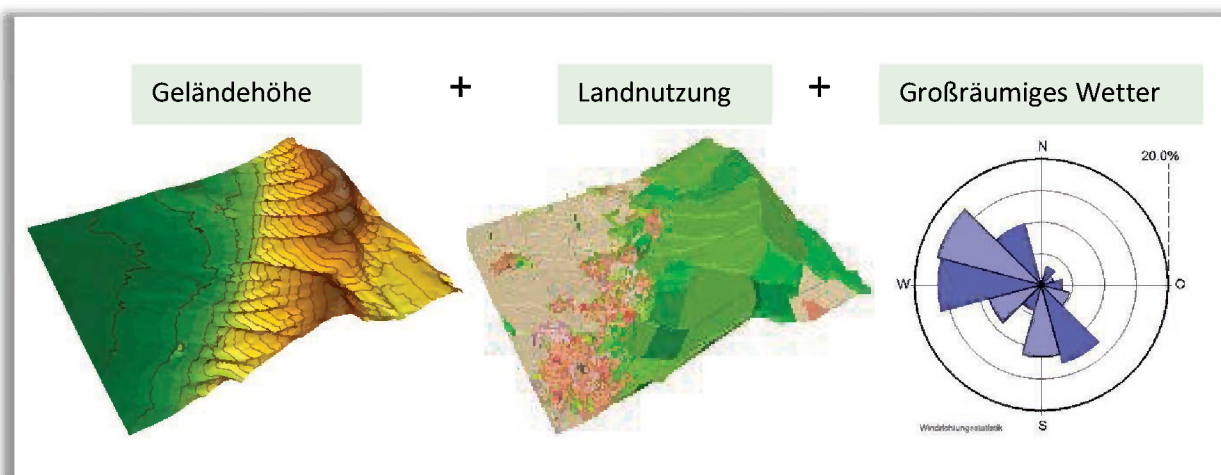


Abb. 7: Eingangsdaten für die Modellrechnung





Alle Eingangsdaten sind jeweils als repräsentativer Wert für eine Rasterzelle bereit zu stellen:

- Geländedaten (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsdaten (Verteilung der Landnutzung)
- Bei urbanen Räumen: z.B. Gebäudehöhe, Überbauungsgrad, anthropogene Abwärme, Albedo

### Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt:

- Bedeckungsgrad 0/8,
- kein überlagernder geostrophischer Wind,
- relative Feuchte der Luftmasse 50%.

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. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar (vgl. VDI-RL 3785 Blatt). In Abb. 8 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

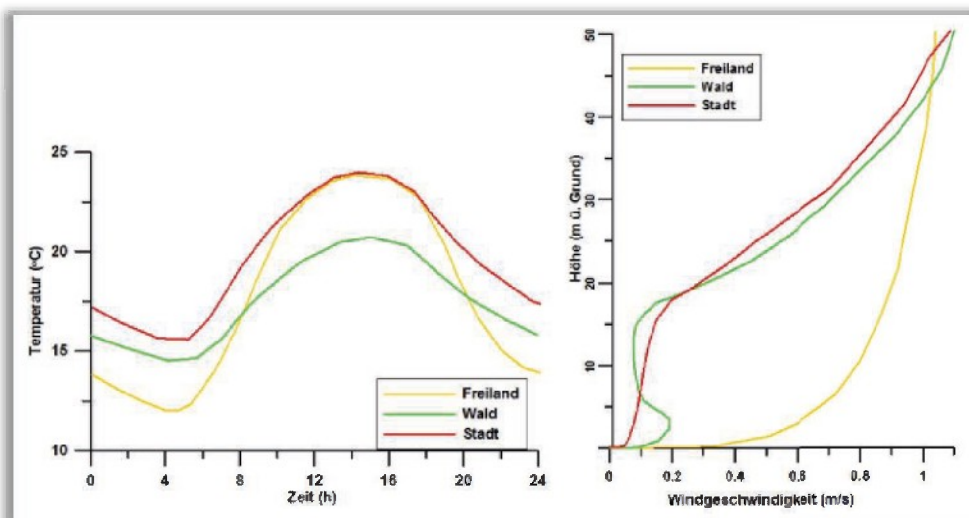


Abb. 8: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

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.

### 3.2 Standardisierung des Parameters Kaltluftvolumenstrom

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.

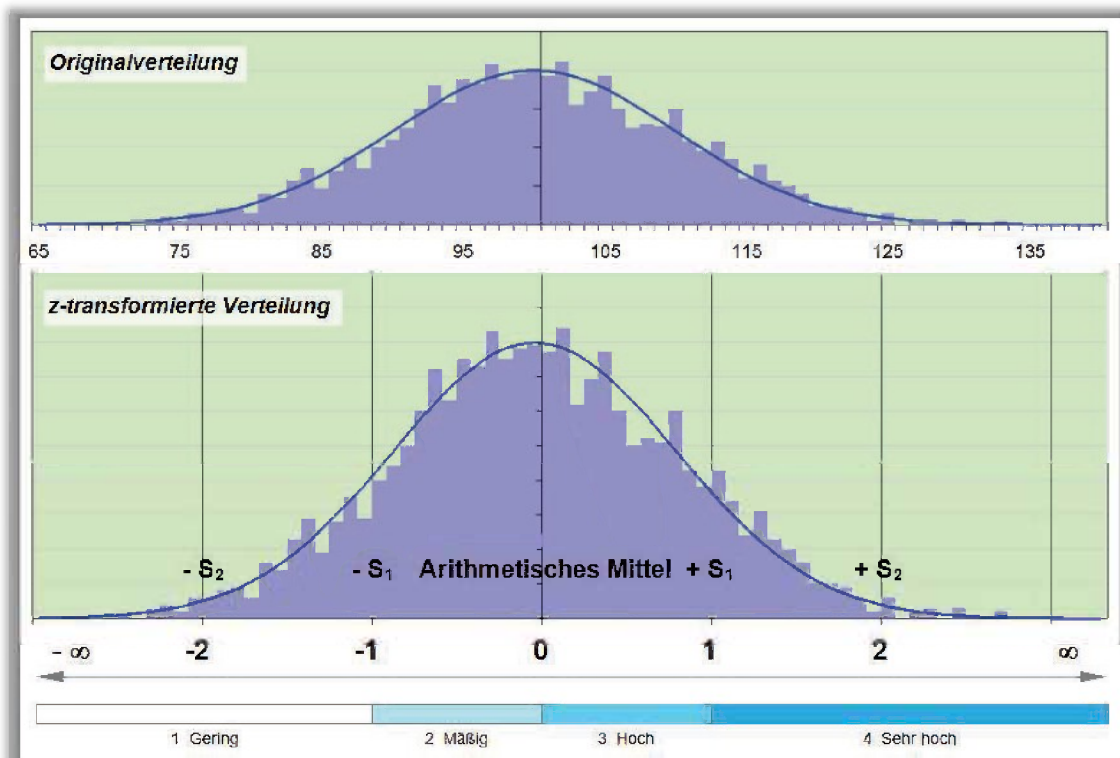


Abb. 9: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

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, werden die Parameter über eine z-Transformation standardisiert<sup>1</sup>. 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

<sup>1</sup> Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt



Abgrenzung durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (s. Abb. 9).

### **3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen**

Um Aussagen über die Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen auch untereinander abgrenzbar sein. Das bedeutet, dass die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und bei den Siedlungsflächen die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren kann. Um diese Heterogenität in der Klimaanalysekarte darstellen zu können, wurde den Blockflächen der verwendeten Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur (Siedlungsflächen) oder Kaltluftvolumenstrom (Grünflächen) zugeordnet. Diese Parameter liegen als rasterbasierte Felder in einem Geographischen Informationssystem als 50 m Raster vor. Umfasst ein Baublock mehrere Rasterzellen eines Parameters, wird aus den Zelleneinzelwerten ein Mittelwert gebildet. Somit steht für jede Blockfläche (bebaute als auch unbebaute Freiflächen) eine Reihe von Klimaparametern bereit. Darauf basierend werden den Teilflächen Bewertungsindices zugewiesen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

#### **3.3.1 Grün- und Freiflächen**

In der Klimaanalysekarte werden die Grünflächen vor allem hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten vegetationsgeprägte Freiflächen wie z.B. Ackerflächen, Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen. Größere Waldflächen produzieren im Kronenbereich große Mengen an Kaltluft. Allerdings sinkt diese in ebener Lage vorwiegend in den Stammraum ab und verbleibt dort (vgl. Kap. 4.1). Erst bei Hangneigungen von mehr als 1° können nennenswerte Kaltluftabflüsse entstehen, bei denen das Kaltluftentstehungspotenzial größerer Wald-/Baumbestände zum Tragen kommt. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kap. 4.4).

Die Einstufung des innerhalb von Grünflächen auftretenden Kaltluftvolumenstrom orientiert sich an dem in der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) beschriebenen Verfahren zur Z-Transformation (Kap. 3.2). Dieses Vorgehen legt allgemein das lokale/regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde und bewertet die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen in einem Untersuchungsraum. Während diese Methode vor allem für die Ermittlung der bioklimatischen Situation (vgl. Kap. 3.3.1) geeignet ist, wird sie in dieser Untersuchung darüber hinaus auch für die Bewertung des Klimaparameters Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Dafür wird ein individueller Flächenmittelwert berechnet, welcher sich aus allen innerhalb einer Grünfläche vorhandenen Rasterzellen ergibt.

Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier Bewertungskategorien (s. Tab. 3), welche durch den Mittelwert sowie die obere und untere S1-Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen  $>0$  bedeuten überdurchschnittliche Werte, woraus sich die



Bewertung in mittel und hoch ergibt. Negative Ausprägungen von <0 bedeuten hingegen ein unterdurchschnittliches Niveau (entsprechend gering und sehr gering). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung eines Klimaparameters und die daraus resultierende Vergleichbarkeit der Variablen untereinander oder mit anderen Untersuchungen. Die qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms zeigt Tabelle 3, wobei für einen klimaökologisch wirksamen Massenstrom der Wertebereich >-1 („mäßig“) angesehen wird (vgl. Tabelle 3). Die Bewertung des Kaltluftvolumenstroms orientiert sich somit an den Kategorien der Z-Transformation, wobei für jede Grünfläche ein mittlerer Z-Wert zugewiesen wurde.

Mittlerer Z-Wert pro Grünfläche	Kaltluftvolumenstrom in m <sup>3</sup> /s	Bewertung
> 1 (obere S <sub>1</sub> -Schranke)	> 940	sehr hoch
0 bis 1	> 200 bis 940	hoch
-1 bis 0	30 bis 200	mäßig
< -1 (untere S <sub>1</sub> -Schranke)	< 30	gering

Tab. 3: Bewertung des Kaltluftvolumenstroms innerhalb von Grünflächen

Die Darstellung der Kaltluftliefergebiete erfolgt in der Klimaanalysekarte (Karte 1.6) als abgestufte Flächenfarbe. Zudem erhalten Grünflächen > 0,5 Hektar mit einem mindestens mittlerem Kaltluftvolumenstrom eine Pfeilsignatur mit der Hauptströmungsrichtung innerhalb einer Fläche.

### 3.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen

Zur Bewertung der bioklimatischen Situation wird die nächtliche Überwärmung in den Nachtstunden (04 Uhr morgens) herangezogen. Da die Klimaanalysekarte die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches abbilden soll, wird hier der nächtliche Wärmeinseleffekt betrachtet. In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charakterisierung der Wettersituation (z.B. Wind, Luftmasseneigenschaften), können mit Hilfe des mesoskaligen Modells FITNAH diese Verteilungen innerhalb von Hamburg detailliert berechnet werden.

#### Bewertung der Siedlungsflächen in der Klimaanalysekarte

Die Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Dem Kaltlufteinwirkungsbereich liegt das flächendeckende Raster der Modellsimulation zugrunde und kennzeichnet das Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer sommerlichen austauscharmen Strahlungswetternacht (Worst-Case-Szenario). Um die Strömung als klimaökologisch relevant einordnen zu können, sollte sie einen Kaltluftvolumenstrom von mehr als 30 m<sup>3</sup>/s erreichen. Bebauung im Einwirkungsbereich einströmender Kaltluft weist häufig günstige bioklimatische Verhältnisse auf. Letztendlich sind für die menschliche Gesundheit die bioklimatischen Bedingungen in der Nacht bedeutender als die Tagesmaxima der Lufttemperatur, da gerade die nächtlichen Erholungsphasen für den Körper besonders wichtig sind.



Der nächtlichen Wärmebelastung, wie sie in der Klimaanalysekarte dargestellt ist, liegt die Werteausprägung in der zweiten Nachthälfte um 4 Uhr zugrunde. Es handelt sich um den bodennahen Temperaturwert für eine typische Sommernacht mit geringem Luftaustausch und ungehinderter langwelliger Ausstrahlung bei einem wolkenlosen Himmel. Dabei wirken lokal auftretende Kaltluftströmungen modifizierend auf die räumliche Ausprägung der Lufttemperatur.

Es wurde, analog zum Kaltluftvolumenstrom, eine statistische Analyse des Lufttemperatur-Ergebnisrasters durchgeführt und den (in der Klimaanalysekarte dargestellten) Blockflächen der Siedlungsräume ein Flächenmittelwert zugewiesen. Über die Abweichung vom Temperaturmittelwert der Modellsimulation im Hamburger Stadtgebiet (16,2°C) werden die Siedlungsflächen in günstige und ungünstige Areale untergliedert. In der Nachtsituation ist dabei die Abweichung von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum ausschlaggebend. Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren fünf qualitative Einstufungen, wobei per Definition der Betrag der Abweichung in Kelvin (K) angegeben wird (vgl. Tab. 4).

Betrag der Abweichung von der mittleren Lufttemperatur um 04:00	Bewertung
< 0 K	Nicht vorhanden
≥ 0°C bis 1K	Schwach
> 1 bis < 2K	Mäßig
> 2 bis 3 K	Hoch
> 3 bis 4 K	Sehr hoch

Tab. 4: Bewertung des nächtlichen Wärmeinseleffekts in Siedlungsflächen



## 4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern Lufttemperatur in 2 m Höhe, 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 („Worst-Case“-Szenario), abgebildet in der Klimaanalysekarte.

Es ist Stand der Technik, dass für die Ableitung einer Klimaanalysekarte lediglich eine meteorologische Situation herangezogen wird. In der vorliegenden Untersuchung wurde hierfür die autochthone hochsommerliche Hochdruckwetterlage ohne übergeordneten Windeinfluss ausgewählt. Sie stellt diejenige Wetterlage dar, in der das stadtklimatische Prozessgeschehen am deutlichsten ausgeprägt ist, und auf dessen Basis sich dementsprechend auch sinnvolle Planungshinweise ableiten lassen. Eine Analyse der Messdaten der Station HH-Fuhlsbüttel für die Jahre 1962 bis 2009 zeigt, dass windschwache Wetterlagen während 11 % der Stunden in den Sommermonaten Juni, Juli und August auftreten. Zudem ist vor dem Hintergrund des zu erwartenden Klimawandels davon auszugehen, dass Häufigkeit und Dauer bioklimatisch belastender Wetterlagen bis zum Ende des Jahrhunderts weiter ansteigen werden. Da für spezifische Fragestellungen (z.B. B-Planverfahren, Wirkungsanalysen von Maßnahmen) zusätzlich die Primärergebnisse der Klimasimulation relevant sein können, sind deren Daten ebenfalls in Kartenform bzw. digital vorhanden.

### 4.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld

**Allgemeines:** Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmaß der Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- und Oberflächeneigenschaften – große Unterschiede aufweisen, so dass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit mehr als 9°C Temperaturabweichung einstellen kann. Besonders auffällig dabei ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume. Die in Städten gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnisse lassen sich auf einige wesentliche Faktoren zurückführen. Hierzu gehören

- die erhöhte Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Boden- und Oberflächeneigenschaften
- die durch die Geometrie der städtischen Baukörper vergrößerte strahlungsabsorbierende Oberfläche
- die herabgesetzte Verdunstung durch die direkte Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation oder die Vorflut
- die über die vermehrte Emission von Gasen und Aerosolen zugunsten eines langwelligen Strahlungsgewinns veränderte Strahlungsbilanz (lokaler Treibhauseffekt)
- die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis mit hoher aerodynamischen Rauigkeit und die damit verbundene Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland





- die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion

Damit ist das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich vor allem abhängig von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung. Doch auch die Luftvolumina über grünbestimmten Flächen weisen untereinander keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate von natürlichen Oberflächen wird insbesondere von ihren thermischen Bodeneigenschaften (u.a. ihrer Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie von eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen (Bewuchs, Laubstreu usw.) bestimmt. Das Relief (Exposition, Geländeneigung) und die Lage im Mosaik der Nutzungen und ihrer dynamischen Luftaustauschprozesse üben einen weiteren Einfluss aus.

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 mit einer Fläche von mehr als 1 ha sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, wobei hier sauerstoffreiche, staubfreie und wenig belastete Luft entsteht. Während tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen, treten nachts, im Vergleich zu nicht mit Gehölz bestandenen Grünflächen, eher milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können daher in begrenztem Maße auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen.

Die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte tagesperiodische Temperaturamplitude über den größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken größere Gewässer auf bebaute Flächen tagsüber klimatisch ausgleichend, während sie nachts die Abkühlung verringern.

#### **Nachtsituation 04 Uhr**

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 und Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die Lufttemperatur zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens wird in Abb. 10 dargestellt. Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 12,0°C und Maximalwerten von bis zu 20,1°C eine Spannweite von etwa 8°C. Die mittlere Temperatur im Hamburger Stadtgebiet liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen - wie sie typischerweise in den Sommermonaten Juli und August auftreten - bei 16,2°C. Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen die Innenstadt sowie größere Gewerbeflächen die höchsten Temperaturen von bis zu 20°C auf, was mit dem hohen Bauvolumen und einer hohen Oberflächenversiegelung einhergeht (Abb. 10).

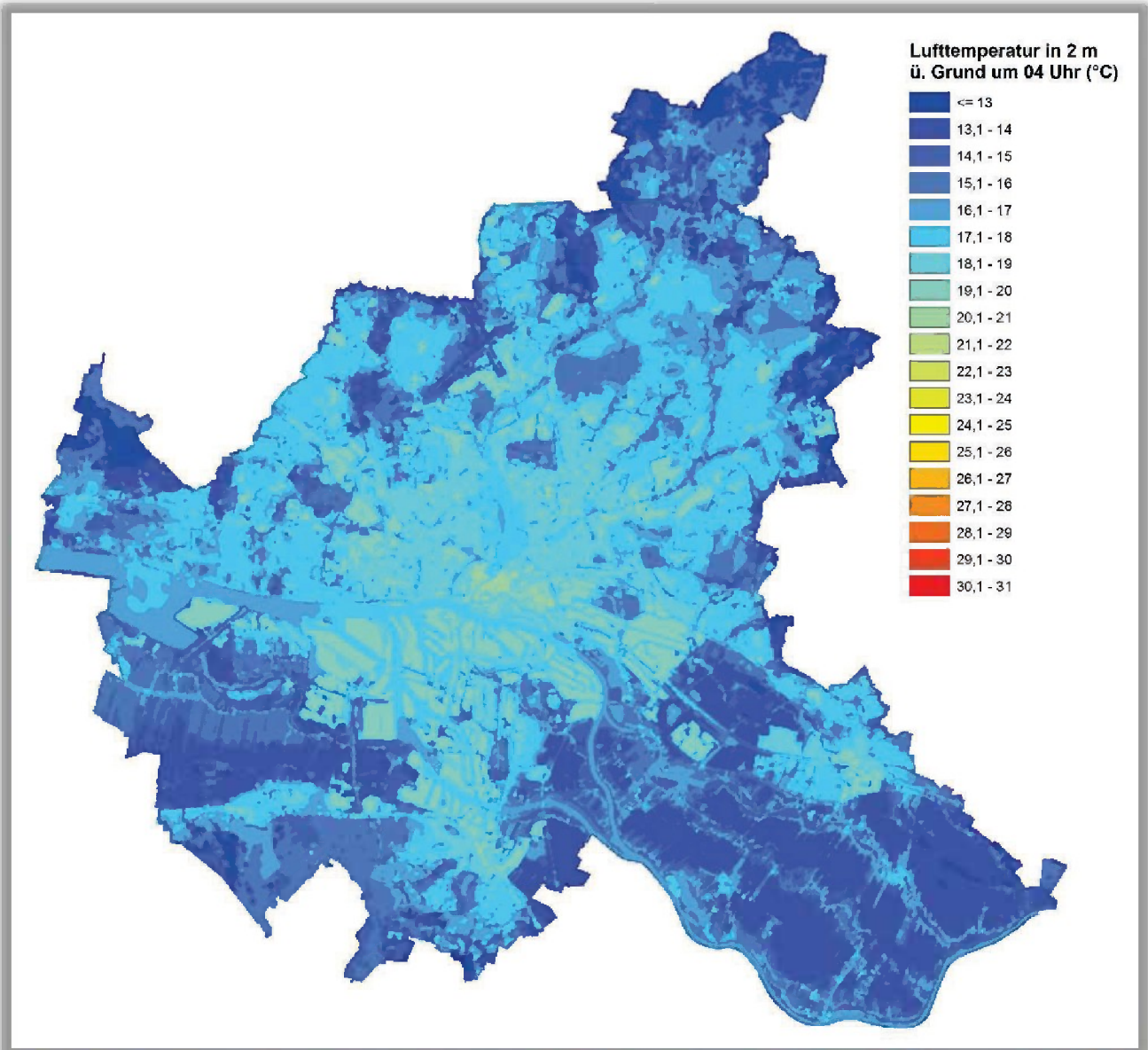


Abb. 10: Lufttemperatur zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage)

Außerhalb der Kernstadt sind große Teile des Siedlungsraumes durch Zeilen- sowie Reihen- und Einzelhausbebauung geprägt, in der mit 17,0° C bis 18,0° C deutlich niedrigere Lufttemperaturen vorliegen. Von den Wohnbauflächen weist die Einzelhausbebauung vor allem an den Siedlungsrandern das geringste Temperaturniveau auf, wobei dort 17,0° C selten überschritten werden. Darüber hinaus zeigen die Verkehrsflächen, abhängig vom Versiegelungsgrad und der umgebenden Bebauung, meist Temperaturen zwischen 18,0° C und 19,0° C. Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als 15°C vor allem über den Freiflächen außerhalb der Kernstadt bzw. am Stadtrand anzutreffen, was in der starken langwelligen Ausstrahlung nach Sonnenuntergang begründet liegt. Waldareale besitzen dagegen ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau von 15,5° C bis 16,0° C. Hier dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur. Verglichen mit den weitläufigen Freiflächen des Umlandes weisen die innerstädtischen Grünflächen, abhängig von ihrer Größe und Form, höhere Werte auf, welche meist zwischen 16,0° C und 18,0° C



betragen. In den übrigen, kleineren Grünflächen sinkt die Temperatur nur noch selten auf weniger als 17,0 °C ab. Hier wird deutlich, dass diese Flächen in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind und daher die vergleichsweise geringen Temperaturen des Umlandes nicht mehr erreicht werden. Wenngleich diese weniger stark abkühlen, kann von ihnen trotzdem eine klimatische Entlastung für die angrenzende Bebauung ausgehen. Je nach Baumbestand und damit einhergehender Verschattung können sie an Tagen mit starker solarer Einstrahlung günstige Aufenthaltsqualitäten aufweisen.

### Tagsituation 14 Uhr

Die bodennahen Lufttemperaturen zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt Abb. 11 für einen windschwachen Sommertag, wobei sich die verschiedenen Stadtstrukturen deutlich abbilden. Die auftretenden Temperaturen umfassen eine Wertespanne von weniger als 23° C in größeren Waldbeständen und mehr als 30° C treten vor allem innerhalb der stark bebauten und versiegelten Gewerbeflächen sowie der Innenstadt bzw. Stadtteilzentren auf. Die mittlere Lufttemperatur im Hamburger Stadtgebiet beträgt 28,8°C.

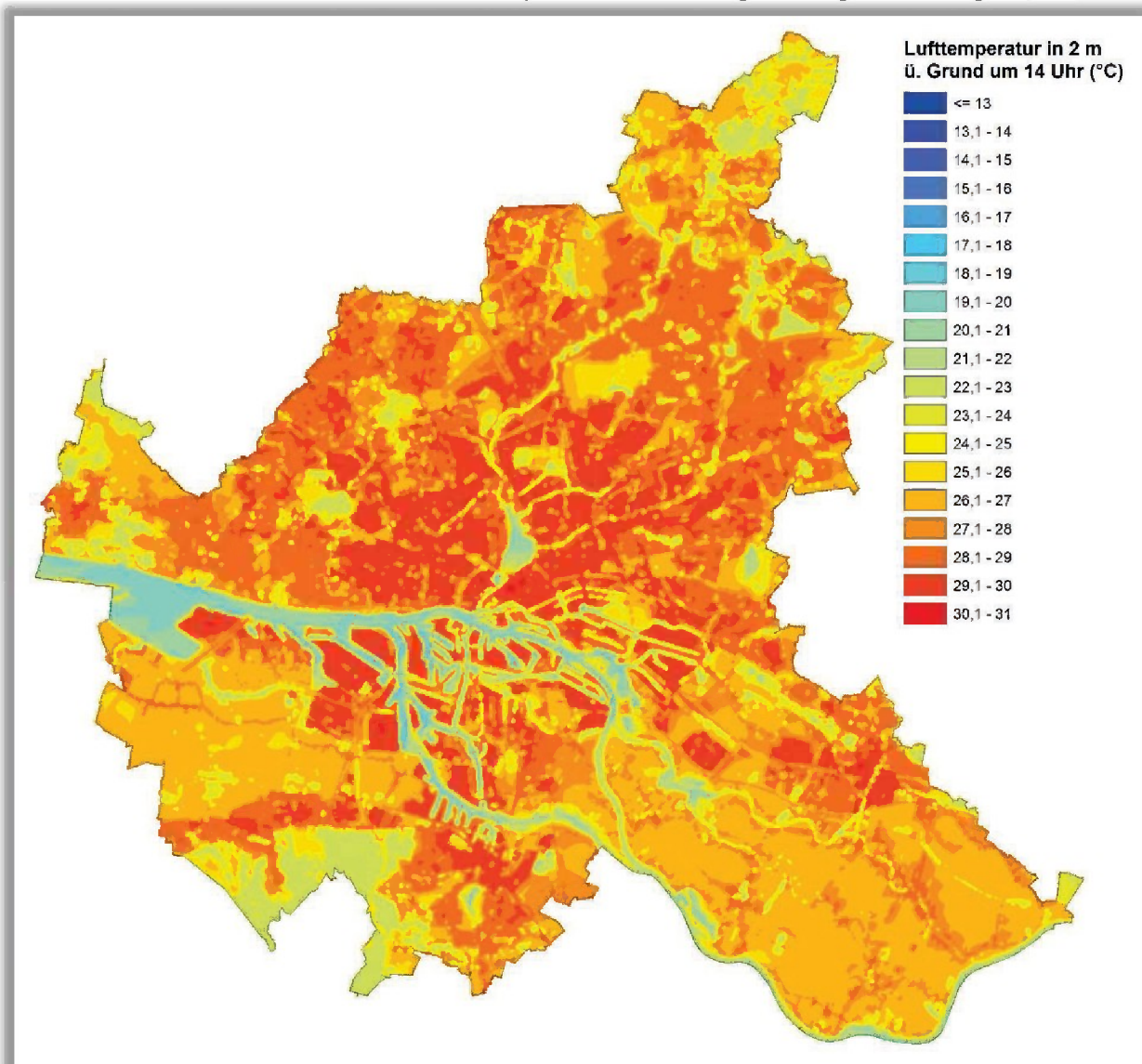


Abb. 11: Lufttemperatur zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage)



### 4.3 Autochthones Windfeld und Kaltluftvolumenstrom

#### Allgemeines:

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 (Abb. 12). 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.

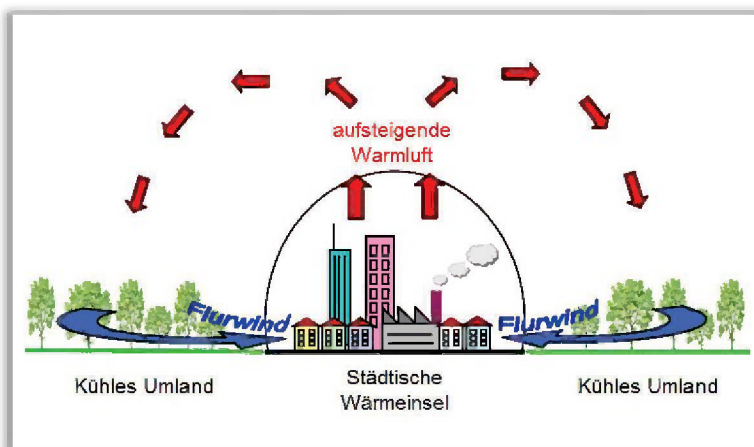


Abb. 12: Prinzipskizze Flurwind

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 Tiefdruckgebiet über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 13).

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  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Mosimann et al. 1999).

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 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 Kaltluftthaushaltes, 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 wird in der Ergebniskarte 1.3 in zwei Ebenen 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 (entspricht 4 Rasterzellen) aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen 50 m Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von  $\geq 0,1$  m/s und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von mehr als 1,0 m/s über geneigtem Gelände im Umfeld der Harburger Berge (Dunkelblau). Große Teile der durch Blockrandbebauung geprägten Wohngebiete werden hingegen nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die zunehmende Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Auf gesamtstädtischer Ebene zeigt sich die wichtige Rolle größerer Grünzüge, da sie die Kaltluft als Leitbahnen tief in die Bebauung heranführen können und häufig auch eine eigene lokale Kaltluftentstehung aufweisen. Zudem sind sie an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung und entsprechender Wärmebelastung als bioklimatisch günstige Aufenthaltsbereiche anzusehen, was auf die Verschattung und das durch Verdunstungskühle insgesamt niedrige Temperaturniveau zurückzuführen ist. Die rasterbasierte Windgeschwindigkeit im Hamburger Stadtgebiet zeigt Abb. 13.

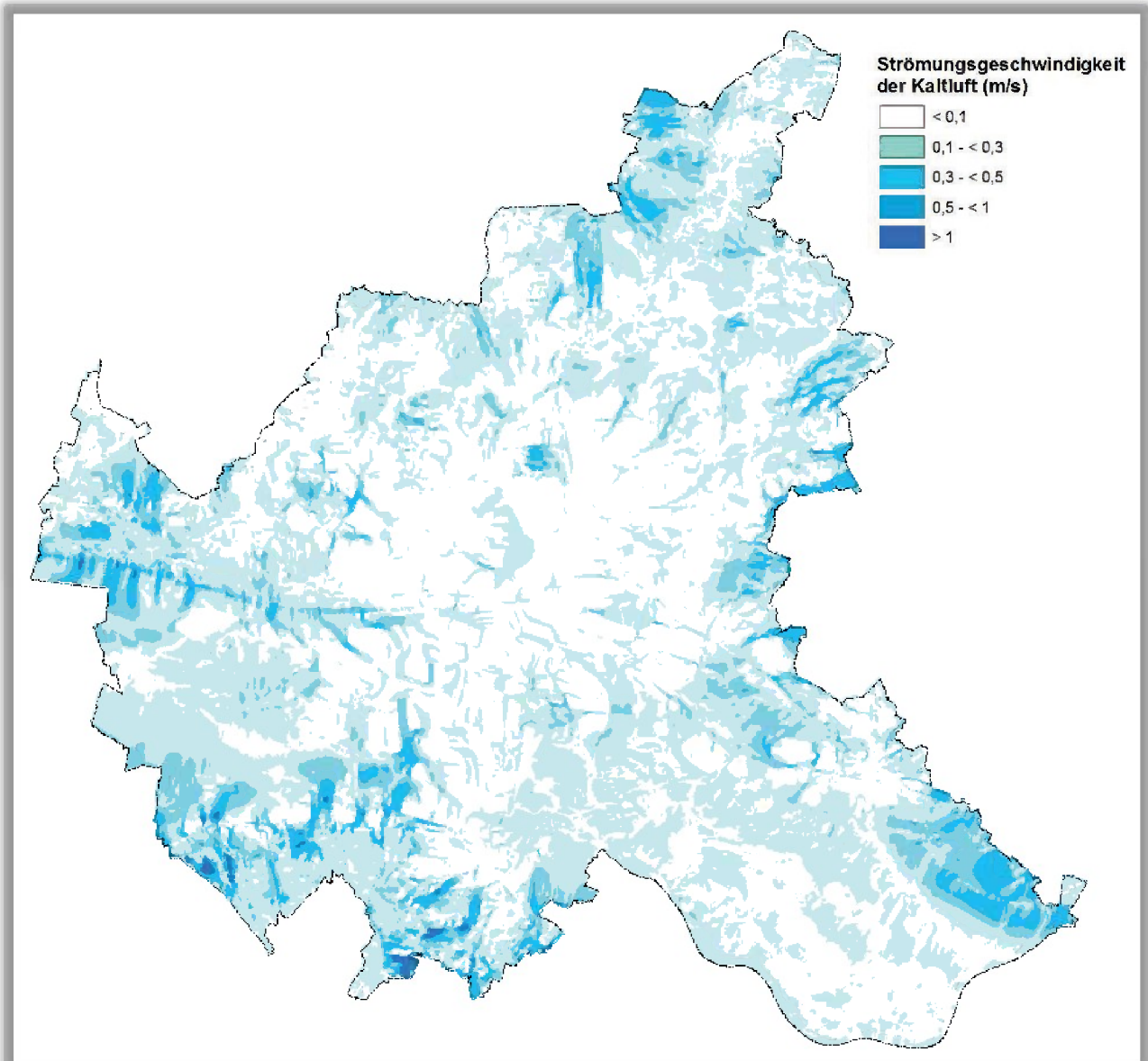
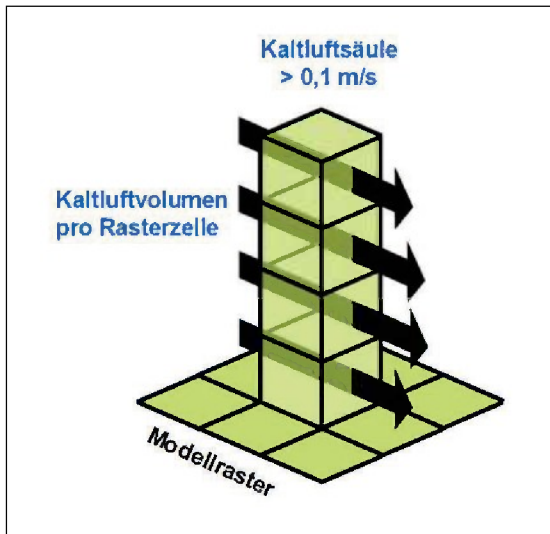


Abb. 13: Strömungsgeschwindigkeit des nächtlichen Windfeldes zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund; austauscharme Wetterlage)

#### 4.4 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld eingehender 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 04 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

Abb. 14: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende

Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-Dichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 50 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>2</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 14). 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. Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich am auftretenden Wertespektrum innerhalb des gesamten Untersuchungsgebietes (vgl. Kap. 3.2; S. 17). Die qualitative Bewertung dieser meteorologischen Größe zeigt Tab. 7.

Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in $m^3/s$
Sehr hoch	> 940
Hoch	> 200 bis 940
Mittel	30 bis 200
Gering	< 30

Tab. 7: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mehr als  $30 m^3/s$  angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen Volumenstrom aufweisen. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abbildung 15 zeigt den Kaltluftstrom für das Hamburger Stadtgebiet in einer qualitativen Abstufung.

<sup>2</sup> Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als  $0,1 m/s$  wird



Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte im Bereich der Harburger Berge im Zusammenhang mit reliefbedingten Kaltluftabflüssen auf. Zudem zeichnen sich deutlich die größeren Grünzüge mit einem klimatisch wirksamen Kaltluftstrom ab.

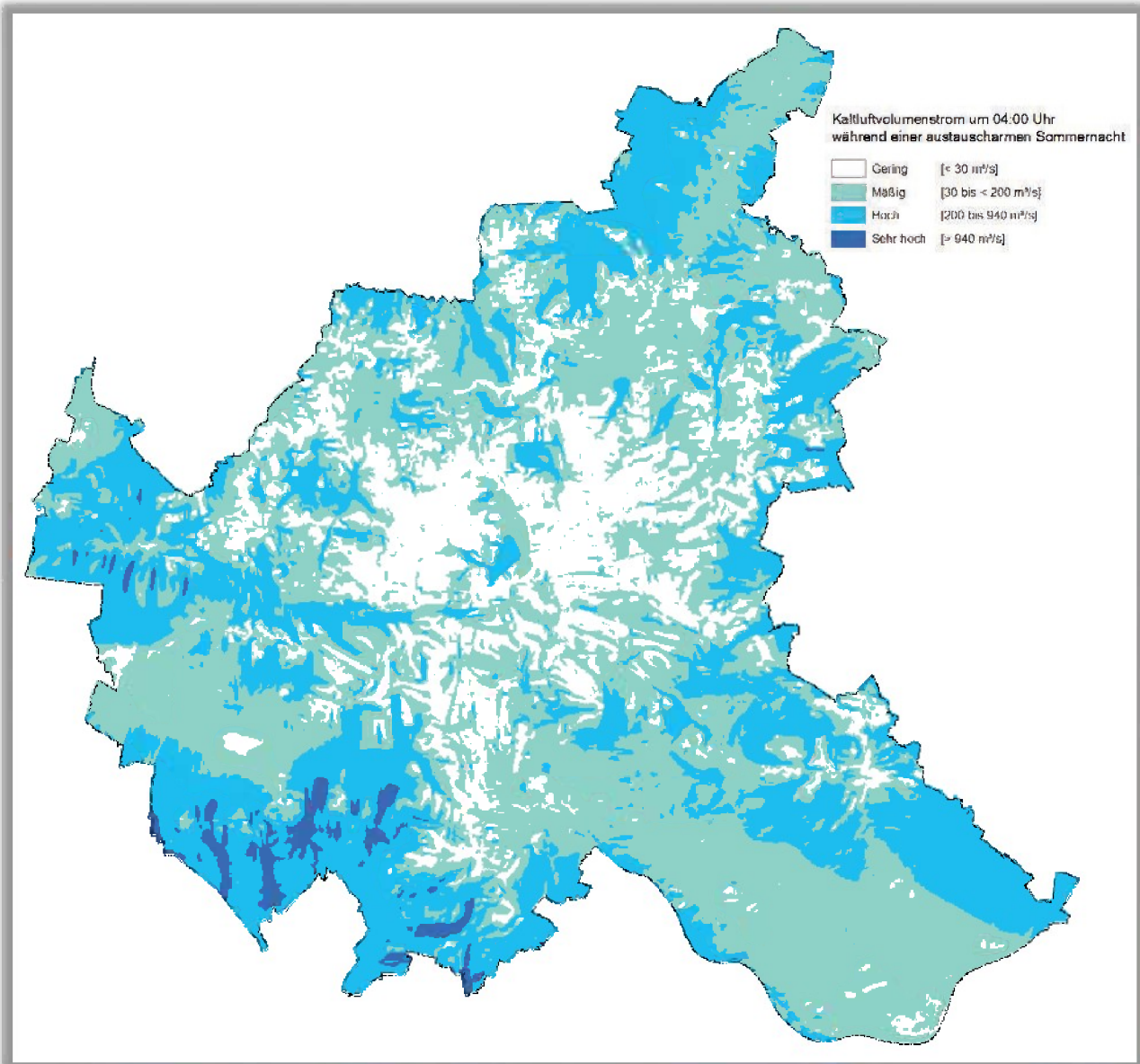


Abb. 15: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund; austauscharme Wetterlage)

Die Mindestgröße zur Ausbildung einer Kaltluftströmung lässt sich auf etwa 1 ha beziffern (SCHERER 2007). Abgesehen von der Flächengröße wird dies aber auch durch die grünplanerische Ausgestaltung sowie die Randbebauung mitbestimmt. Sofern ein bedeutsamer Luftaustausch durch Flurwinde stattfinden kann, sollte dieses (eigenbürtige) Luftaustauschsystem Grünfläche - angrenzende Bebauung und die damit verbundene klimaökologische Wohlfahrtswirkung aufrechterhalten werden.

#### 4.4 Nächtlicher Wärmeinseleffekt

Der nächtliche Wärmeinseleffekt korrespondiert eng mit den jeweiligen Stadtstrukturen, wobei hier die Abweichung vom Temperaturmittelwert im Hamburger Stadtgebiet zugrunde gelegt wurde. Unter den gegebenen windschwachen Wetterbedingungen beträgt die mittlere Temperatur in der Modellsimulation



16,2°C. Generell weisen die stark überbauten und versiegelten Stadtbereich die intensivste nächtliche Überwärmung auf (Abb. 16). So liegen die Temperaturen um 04 Uhr morgens in den ausgedehnten Gewerbeflächen und der Stadtmitte bis zu 4 °C über dem Mittel. In den durchgrüneten Siedlungsflächen mit Einzel- und Reihenhausbauung ist die Überwärmung mit weniger als 1°C über dem Mittel eher gering ausgeprägt.

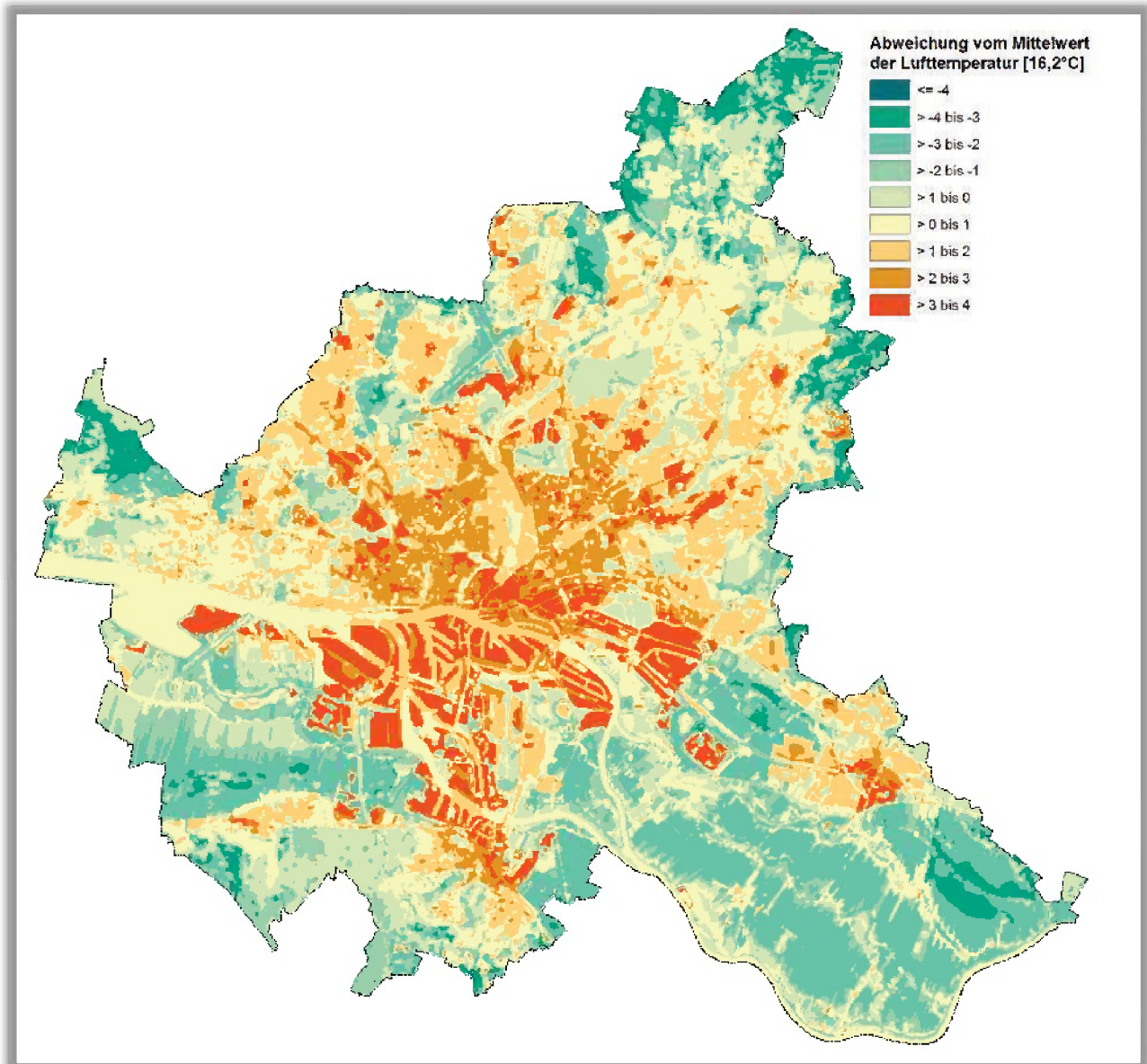


Abb. 16: Nächtlicher Wärmeinseleffekt zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund; austauscharme Wetterlage)

Den überwärmten Siedlungsflächen stehen die Grünräume gegenüber, welche in den Nachtstunden - abhängig von Größe und Vegetationsstruktur - eine Abkühlung aufweisen. Diese ist über den landwirtschaftlich genutzten Freiflächen am Stadtrand mit mehr als 4° C unterhalb des Mittelwertes am intensivsten. Waldflächen weisen aufgrund des Kronendaches mit -0,5 °C bis -1,0° C eine weniger starke nächtliche Abkühlung im bodennahen Bereich auf, da dieses die nächtliche Wärmeausstrahlung der Bodenoberfläche vermindert. Darüber hinaus zeichnen sich die kleineren Grünflächen innerhalb der Kernstadt ab, wenngleich deren Abweichung von Temperaturmittel in einer Größenordnung von etwa -0,2° C liegt.





## 5 Klimaökologische Funktionen während einer austauscharmen Sommerwetterlage

Im Folgenden wird auf die Klimaanalysekarte (Karte 1.6) als Hauptergebnis dieser Untersuchung eingegangen. Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Stadtgebiet Hamburg zugrunde. Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie bodennahe Lufttemperatur (in °C), Kaltluftvolumenstrom (in m<sup>3</sup>/s) und autochthones Strömungsfeld (in m/s) modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch belastete Siedlungsräume (**Wirkungsraum**) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (**Ausgleichsräume**). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute **Grünräume** beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Siedlungs- und Grünräumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des **Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges** im Stadtgebiet Hamburg. Die Klimaanalysekarte bildet dabei den planungsrelevanten Ist-Zustand der Klimasituation ab. Die abgegrenzten klimatischen Funktionsräume sollen dazu beitragen

- die Grün- und Freiflächen entsprechend ihres Kaltluftliefervermögens zu qualifizieren,
- die Wirkungsräume hinsichtlich ihrer bioklimatischen Belastung zu charakterisieren
- sowie die regional und lokal bedeutsamen Luftaustauschbeziehungen zu lokalisieren und in ihrer räumlichen Ausprägung und ihrer bioklimatischen Bedeutung zu bewerten

Die Klimaanalysekarte beinhaltet die klimaökologisch wichtigen Elemente und basiert auf der Analyse des klimatischen Ist-Zustandes in Hamburg. Dabei konzentriert sich die Darstellung auf Elemente und Bereiche, die sich über landschaftsplanerische Maßnahmen positiv beeinflussen lassen (Maßnahmen zum Schutz, zur Sicherung und zur Entwicklung der Schutzgüter Klima und Luft). Somit steht ein Instrument zur Beurteilung von klimatischen Beeinträchtigungen bereit, die bei einer Nutzungsänderung auftreten können. Darüber hinaus stellt sie die Grundlage für ein räumliches Handlungskonzept für den Bereich Stadtklima in der Landschaftsplanung dar.

### Grün- und Freiflächen

Vegetationsbestandene Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion stellen klimaökologische Ausgleichsräume dar und können über Flurwinde die Wärmebelastung in den Siedlungsflächen verringern. Eine hohe langwellige nächtliche Ausstrahlung während austauscharmer Hochdruckwetterlagen führt zu einer starken Abkühlung der bodennahen Luftschicht. Dabei werden vor allem die ausgedehnten Freiflächen als Zonen einem hohen bis sehr hohen Kaltluftstrom sichtbar. Dies ist auf die intensive Abkühlung zurück zu führen, die mit entsprechenden Kaltluftvolumina einhergehen. Darüber hinaus sind die kleineren Grünflächen, zusammenhängende Hausgärten und nicht überbauten Ruderalflächen mit niedriger Größe und geringen Kaltluftvolumenstrom zu nennen. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkungsbereich aus, da sie in eine insgesamt wärmere Bebauung eingebettet sind. Durch die isolierte Lage in der Bebauung weisen sie zudem keine Anbindung an



vorhandene Leitbahnen auf. Innerhalb von Waldflächen handelt es sich um Bereiche mit unterdurchschnittlicher Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft im Stammraum, was mit entsprechend geringen Werten einhergeht. Innerhalb von Belastungsbereichen können aber auch diese Flächen eine bedeutsame Funktion als klimaökologische Komfortinseln erfüllen, sofern sie ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten wie beispielsweise beschattete und besonnte Bereiche oder sogar kühlenden Wasserflächen aufweisen (Mikroklimavielfalt). Durch solche Eigenschaften sind diese im Allgemeinen frei zugänglichen Flächen insbesondere an Sommertagen mit einer hohen Einstrahlungsintensität und damit einher gehenden Wärmebelastung im Stadtgebiet – insbesondere im Innenstadtbereich - wichtig. Somit führen unterschiedliche Struktureigenschaften der Grünflächen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Kaltluftdynamik. Die einzelnen (Teil-) Areale besitzen in ihrer Summenwirkung eine Entlastungsfunktion für benachbarte und weiter entfernte Siedlungsräume. In der Klimaanalysekarte wird die mittlere Strömungsrichtung der Kaltluft für Grünflächen mit mehr als 0,5 ha über eine Pfeilsignatur dargestellt (vgl. Abb. 16; S. 33).

### **Siedlungsräume**

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. 3.3.2 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 und häufig durch eine ausreichende Durchlüftung mit einem Kaltluftvolumenstrom von mehr als 30 m<sup>3</sup>/s gekennzeichnet. Die Einwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch eine Schraffur dargestellt. Am Ende einer warmen austauscharmen Sommernacht werden bis 04 Uhr ca. 59 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich 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 den großen 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. Während eine durchgrünte Einzelhausbebauung mit großen Gärten die bodennahe Kaltluftströmung nur wenig abbremst, geht von einer Block- und Blockrandbebauung eine sehr starke Hinderniswirkung aus. In den peripheren, vergleichsweise gering überbauten Ortsteilen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum.





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 Räumen 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 Gewerbe- und Industrieareale mit einer Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie eine Zentrumsbebauung aufweisen.

Abbildung 17 zeigt die Klimaanalysekarte, wobei die bioklimatische Situation der Siedlungsräume mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Die stärkste Überwärmung ist in der Stadtmitte und den Gewerbeflächen anzutreffen (Dunkelrot), während die Bebauung zum Stadtrand hin eine deutlich günstigere Situation zeigt. Wesentliche Teile der durch Blockrandbebauung geprägten Wohngebiete weisen eine mäßige Überwärmung auf (Dunkelorange). Der Einwirkungsbereich der Kaltluft ist mit einer Schraffur dargestellt.

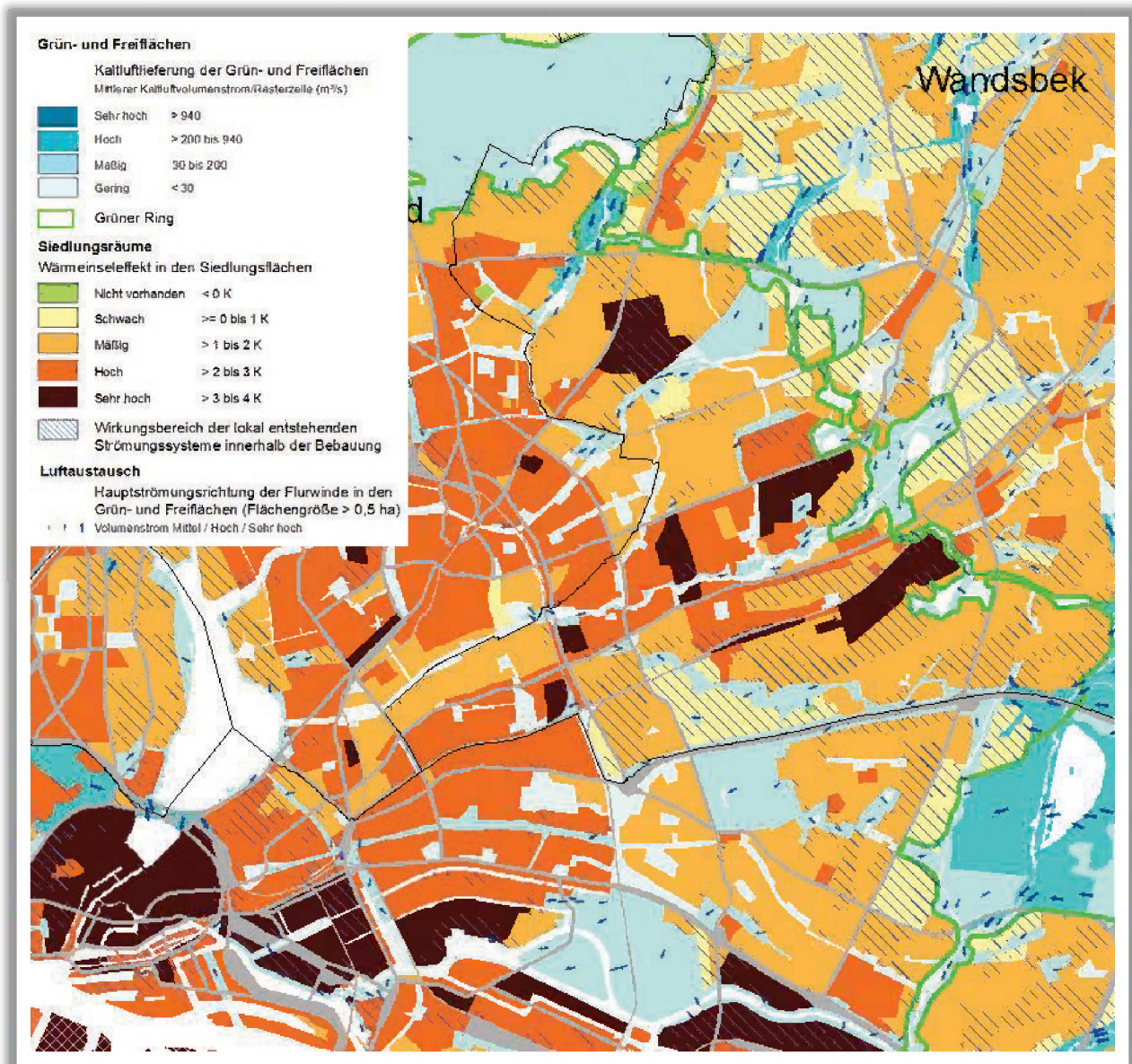


Abb. 17: Klimafunktionen im Bereich Hamburg-Nord/Wandsbek



## **7 Hinweise zur Verringerung der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen sowie zur Aufenthaltsqualität von Grünflächen**

### *Luftaustausch*

Eine klimaoptimierte Gestaltung zukünftiger Baufelder sollte vorhandene Kalt-/Frischluchtströmungen berücksichtigen, um deren klimatische Wohlfahrtswirkung sowohl in einem neuen Quartier als auch im Bestand zu sichern. Dazu sollten Gebäude parallel zur Fließrichtung der Kaltluft angeordnet werden sowie ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen ihnen erhalten bleiben. Ziel ist, den Bebauungsrand durchlässig zu gestalten und von den angrenzenden Grünflächen auch weiterhin nächtliche Kaltluft in die Bebauung eindringen zu lassen.

### *Verringerung der Wärmebelastung im Siedlungsraum*

Während am Tage die direkte, kurzweilige Strahlung der Sonne wirksam ist, geben nachts Bauwerke und versiegelte Oberflächen die tagsüber gespeicherte Energie als langwellige Wärmestrahlung wieder ab. Durch die Verringerung des Wärmeinputs am Tage mit Hilfe bspw. von Fassadenbegrünung oder Straßenbäumen wird gleichzeitig weniger Strahlungsenergie in der Baumasse gespeichert und damit in der Nacht auch weniger Wärme an die Luft abgegeben. Neben einer hohen Grünausstattung lässt sich zudem durch die Verwendung von hellen Baumaterialien die Reflexion des Sonnenlichtes (Albedo) erhöhen, so dass ebenerdig versiegelte Flächen oder auch Fassaden stärker zurückstrahlen. Dadurch bleiben sie kühler und nehmen damit insgesamt weniger Wärmeenergie auf.

### *Bedeutung von Dach- und Fassadenbegrünung*

Zu den weiteren effektiven Maßnahmen, die Erwärmung der Gebäude am Tage abzuschwächen, zählen Dach- und Fassadenbegrünung. Letztere wirkt zweifach positiv auf einen Gebäudebestand ein, da einerseits durch die Schattenspende die Wärmeeinstrahlung am Tage reduziert wird und andererseits über die Verdunstungskälte des Wassers Wärme abgeführt wird. Eine Fassadenbegrünung ist insbesondere an West- und Südfassaden wirksam, da hier die stärkste Einstrahlung stattfindet. Darüber hinaus mindert eine Begrünung zu einem gewissen Grad die Schallreflexion und damit die Lärmbelastung und die Ausbreitung von Stäuben und Luftschadstoffen. Die Möglichkeiten bei der Realisierung einer Fassadenbegrünung werden allerdings entscheidend von der baulichen Ausgangssituation mitbestimmt.

Bei einer Dachbegrünung wirkt die Vegetation zusammen mit dem Substrat isolierend und verringert damit das Aufheizen des darunter liegenden Wohnraums. Zudem senkt die Dachbegrünung die Oberflächentemperatur des Daches aufgrund der Wasserverdunstung ab und verringert die Temperatur in der oberflächennahen Luftschicht. Allerdings kommt es bei einer hohen Traufhöhe von Gebäuden zu einer vertikalen Entkopplung der positiven Effekte. Nur relativ niedrige Gebäude (< 5 m) mit Dachbegrünung können zu einem im bodennahen Bereich positiven Abkühleffekt beitragen. Gründächer auf 4-5 geschossigen Gebäuden zeigen in der untersten Schicht der Stadtatmosphäre keinen nennenswerten positiven Temperatureffekt in dem Aufenthaltsbereich des Menschen in der Höhe von ca. 2 m. Voraussetzung für die Kühlwirkung ist allerdings immer ein ausreichendes Wasserangebot für die Vegetation. Sollte bei längeren Hitzeperioden die Vegetation austrocknen, steigen die Temperaturen wieder auf das Niveau eines normalen Daches an und können sogar darüber hinausgehen. Der Kühlungseffekt für die Innenräume bleibt dabei aber erhalten. Im Winter isoliert ein Gründach zusätzlich und kann zur Senkung des Heizbedarfes beitragen. Ein weiterer Vorteil von Dachbegrünung ist im



Retentions- und Verdunstungsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation insgesamt und vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird.

### *Grünflächen und Aufenthaltsbereiche im Freien*

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 und somit das Gehen/Radfahren im Schatten ermöglicht. Dieser Aspekt hat vor allem für die strukturelle Verbesserung siedlungsnaher Grünfläche an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung Relevanz.

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.



Abb. 18: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen

Innerstädtische Grün- und Freiflächen sollten möglichst vielfältige Mikroklimare bereitstellen, wobei als Leitbild der erweiterte „Savannentyp“ dienen kann (KUTTLER 2013). Er besteht zu einem großen Anteil aus gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z.B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind (Abb. 18). Ziel sollte sein, möglichst vielgestaltige „Klimaoasen“ zu schaffen, welche ein abwechslungsreiches Angebot für die unterschiedliche 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. Weitergehende stadt- und grünplanerische Hinweise geben u.a. der Stadtentwicklungsplan Klima der Senatsverwaltung Berlin (2016) sowie das Handbuch Stadtklima (LANUV 2011).



## 8 Literatur

- 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.
- 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. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2011): Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Internet: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/stadtklima/> (Zugriff am 30.11.2017)
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- NATIONAL GEOSPATIAL INTELLIGENCE AGENCY (2004): Digital Terrain Elevation Data.
- SCHERER, D. (2007): Viele kleine Parks verbessern Stadtklima. Mit Stadtplanung Klima optimieren. In: TASPO Report. Die Grüne Stadt. Oktober 2007
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2016): Stadtentwicklungsplan Klima KONKRET - Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt. Internet: [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/download/klima/step\\_klima\\_konkret.pdf](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtentwicklungsplanung/download/klima/step_klima_konkret.pdf) (Zugriff am 30.11.2017).
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (2008): Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1997): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf.



## 7 Glossar

**Ausgleichsleistung:** Durch lokalen → Luftaustausch bzw. Lufttransport zwischen → Ausgleichs- und → Wirkungsraum wird eine positive Beeinflussung der bioklimatischen bzw. lufthygienischen Verhältnisse erzielt.

**Ausgleichsraum:** Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen Wirkungsraum angrenzt oder mit diesem über wenig raue Strukturen (→ Leitbahnen) 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:** → Strahlungswetterlage

**Autochthone Wetterlage:** → Strahlungswetterlage

**Autochthones Windfeld:** Kaltluftabflüsse und Flurwinde, welche sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → Strahlungswetterlage 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 Menschen.

**Eindringtiefe:** Reichweite einer Kalt-/Frischluftrömung in den → Wirkungsraum hinein, ausgehend vom Bebauungsrand.

**Flurwind:** Thermisch bedingte schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Er strömt vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in das Zentrum der Überwärmung (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum) ein.

**Immissionsökologie:** Analysiert die Wechselwirkungen zwischen Luftbelastungen und „landschaftsbürtigen“ bodennahen atmosphärischen Prozessen (→ Klimaökologie) sowie ihre Steuerung durch allgemeine landschaftliche Strukturgrößen (Relief, Bebauung...). Zusätzlich werden die Auswirkungen der so modifizierten Immissionsfelder auf den Naturhaushalt untersucht.

**Kaltluftabfluss:** An wenig rauen Hängen und Tälern mit genügendem Gefälle (theoretisch ab etwa 0,5°) setzt sich die Kaltluft aufgrund der Schwerkraft, dem Gefälle folgend, in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

**Kaltluftvolumenstrom:** 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<sup>3</sup>, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. 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 Volumenstrom-*dichte* aufzufassen. Dies kann man so veranschaulichen, indem man sich ein quer zur





Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>3</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom.

**Klimafunktionen:** Prozesse und Wirkungen in der Landschaft, die das örtliche Klima mitbestimmen und Belastungen von Organismen durch besondere Klimabedingungen erhöhen oder abbauen.

**Klimaökologie:** Analysiert den Einfluss von Klimaelementen und des Klimas auf das Landschaftsökosystem und seinen Haushalt. Untersucht wird weiterhin die Steuerung der bedeutsamen, bodennahen atmosphärischen Prozesse durch die allgemeinen landschaftlichen Strukturgrößen (Relief, Überbauung...).

**Komfortraum:** Vielfältig strukturierte, bewachsene Freiflächen in Nachbarschaft zum Wirkungsraum mit günstigen bioklimatischen und/oder lufthygienischen Bedingungen. Ihre wichtigsten Eigenschaften sind Immissionsarmut und Klimavielfalt, d.h. es besteht ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten.

**Leitbahnen:** Linear ausgerichtet, wenig raue Freiflächen, die den lokalen Luftaustausch fördern, insbesondere den Transport von Kalt-/Frischlufte aus dem Ausgleichsraum in den Wirkungsraum. Die Leitbahneigenschaften bestimmen, in welchem Umfang eine Ausgleichsleistung erbracht wird.

**Luftaustausch:** Transport von Luftmassen mit bestimmten Eigenschaften durch turbulente Diffusion. Es werden austauschschwache Situationen mit Windgeschwindigkeiten  $\leq 1,5$  m/s von austauschstarken mit Windgeschwindigkeiten  $\geq 5,5$  m/s unterschieden.

**Z-Transformation:** In der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) beschriebenes Verfahren zur Z-Transformation. Dieses Vorgehen legt allgemein das lokale/regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde und bewertet die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen in einem Untersuchungsraum.

**Rauigkeit:** Gibt die durch Bebauungs- und/oder Vegetationsstrukturen hervorgerufene Veränderungen des Windfeldes wieder. Als Maß der Rauigkeit fungiert der  $z_0$ -Wert, der in Meter angegeben wird.

**Reichweite:** → Eindringtiefe

**Strahlungswetterlage:** Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird bei dieser Wetterlage vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt. Voraussetzung für ihre Ausbildung sind eine geringe Bewölkung von weniger als 3/8 und eine mittlere Geschwindigkeit des Windes von unter 1,5 m/s.

**Strömungsfeld:** Für die Analysezeitpunkte 22 Uhr abends bzw. 04 Uhr morgens simulierte flächendeckende Strömungsfeld der Kaltluftabflüsse und Flurwinde während einer windschwachen → Strahlungswetterlage.

**Ventilationsbahn:** Leitbahn, die während austauschstärkerer Wetterbedingungen den Gradientwind aufnimmt und zur Be- und Entlüftung des Wirkungsraumes beiträgt.

**Wärmebelastung:** Durch Behinderung der Wärmeabgabe des Körpers hervorgerufenen Unbehaglichkeitsempfinden. Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, strahlungsreichen Hochdruckwetterlagen mit hoher Temperatur, hoher Feuchte und geringer Luftbewegung auf (Schwüle).

---

<sup>3</sup> Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als 0,1 m·s<sup>-1</sup> wird



**Wärmeinsel:** Derjenige städtische Lebensraum, der gegenüber der Umgebung vor allem abends und nachts eine höhere Lufttemperatur aufweist. Es bilden sich i.d.R. mehrkernige Wärmeinseln in einer Stadt aus. Die Jahresmitteltemperaturen sind in diesen Räumen um 0,5 bis 1,5 Kelvin gegenüber dem Umland erhöht.

**Wirkungsraum:** Bebauter (oder zur Bebauung vorgesehener), bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteter Raum (Belastungsraum), der an einen oder mehrere Ausgleichsräume angrenzt oder über wenig raue Strukturen angebunden ist. Durch lokale Luftaustauschprozesse erfolgt eine Zufuhr von Kalt-/Frischluft aus dem → Ausgleichsraum, die zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen beiträgt.