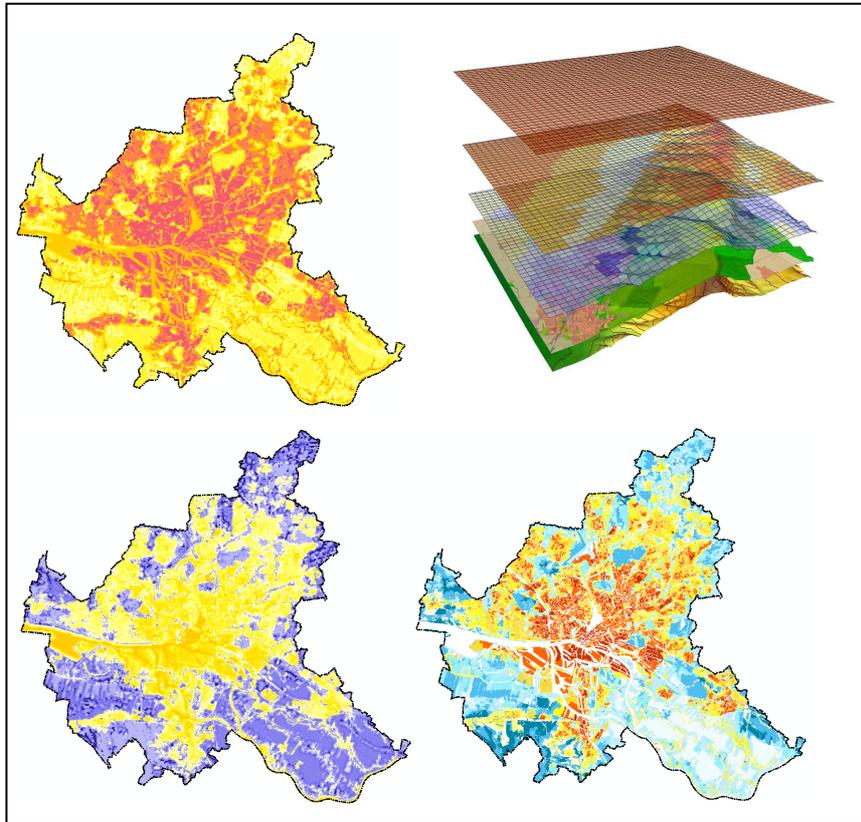


Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg

Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050



Auftraggeber:



Freie und Hansestadt Hamburg

Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
Amt für Landes- und Landschaftsplanung
Amt für Landes- und Landschaftsplanung/LP2
Alter Steinweg 4
20259 Hamburg

Auftragnehmer:



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfaßstraße 5a
30161 Hannover
Tel. (0511) 3887200
FAX (0511) 3887201
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

Auftrag: Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050

Standort: Freie und Hansestadt Hamburg
Bundesland: Hamburg
Deutschland

Auftraggeber: Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
Amt für Landes- und Landschaftsplanung
Abteilung Landschafts- und Grünplanung LP 22
Alter Steinweg 4
20259 Hamburg

Projektnummer: 2_09_014_HH_Klima

Berichtsnummer: 2_10_011_HH_Klima_Rev04

Version: 5

Datum: 10.Mai 2012

Erstellt von: 
Dipl.-Geogr. Dirk Funk

Unter Mitarbeit von: 
Prof. Dr. Günter Groß

Geprüft von: 
Dipl.-Geogr. Peter Trute

GEO-NET
Umweltconsulting GmbH

Geschäftsführer:
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey
Dipl.-Geogr. Peter Trute
Große Pfahlstraße 5a
D-30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
info@geo-net.de
www.geo-net.de
Amtsgericht Hannover
HRB 61218
Hannoversche Volksbank eG
KTO. 532 248 000
BLZ 251 900 01



Die Erstellung des Gutachtens erfolgte nach Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Das Gutachten bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Die Veröffentlichung bzw. Vervielfältigung und Weitergabe des Gutachtens bzw. von Auszügen oder Ergebnissen an Dritte bedarf des schriftlichen Einverständnisses von GEO-NET Umweltconsulting GmbH.

Vorwort

Die „**Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg und Klimaszenario 2050**“ wurde von der Freien und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU), Amt für Landes- und Landschaftsplanung, in Auftrag gegeben und ist ein wichtiger Baustein der laufenden Aktualisierung des Landschaftsprogramms Hamburg (Arbeitsprogramm des Senats ab 2011, lfd. Nr. 115b). Mit dem Gutachten und insbesondere mit dem Klimawandelszenario 2050 ist außerdem eine wichtige Basis für die Weiterentwicklung der Klimaanpassungsstrategie für Hamburg erarbeitet worden.

Das Gutachten umfasst die Darstellung und Bewertung der gegenwärtigen Klimasituation in der Stadt sowie eine Prognose über die voraussichtliche stadtklimatische Entwicklung bis 2050.

Die Erarbeitung erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen dem Amt für Landes- und Landschaftsplanung, dem Amt für Natur- und Ressourcenschutz und dem Gutachterbüro GEO-NET Umweltconsulting GmbH. Für das Klimawandelszenario wurden Mittel aus dem Hamburger Klimaschutzkonzept zur Verfügung gestellt. Es ist Teil der Erarbeitung einer Klimaanpassungsstrategie für Hamburg.

Die Ergebnisse des Gutachtens sind in einem umfangreichen GIS-Kartenwerk verfügbar. Somit stehen jetzt für Projekte der Stadtentwicklung und auch als Grundlage für Bebauungsplanverfahren detaillierte Informationen zur örtlichen Klimasituation zur Verfügung.

Aus den vorliegenden Ergebnissen soll eine Themenkarte „Stadtklima“ mit räumlichen Handlungsschwerpunkten für eine klimaverträgliche zukünftige Stadtentwicklung als Teil des Landschaftsprogramms abgeleitet werden. Diese Inhalte sollen im Zuge der Aktualisierung in das Landschaftsprogramm integriert und somit verbindlicher Bestandteil des Landschaftsprogramms Hamburg werden.

Die Aktualisierung des Landschaftsprogramms wird über ein formales Änderungsverfahren erfolgen, das der Hamburger Bürgerschaft zur Beschlussfassung vorgelegt wird.

Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
Amt für Landesplanung- und Landschaftsplanung LP22
Martina Boetticher

Alter Steinweg 4 - 20459 Hamburg
tel. 040-42840-8048

Inhaltsverzeichnis	Seite:
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Kartenverzeichnis.....	VII
Zusammenfassung.....	VII
1. Aufgabenstellung und Vorgehen.....	1
2. Methodik.....	3
2.1 Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH.....	3
2.2 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung.....	8
2.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	9
2.3.1 Grün- und Freiflächen.....	9
2.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen.....	11
2.4 Klimawandelszenarienrechnung mit der ENVELOPE-Methode.....	13
3. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen.....	18
3.1 Geländehöhe.....	18
3.2 Nutzungsstruktur.....	19
4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....	23
4.1 Kaltlufthaushalt.....	25
4.1.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld.....	25
4.1.2 Autochthones Windfeld.....	29
4.1.3 Kaltluftvolumenstrom.....	32
4.2 Verkehrsbedingte Luftbelastung.....	34
5 Klimaökologische Funktionen.....	37
5.1 Grün- und Freiflächen.....	37
5.2 Siedlungsräume.....	39
5.3 Luftaustausch.....	41
6 Planungskarte Stadtklima.....	42
6.1 Grün- und Freiflächen.....	42
6.2 Siedlungsräume.....	43
6.3 Luftaustausch.....	44

6.4	Nutzungshinweise für die Bauleitplanung	47
7	Gesamtstädtische Simulation ausgewählter meteorologischer Kennwerte zur sommerlichen Wärmebelastung unter dem Einfluss des Klimawandels / Szenario 2050	50
7.1	Siedlungsklimatische Rolle des Stadtgrüns	51
7.2	Anzahl der Sommertage	52
7.3	Anzahl der Hitzetage	54
7.4	Anzahl der Tropennächte	56
7.5	Integrierende Bewertung der Wärmebelastung am Tag	58
7.6	Bewertungskarte „Wärmebelastung innerhalb von Siedlungsflächen“	60
8	Fazit	64
9	Glossar	67
10	Literatur	69

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m) bei einem digitalem Geländehöhenmodell	4
Abb. 2:	Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit	5
Abb. 3:	Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle	6
Abb. 4:	Eingangsdaten für die Modellrechnung	7
Abb. 5:	Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Nutzungen	8
Abb. 6:	Prinzipskizze Kaltluftleitbahn	10
Abb. 7:	Räumliche Auflösung globaler, regionaler und lokaler Klimamodelle	14
Abb. 8	Häufigkeitsverteilungen von Temperatur, Wind und relativer Feuchte für den Zeitraum bis 2100	15
Abb. 9	Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen	16
Abb. 10	Verteilung der 14-Uhr Situationen im Zustandsraum	16
Abb. 11:	Schema zur Berechnung der meteorologischen Variablen für einzelne Wettersituationen aus den Ergebnissen der 8 Basissimulationen	16
Abb. 12:	Klimaszenarien und prognostizierter globaler Temperaturverlauf	17
Abb. 13:	Geländehöhe im Untersuchungsraum	18
Abb. 14:	Untersuchungsraum der Klimamodellierung	19
Abb. 15:	Absolute Dauer autochthoner Wetterlagen in HH-Fuhlsbüttel in den Monaten Juni, Juli und August	23
Abb. 16	Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens	26
Abb. 17	Temperaturfeld zu den Zeitpunkten 22 Uhr abends und 4 Uhr morgens im Bereich des Stadtparks	27
Abb. 18	Prinzipskizze Flurwind	29
Abb. 19	Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens	30
Abb. 20	Strömungsfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgen im Bereich des Stadtparks	31
Abb. 21	Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens	33
Abb. 22	NO ₂ -Immission im Bereich Stadtpark während einer austauscharmen Wetterlage	34
Abb. 23	Tägliche Verkehrsmenge im Bereich Stadtpark	35
Abb. 24	NO ₂ -Immission und Strömungsfeld im Bereich Stadtpark	35
Abb. 25	Lufthygienische Belastungsbereiche innerhalb von Grünflächen im Bereich Stadtpark während einer austauscharmen Wetterlage	36
Abb. 26	Klimafunktionen im Bereich des Stadtparks	40
Abb. 27	Planungshinweise im Bereich des Stadtparks	45
Abb. 28	Beispiel Deckel A7 Bahrenfeld/Othmarschen	47

Abb. 29	Verteilung der Aufpunkte im Stadtgebiet Hamburg.....	50
Abb. 30	Anzahl der Sommertage/Jahr	52
Abb. 31	Gegenüberstellung der Sommertage beider Zeithorizonte	53
Abb. 32	Sommertage und Hitzetage im Zeitraum 1891 bis 2007.....	54
Abb. 33	Anzahl der Hitzetage/Jahr	55
Abb. 34	Gegenüberstellung der Hitzertage beider Zeithorizonte.....	56
Abb. 35	Anzahl der Tropennächte/Jahr.....	56
Abb. 36	Gegenüberstellung der Tropennächte beider Zeithorizonte.....	57
Abb. 37	Anzahl der Tage mit Wärmebelastung.....	58
Abb. 38	Gegenüberstellung der Tage mit Wärmebelastung beider Zeithorizonte	59
Abb. 39	Wärmebelastung im Bereich Stadtpark/Alster	59
Abb. 40	Bewertungskarte Wärmebelastung (Tagsituation).....	60
Abb. 41	Bewertungskarte Wärmebelastung (Ausschnitt).....	61
Abb. 42	Anteil betroffener Einwohner	63
Abb. 43	Flächenanteile der bioklimatischen Belastung (Nachtsituation).....	64
Abb. 44	Ausprägung der sommerlichen Wärmebelastung (tagsüber) in verschiedenen Städten	65

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bewertung der Kaltluftlieferung von Grünflächen	10
Tab. 2:	Klassifizierung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen während einer windschwachen Sommernacht.....	12
Tab. 3:	Nutzungskategorien der Klimamodellierung.....	20
Tab. 4:	Qualitative und quantitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms.....	32
Tab. 5:	Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Hamburg.....	38
Tab. 6:	Bilanzierung der planerisch relevanten Grünflächen	43
Tab. 7:	Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen	49

Kartenverzeichnis

Klimaanalyse:

- Karte 1.1: Nutzungsstruktur
- Karte 1.2: Geländehöhe
- Karte 1.3: Lufttemperatur abends
- Karte 1.4: Lufttemperatur morgens
- Karte 1.5: Lufttemperatur Abnahme
- Karte 1.6: Windgeschwindigkeit abends
- Karte 1.7: Windgeschwindigkeit morgens
- Karte 1.8: Kaltluftvolumenstrom abends
- Karte 1.9: Kaltluftvolumenstrom morgens
- Karte 1.10: Stickstoffdioxid (NO₂) -Immission
- Karte 1.11: Klimafunktionen**
- Karte 1.12: Planungshinweise Stadtklima**
- Karte 1.13: Handlungsschwerpunkte Siedlungsflächen**

Klimawandel:

- Karte 2.1: Tropennächte 2010
- Karte 2.2: Tropennächte 2050
- Karte 2.3: Sommertage 2010
- Karte 2.4: Sommertage 2050
- Karte 2.5: Hitzetage 2010
- Karte 2.6: Hitzetage 2050
- Karte 2.7: Sommerliche Wärmebelastung 2010
- Karte 2.8: Sommerliche Wärmebelastung 2050
- Karte 2.9: Bewertungskarte Klimawandel**

Zusammenfassung der Inhalte des Gutachtens:

Im Auftrag von LP2 wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen und lufthygienischen Funktionen für das Stadtgebiet Hamburgs durchgeführt.

Grundlage der Klimaaanalyse bildet das Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources). Ziel der Untersuchung war eine umfassende Bestandsaufnahme der klimatisch-lufthygienischen Situation im Stadtgebiet Hamburgs und die Bewertung unterschiedlicher Nutzungen nach ihren klimatischen Funktionen und Wirkungen auf.

Aus den Ergebnissen erfolgt die Ableitung klima- und immissionsökologischer Qualitätsziele und planungsrelevanter Entwicklungsziele und Maßnahmen. Zudem werden Belastungsräume mit geringer Durchlüftung und/ oder lufthygienischer Belastung identifiziert.

Teil 1: Klimaaanalyse

Die Klimaaanalyse basiert auf dem Klimarechenmodell FITNAH. Aus den Grundlageninformationen über die Stadt, wie Topographie, Bebauung und Vegetation sowie Kenntnissen über atmosphärische Prozesse und lokalklimatischer Phänomene werden Aussagen über Wärmebelastung, Durchlüftung und Bioklima abgeleitet. Dabei gehen die Gutachter von einer angenommenen austauscharmen sommerlichen Wetterlage aus, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einher geht. Im Vordergrund der Betrachtung stehen der lokale nächtliche Kaltluftaustausch und die Sicherung und Verbesserung der damit in Zusammenhang stehenden relevanten städtischen Strukturen und Grünflächen. Außerdem wurde eine lufthygienische Betrachtung der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung durchgeführt, die auf den Daten des für das Stadtgebiet Hamburg durchgeführten Screenings (BSU/ IB) beruht.

Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt fundierte Aussagen für den Maßstabsbereich 1:50 000 bis 1:15 000. Eine abschätzende Beurteilung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen ist aber auch auf Bebauungsplanebene gegeben. Die verwendete räumliche Maschenweite beträgt 50 x 50 m.

Die Einstufung des innerhalb von Grünflächen auftretenden Kaltluftvolumenstroms orientiert sich an der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008). Eingangsparameter für die Modelluntersuchung waren die unterschiedlichen Nutzungsstrukturen, Gelände-, Gebäude- und Vegetationshöhen sowie meteorologische Messwerte und Statistiken. Die wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind der Gebäude-, Baum- / Vegetationsbestand.

Das Ergebnis sind aktuelle, komplexe und hochauflösende Karten der Klima- und immissionsökologischen Funktionen (aggregiert in einer Klimafunktionskarte).

Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Stadtgebiet. In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude der Strömung in den Weg und verzögern diese. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Hindernisse die Turbulenz verstärkt. Als Kaltluft produzierende Bereiche werden vegetationsgeprägte Freiflächen identifiziert, wie z.B. Ackerflächen und Parkareale, aber auch Grünflächen wie Kleingärten und Friedhofsanlagen.

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 1300 m z. B. im Raum Blankenese. Hier ermöglichen die über den angrenzenden ausgedehnten Freiflächen entstehenden Kaltluftvolumina und die gut durchströmte Einzel- und Reihenhausbebauung eine flächenhafte Durchlüftung.

Große Teile der überbauten Flächen in Hamburg werden in den austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlagen 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.

Kaltluftabflüsse tragen direkt zur Frisch-/Kaltluftversorgung der Stadtteile bei. Sehr hohe Kaltluftvolumina entstehen über den großen Grünflächen z. B. der Stadtteile Rissen, Sülldorf und Blankenese. Darüber hinaus entstehen sie über Teilflächen des Volksparks, des Niendorfer Geheges sowie über landwirtschaftlich genutzte Flächen in Curslack im Bezirk Bergedorf. Grünflächen mit hoher Kaltluftlieferung und zentraler Lage sind z.B. der Volkspark, das Niendorfer Gehege 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 dabei auch den kleineren Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zu, sofern sie Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Daraus resultieren für diese Flächen folgende Planungsempfehlungen:

- Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen,
- Reduzierung von Emissionen und
- Vernetzung mit benachbarten Freiflächen.

Teil 2: Klimawandelszenario und Schlussfolgerungen:

Hierfür wurde die zukünftige globale Erwärmung um 2° (Szenario A1B nach CLM), die Inanspruchnahme der FNP-Reserven für Bebauung und eine geringfügige Verdichtung angenommen. Im Verhältnis zu anderen Städten wie Berlin, Stuttgart oder Karlsruhe ist die Belastung in Hamburg bisher, wegen des vorherrschenden Seeklimas und relativ seltenen windstillen Tagen, noch niedrig. Aber auch hier werden sich bis 2050 Veränderungen vollziehen, die einerseits durch den globalen Temperaturanstieg bedingt sind, andererseits durch die städtebauliche Entwicklung beeinflusst werden. Die Anzahl der heißen Tage wird deutlich zunehmen und, vor allem für gesundheitlich empfindliche Bevölkerungsgruppen, wie alte Menschen und kleine Kinder, zu Belastungen führen.

Die Erhaltung und Verbesserung des Bioklimas, das die Lebensqualität in urbanen Räumen wesentlich beeinflusst, ist daher besonders wichtig. Zukünftig ist in den innerstädtischen Bereichen mit einer höheren sommerlichen Wärmebelastung zu rechnen als dies heute der Fall ist. Da sich voraussichtlich die Anzahl der Tage mit Hitzestress erhöhen wird, kommt der zukunftsorientierten räumlichen Planung zur Erhaltung bioklimatisch unbedenklicher Lebensbedingungen eine wichtige Rolle zu. Denn auch die weitere städtebauliche Entwicklung - selbst unter der Prämisse, dass hierbei klimafreundliche Bauweisen zum Einsatz kommen - trägt ihrerseits zu einer weiteren Erwärmung der Siedlungsgebiete bei, die sich durch die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in den nächsten Dekaden noch verschärfen wird.

Die höchsten bioklimatischen Belastungen treten dort auf, wo sich der Effekt der „Städtischen Wärmeinsel“ besonders gut ausprägen kann. Dabei handelt es sich um Siedlungsflächen, die besonders dicht überbaut sind, eine starke Versiegelung aufweisen und nur über wenige Grünflächen verfügen.

Gerade hier kommt der Vermeidung von Gesundheitsbelastungen, die insbesondere durch höhere Tages- und Nachttemperaturen ausgelöst werden können, und der Gewährleistung gesunder bioklimatischer Verhältnisse - auch unter den Bedingungen des Klimawandels - besondere Bedeutung zu.

Dieser Entwicklung kann bereits heute entgegengewirkt werden. Dabei spielen besonders die zahlreichen Grünflächen in der Stadt eine wichtige Rolle. Die Vegetation trägt zu einem angenehmen kühlen Klima bei und bewirkt die Abkühlung der bebauten Bereiche. Außerdem wirken Grünflächen und Landschaftsachsen als Durchlüftungskorridore, die besonders nachts die Stadt günstig beeinflussen.

Die planerischen Schlussfolgerungen aus dem Klimawandelszenario haben zum Ziel, die Wärmebelastung am Tage zu verringern. Die für die belasteten Bereiche abzuleitenden Hinweise zielen deshalb darauf ab, einerseits durch die Erhaltung vorhandener Vegetation und durch zusätzliche Verschattung die Aufenthaltsqualität im Freien zu steigern und andererseits den Gebäudebestand hitzeangepasst zu gestalten. Zudem lässt sich über die Verwendung von hellen Baumaterialien die Reflexion des Sonnenlichtes (Albedo) erhöhen. Zu den sehr effektiven Maßnahmen, um die Erwärmung der Gebäude am Tage abzuschwächen, zählen auch Dach- und Fassadenbegrünung.

1. Aufgabenstellung und Vorgehen

Das Schutzgut Klima/Luft ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und Bestandteil der Abwägung bei der Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung. Das Thema Klima/ Luft ist außerdem ein wichtiger Bestandteil der Aktualisierung des Landschaftsprogramms Hamburg. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele ist das Vorliegen flächenbezogener Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieses Schutzgutes. Aus der Kenntnis über das in einer Stadt vorherrschende Lokalklima, die dadurch mitbestimmte lufthygienische Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen können Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft abgeleitet werden. Zielsetzung ist dabei die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen, die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse, die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität und das Angebot besonderer Lokalklimate.

Im Auftrag 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 und lufthygienischen Funktionen für das Stadtgebiet Hamburgs durchgeführt. Die Ergebnisse sollen als Grundlage für die Aktualisierung des Landschaftsprogramms Hamburg herangezogen werden. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einher gehen. 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 klimatisch-lufthygienischen Situation im Stadtgebiet Hamburgs geführt. Die durchgeführten Untersuchungen haben darüber hinaus zum Ziel, die unterschiedlichen Teilflächen der Stadt Hamburg nach ihren klimatischen Funktionen, d.h. ihrer Wirkungen auf andere Räume, abzugrenzen und die klimaökologisch wichtigen Raumstrukturen herauszuarbeiten.

Analyse der stadtklimatischen Zusammenhänge

Das Ergebnis ist eine aktuelle, komplexe und hochauflösende Karte der klima- und immissionsökologischen Funktionen (Klimafunktionskarte). Als Grundlage für die Bewertung dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse. Zusätzlich stehen für den Aspekt der verkehrsbedingten Luftbelastung flächendeckende Immissionsfelder während austauscharmer Wetterlagen zur Verfügung. In diesem Zusammenhang findet das Ausbreitungsfeld für die verkehrstypische Komponente Stickstoffdioxid (NO₂) als lufthygienischer Belastungsbereich Eingang in die Klimafunktionskarte.

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

- bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (*Wirkungsräume*) 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 Freiflächen (*Kaltluftleitbahnen*) beide miteinander verbinden.

Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges in Form einer Klimafunktionskarte.

Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Stadtgebiet vor. Die *Nachtsituation* steht deshalb 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. Um das komplexe Prozessgeschehen in einer Großstadt wie Hamburg erfassen zu können, ist der Beginn (22 Uhr) und das Ende einer Nacht (04 Uhr) simuliert worden. Während die Kaltluftentstehung innerstädtischer Grünflächen eher in der ersten Nachthälfte am höchsten ist, sind die Kaltluftströmungen des Umlandes erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet.

Darüber hinaus wurden nun in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form einer *Planungshinweiskarte* dargestellt. Die Umsetzung in raumspezifische klima- und immissionsökologische Qualitätsziele mündet in der Forderung nach Handlungsempfehlungen. Durch konkrete Zuordnung *planungsrelevanter Aussagen* zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie z.B. Kaltluftentstehungsflächen können Flächen benannt werden, die in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden sollen. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung und/oder lufthygienischer Belastung identifiziert.

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 Maßstabbereich 1 : 50 000 bis 1 : 20 000 (F-plan und Lapro-Ebene). Eine abschätzende Beurteilung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen ist aber auch auf Bebauungsplanebene gegeben.

Modellierung von Klimawandelszenarien

Zusätzlich wurden verschiedene modellgestützte Analysen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die sommerliche Wärmebelastung durchgeführt. Im Vordergrund stand die Modellierung flächendeckender meteorologischer Parameter für die Zeithorizonte 2001 bis 2010 sowie 2046 bis 2055 zur Analyse der städtischen Strukturen unter dem Aspekt des globalen Klimawandels. Methodischer Ausgangspunkt für die weitere Modellierung der meteorologischen Basisdaten zum Klimawandel für unterschiedliche Zeitschnitte ist das Methoden-Paket „ENVELOPE“. Auf Basis der Informationen des regionalen Klimamodells CLM wurden mit dem Modell FITNAH-3D räumlich hochauflösende Temperatur- Feuchte- und Strömungsfelder modelliert und zu aussagekräftigen meteorologischen Parametern aggregiert, welche die sommerliche Wärmebelastung im Stadtgebiet Hamburg charakterisieren können. Neben der jetzigen Situation als Ausgangszustand wurde zudem eine zukünftige Flächenkulisse für den Zeitschnitt 2050 entwickelt. Sie umfasst die derzeit absehbaren kurz- und mittelfristigen baulichen Entwicklungen in Hamburg und ermöglicht es somit, auch deren klimatische Summeneffekte abzubilden.

2. Methodik

2.1 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. 1).

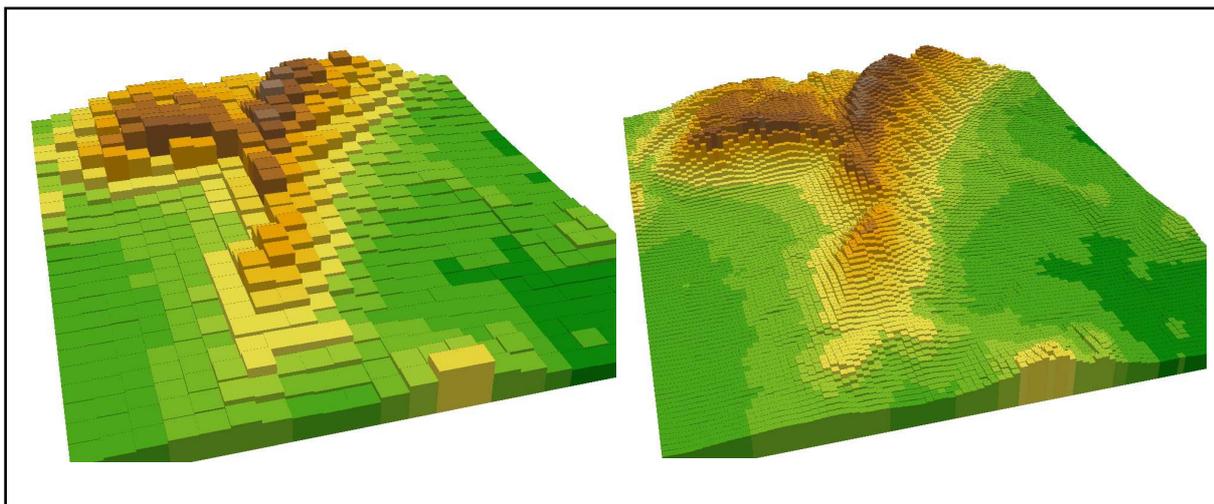


Abb. 1: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m) bei einem digitalem Geländehöhenmodell

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 Δz 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. Alle Prozesse, die eine kleinere räumliche Auflösung als die verwendete Gitterweite haben, können vom Modell nicht berechnet und erfasst werden. Manche Oberflächenstrukturen beeinflussen aber in sehr markanter Weise die mittleren meteorologischen Variablen und müssen dann auch in geeigneter Art und Weise in den Rechenvorgang einfließen. Beispielsweise verzögern Blätter eines Baumes die Strömung und erhöhen die Turbulenz. Einzelne Blätter sind von der räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie vom Rechengitter nicht erfasst werden können. Über einen zusätzlichen Term in der Gleichung für die Berechnung der Windgeschwindigkeit wird der summarische Effekt eines Baumbestandes es auf den Wind berücksichtigt. Diese Vorgehensweise nennt man 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. 2). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

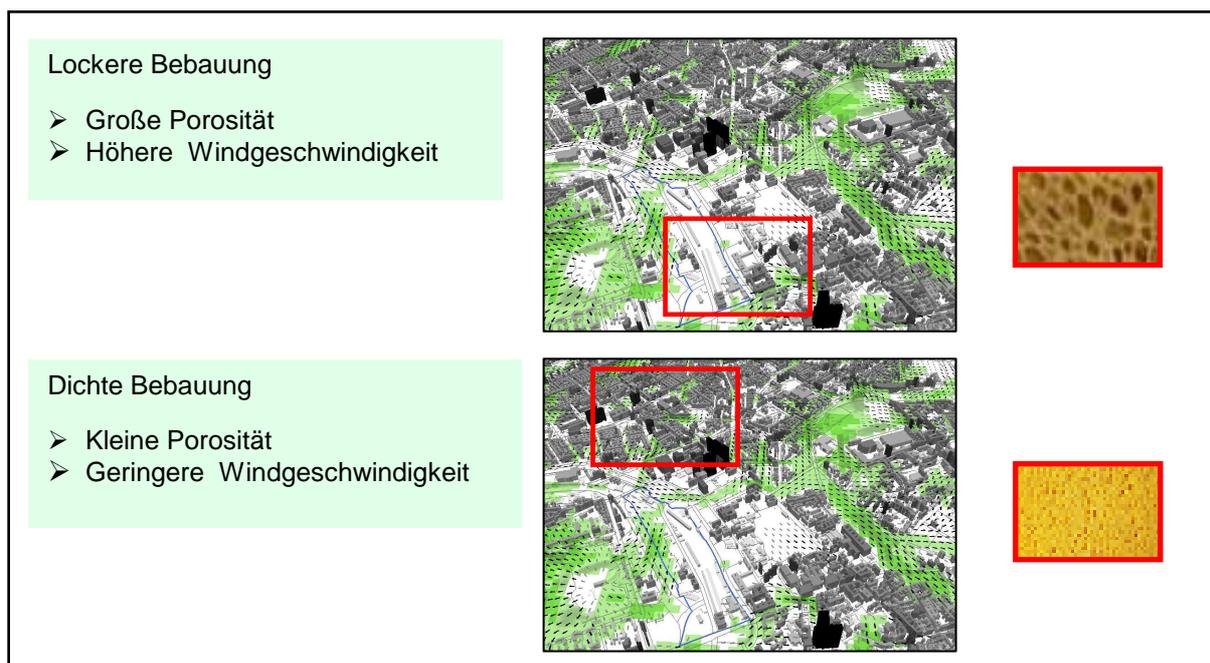


Abb. 2: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

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 anthropogen 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. 3). 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).

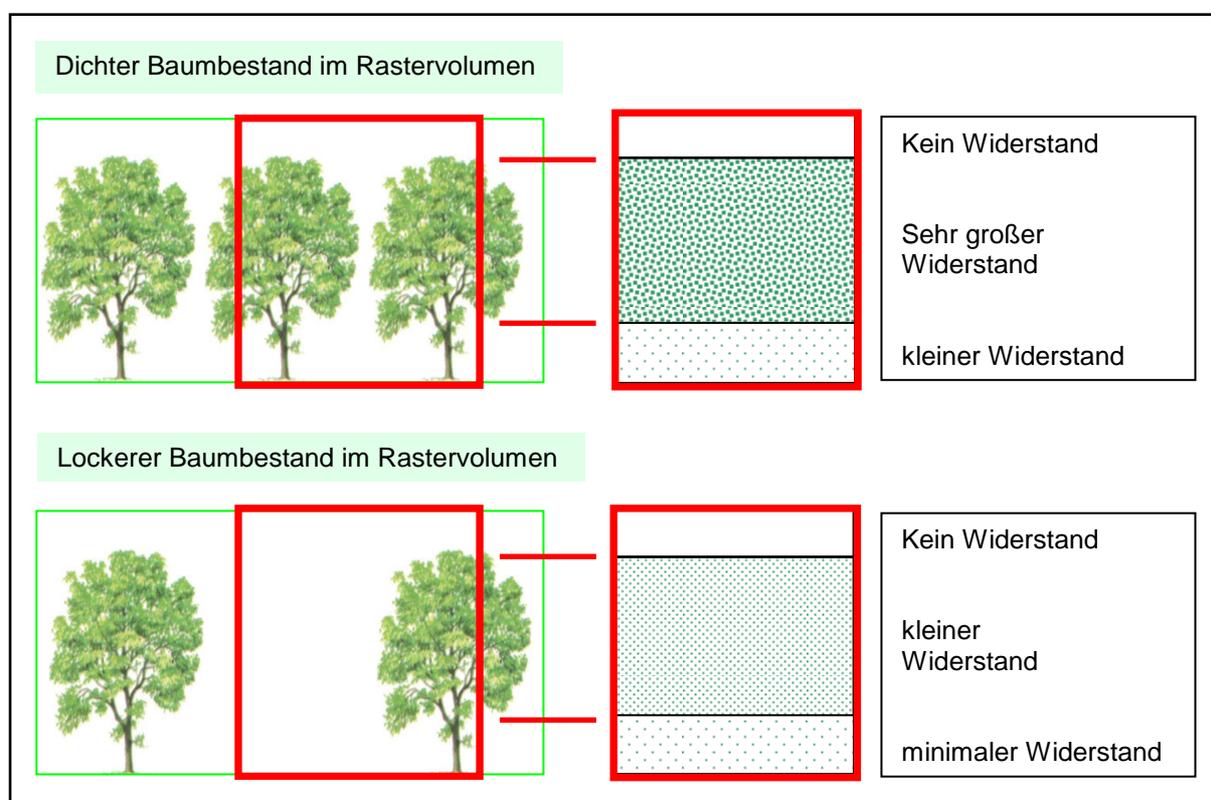


Abb. 3: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

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. 4). Diese müssen zum einen die Landschaft charakterisieren, für welche die lokalklimatische Studie durchgeführt werden soll, und zum anderen auch die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren.

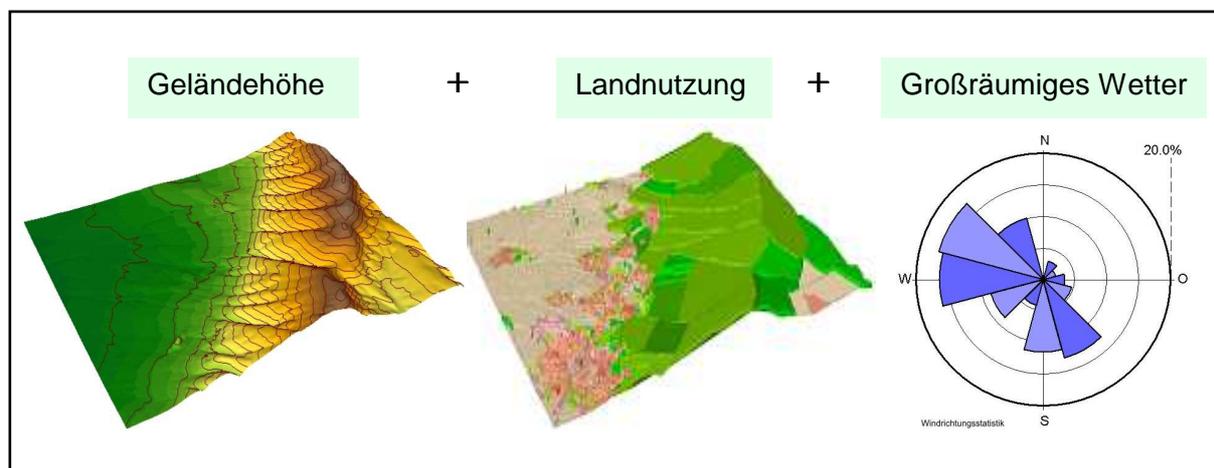


Abb. 4: Eingangsdaten für die Modellrechnung

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,.....
 - Bei Bewuchs: z.B. Bestandshöhe, Bestandsdichte, Blattflächenverteilung,...

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. Diese Wetterlagen treten in Hamburg typischerweise an ca. 11 % der Nachtstunden in den Sommermonaten Juni, Juli und August auf (vgl. Abb. 13, S. 21). Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen synoptischen 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.

In Abb. 5 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

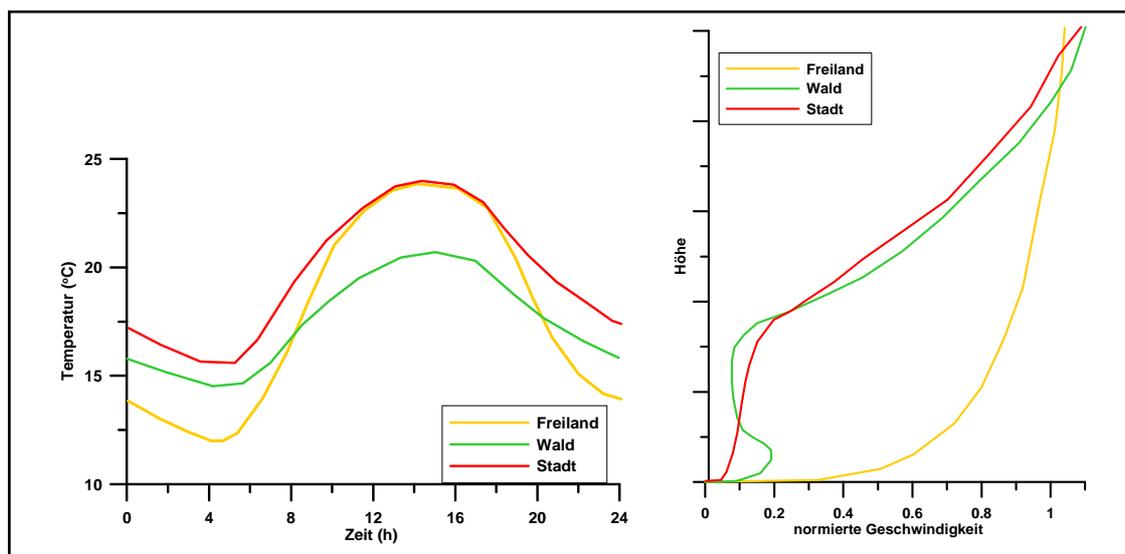


Abb. 5: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

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.

2.2 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung

Zur Abschätzung der Luftschadstoffbelastung an Straßen ist es notwendig, die Kausalbeziehung Emission-Transmission-Immission modellhaft möglichst exakt nachzubilden. Die vorliegende Untersuchung berücksichtigt die Situation während einer austauscharmen Wetterlage mit Verkehrsdaten des Bezugsjahres 2009. Die notwendigen Informationen wurden von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt zur Verfügung gestellt und basieren auf Berechnungen mit dem Screening-Programm PROKAS (IVU UMWELT 2005). Im Rahmen der Programmumgebung von PROKAS (IVU UMWELT 2005) wurden die Emissionen in den jeweiligen Straßenabschnitten für jeden Fahrmodus auf Basis des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes HBEFA 3.1 (UBA 2010) berechnet. Die linienhaften Angaben zur Emission sind in das Geodatenbankumfeld des Straßenverkehrsnetzes überführt worden und auf ein für das Simulationsmodell FITNAH geeignetes Raster mit einer Zellengröße von 50 m x 50 m abgebildet worden. Die Emissionshöhe beträgt dabei 0,5 m über Grund. Somit steht ein GIS-gestütztes Kataster für die Ausbreitungssimulation der verkehrsbürtigen Luftschadstoffe bereit.

2.3 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 z.B. in der Klimafunktionskarte darstellen zu können, wurde den Blockflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen (welche im Wesentlichen auf der Biotoptypenkarte beruht - vgl. Kap. 3.2, S. 18), die relevanten Klimaparameter wie z.B. Windgeschwindigkeit oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Diese Parameter liegen als rasterbasierte Felder in einem Geographischen Informationssystem als 50 m Raster vor. Das Ausbreitungsfeld für den verkehrsbedingten Luftschadstoff Stickstoffdioxid (NO_2) wurde ebenfalls in dieser Rastergröße berechnet. Bei einer Gesamtgröße des Untersuchungsraums von ca. 1560 km^2 geht die Abgrenzung des Untersuchungsraumes deutlich über das Stadtgebiet Hamburgs hinaus und zielt darauf ab, auch außerhalb des Stadtgebiets vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren (vgl. Abb. 12, S. 19). Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt der Stadt Hamburg relevanten Struktureinheiten berücksichtigt werden.

Umfasst ein Baublock mehrere Rasterzellen eines Parameters, wird aus den Zelleneinzelwerten ein Mittelwert gebildet. Somit steht für jeden Baublock (bebaute als auch unbebaute Freiflächen) eine Reihe von Klimaparametern bereit. Darauf basierend werden den Teilflächen Bewertungsindices zugewiesen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

2.3.1 Grün- und Freiflächen

Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten *vegetationsgeprägte Freiflächen* wie z.B. Ackerflächen und Parkareale, aber auch baulich geprägte Grünflächen wie Kleingärten und Friedhofsanlagen. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus. 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. Während diese Methode vor allem für die Ermittlung der bioklimatischen Situation geeignet ist (vgl. Kap. 2.3.2), wird sie in dieser Untersuchung darüber hinaus auch für die Bewertung des Kaltluftvolumenstroms herangezogen. Da die Intensität des Luftaustausches je nach Untersuchungsraum und dessen topographischen Bedingungen unterschiedlich ausgeprägt sein kann, legt diese statistische Analyse das lokale/regionale Wertenniveau eines Gebietes zugrunde und bewertet somit die Abweichung eines meteorologischen Parameters von den mittleren Verhältnissen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung einer Variablen durch die Z-Transformation. Dadurch können die meteorologischen Parameter dimensionslos unter Beibehaltung der Relation bewertet werden. Damit stehen dann weniger die absoluten Werte im Vordergrund, was zu einer guten Vergleichbarkeit der Variablen untereinander oder mit anderen Untersuchungen führt. Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren Bewertungskategorien, welche durch den Mittelwert (bei 0) sowie die obere und untere S_1 -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 (Bewertung: gering und sehr gering). Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sind die Klassengrenzen auf fünf Kategorien aufgeweitet worden, um z.B. auch die ausgeprägten Kaltluftabflüsse wie im Bereich der Harburger Berge besser darstel-

len zu können. Die qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms zeigt Tabelle 1, wobei für einen klima-ökologisch wirksamen Kaltluftvolumenstrom im Wesentlichen der Wertebereich > 0 angesehen wird (vgl. Tabelle 2). Die Bewertung des Volumenstroms orientiert sich somit an den Kategorien der Z-Transformation, wobei für jede Grünfläche der Biotoptypenkarte ein mittlerer Z-Wert zugewiesen wurde.

Berücksichtigung der Abend- und Morgensituation

Ganz allgemein zeigt sich die Tendenz, dass die Kaltluftlieferung von innerstädtischen Grünflächen zu Beginn einer Nacht am größten ist und sich zu deren Ende hin allmählich abschwächt, da sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind. Bei den Kaltluftentstehungsgebieten des Umlandes ist es umgekehrt. Hier sind die Strömungssysteme in der zweiten Nachthälfte am stärksten entwickelt, nachdem entsprechende Kaltluftvolumina über den Freiflächen gebildet wurden. Größere innerstädtische Grünflächen können aber Merkmale sowohl von innerstädtischen als auch peripheren Standorten einnehmen.

Mittlerer Z-Wert pro Grünfläche	Bewertung
< -1 (untere S_1 -Schranke)	Sehr gering
-1 bis 0	Gering
0 bis 1	Mittel
> 1 (obere S_1 -Schranke) bis 2	Hoch
> 2	Sehr hoch

Tab. 1: Bewertung der Kaltluftlieferung von Grünflächen

Die Darstellung der Kaltluftproduktionsflächen erfolgt in der Klimafunktionskarte als abgestufte Flächenfarbe. Dabei wird, abhängig von der Kaltluftdynamik zu Beginn (22 Uhr) oder gegen Ende der Nacht (04 Uhr), der jeweils höhere Wert herangezogen und damit die maximale Ausgleichsleistung einer Grünfläche bewertet.

Kaltluftleitbahnen

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 6). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation.

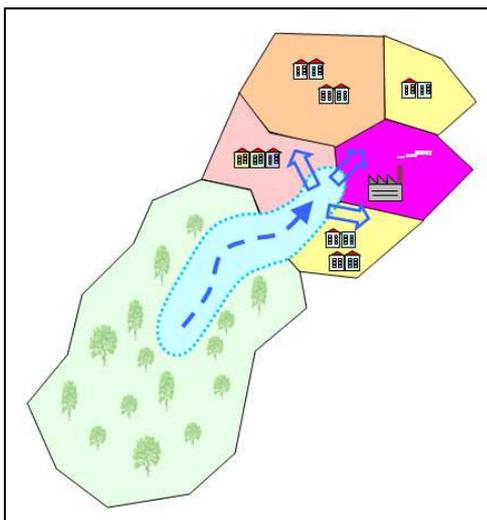


Abb. 6: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn

Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Straßenräume. Dabei wird in der Klimafunktionskarte zwischen Leitbahnen in ebener Lage (thermisch induziert) sowie Leitbahnen im Bereich einer Tiefenlinie (z.B. eines Fließgewässers) unterschieden. Die Beurteilung der Wirksamkeit einer Leitbahn orientiert sich an ihrer Ausprägung. Grünstrukturen, welche Kaltluft bis zu 1000 m in den Siedlungskörper hinein führen, werden mit „hoch wirksam“ bewertet, Leitbahnen mit einer Länge > 1000 m mit „sehr hoch wirksam“.

Die Breite dieser Leitbahnen liegt in einer Größenordnung von 150 m bis 300 m.

Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus stadtklimatischer Sicht sind daher Abflüsse prinzipiell als sehr wirksam zu bewerten. Allerdings treten Kaltluftabflüsse in relevanter Form nur lokal auf, führen dann aber zu überdurchschnittlich stark ausgeprägten Kaltluftvolumenströmen.

2.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen

Die Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der *Kaltlufteinwirkbereich* kennzeichnet das Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer sommerlichen Strahlungswetternacht. Um die Strömung als klimaökologisch relevant einordnen zu können, sollte sie eine Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 0,1 m/s erreichen. Damit geht einher, dass die im Einwirkbereich befindliche Bebauung überwiegend günstige bioklimatische Verhältnisse aufweist. 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.

Grundlage für die Beurteilung der *bioklimatischen Belastung* eines Baublockes ist der Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die Wärmebelastung. Dieser basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und gibt den Grad der Unbehaglichkeit bzw. Behaglichkeit als mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Anzahl von Menschen wieder.

Die PMV-Skala reicht dabei (in der Regel) von -3 für Kältestress bis $+3$ (Hitzestress). Nach VDI (1998) sind Umgebungsbedingungen, die einen PMV-Wert von größer 2,5 bedingen, mit Hitzestress für den Menschen verbunden. Dieser Schwellenwert ist für die Tagsituation relevant, welche in Kap. 7.4 (S. 50) erläutert und in der „Karte 2.9 - Bewertungskarte Klimawandel“ dargestellt wird. Bei der Berechnung des PMV-Wertes müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, der Dampfdruck und die Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein. Diese meteorologischen Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. 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.

Bei der *nächtlichen* Wärmebelastung, welche der Klimafunktions- bzw. Planungshinweiskarte (Karten 1.11 und 1.12) zugrunde liegt, handelt es sich um die Werteausprägung, wie sie sich in der zweiten Nachthälfte um 4 Uhr einstellt. Im Gegensatz zur *Tagsituation* (Karten 2.7 bis 2.9), welcher bereits eine Auswertung zur *Anzahl* von Belastungstagen (mit $PMV > 2.5$) zugrunde liegt, wird hier der PMV-Wert für eine typische *Sommernacht* mit geringem Luftaustausch und ungehinderter langwelliger Ausstrahlung bei einem wolkenlosem Himmel herangezogen. Dabei wirken lokal auftretende Kaltluftströmungen modifizierend auf die räumliche Ausprägung des PMV. Es handelt sich somit um eine Einzelsituation.

Die Bewertung der nächtlichen PMV-Situation unterscheidet sich somit auch methodisch von der am Tage. Während für die Tagsituation ein PMV-Wert von > 2.5 als Schwellenwert vorliegt, ist so ein Grenzwert für die Nacht nicht definiert. Hier wird nun das lokale (PMV-) Wertenniveau im Untersuchungsraum herangezogen, ohne dass eine konkrete Anzahl von Belastungstagen angegeben wird. Die bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen lässt sich somit in die Tag- bzw. Nachtsituation unterscheiden.

Beurteilung der bioklimatischen Situation

Es wurde, analog zum Kaltluftvolumenstrom, eine statistische Analyse des PMV-Ergebnisrasters durchgeführt und den (in der Klimafunktions- und Planungshinweiskarte dargestellten) Blockflächen der Siedlungsräume Flächenmittelwerte für die Belastung zugewiesen.

Über das in der VDI-RL 3785 Blatt 1 beschriebene Verfahren zur Ermittlung der bioklimatischen Situation wird mittels der Z-Transformation das Modellgebiet in günstige und ungünstige Areale untergliedert. In der Nachtsituation ist dabei die Abweichung von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum ausschlaggebend.

Für die Zuordnung eines Baublocks ist die jeweilige durchschnittliche Ausprägung des Z-Wertes des PMV innerhalb der Fläche relevant (als Rasterzellenmittelwert), aus der sich die Zuordnung zu den Bewertungskategorien ergibt (vgl. Tabelle 2). Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier qualitative Bewertungskategorien, welche durch den Mittelwert sowie die obere und untere S₁-Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen > 0 bedeuten überdurchschnittliche Wertausprägungen und resultieren in den Kategorien „Weniger günstig“ und „Ungünstig“. Negative Ausprägungen von < 0 repräsentieren ein unterdurchschnittliches Belastungsniveau und werden entsprechend als „Günstig“ und „Sehr günstig“ kategorisiert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung der Klimaparameter und der sich daraus ergebenden Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Variablen und Untersuchungen.

Bei der Belastungsklasse 4 "Ungünstig" liegt eine überdurchschnittliche Wärmebelastung mit einem Z-Wert von mehr als 1 vor. Eine gewisse bioklimatische Belastung ist auch noch bei der Belastungsklasse 3 „Weniger günstig“ gegeben. Günstige Verhältnisse liegen hingegen bei den Klassen 2 und 1 vor und können aus bioklimatischer Sicht als positiv beurteilt werden. Zur deutlicheren Differenzierung der Siedlungsflächen sind in der Klimafunktionskarte zusätzlich die Belastungskategorien 2 und 3 in Stufen zu 0.5 als Übergangsbereiche untergliedert worden. In Tab. 2 sind den jeweiligen Klassen außerdem charakteristische Bebauungstypen zugeordnet.

Belastungsstufe	Mittlerer Z-Wert pro Baublock	Darstellung in Klimafunktionskarte
1 Sehr günstig	> -1 (untere S ₁ -Schranke)	 <i>dörflich geprägte Siedlungstypen</i>
2 Günstig	-1 bis -0.5	 <i>Einzel- und Reihenhausbauung</i>
	-0.5 bis 0	 <i>Zeilenbauung</i>
3 Weniger günstig	0 bis 0.5	 <i>Block- und Blockrandbauung</i>
	0.5 bis 1	 <i>verdichteter Siedlungsraum</i>
4 Ungünstig	< 1 (obere S ₁ -Schranke)	 <i>verdichteter Siedlungsraum</i>

Tab. 2: Klassifizierung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen während einer windschwachen Sommernacht

Es kann festgehalten werden, dass die Belastungssituation zwar im Wesentlichen mit Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad einher geht, kleinräumig aber noch durch den Einfluss von Grünflächen und lokalem Einwirken von Kaltluft deutlich variieren kann.

2.4 Klimawandelszenarienrechnung mit der ENVELOPE-Methode

Im 4. Sachstandsbericht des IPCC (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaveränderungen - Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007 über Klimaänderungen wird der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand zusammengefasst. Danach ist davon auszugehen, dass sich die globale Mitteltemperatur bis zum Jahre 2100 um etwa 2 bis 4 °C verändern wird. Damit einher wird auch eine Zunahme von extremen Wetterereignissen wie Hitze, Dürre oder auch eine Veränderung in der Intensität und Verteilung von Niederschlägen erwartet.

In dem Sachstandsbericht wird auch festgestellt, dass das Vertrauen in regionale Klimaprojektionen größer geworden ist da die Aussagen der globalen Szenarienrechnungen nunmehr belastbarer sind, die regionalen Modelle besser geworden sind und die nötige Rechnerkapazität zur Verfügung steht. Aus diesem Grunde können die in Deutschland verfügbaren Ergebnisse regionaler Klimamodelle als sehr guter Hinweis für die wahrscheinliche Klimaentwicklung in den nächsten 100 Jahren angesehen werden. Modellergebnisse stehen derzeit zur Verfügung mit den Modellen CLM und REMO, sowie den statistischen Verfahren WETTREG und STAR.

Die Ergebnisse dieser verschiedenen Verfahren unterscheiden sich zwar im Detail, insbesondere bei der Abschätzung der Extremwerte, zeigen aber gerade für die klimatologischen Mittelwerte eine recht einheitliche Tendenz. Danach ergibt sich für Deutschland, mit regionalen Unterschieden, für das Emissionsszenario A1B eine Änderung der bodennahen Jahresmitteltemperatur für das Ende des Jahrhunderts von plus 2-3 °C.

Während gleichzeitig für die Summe des Jahresniederschlages nur geringe Veränderungen gegenüber dem heutigen Zustand simuliert werden, findet man eine deutliche saisonale Verschiebung. Im Sommer ist mit einer Abnahme von typischerweise 20-30% zu rechnen, im Winter dagegen mit einer Zunahme von 10-20%.

Diese zu erwartenden Veränderungen bei Temperatur und Niederschlag werden Auswirkungen auf verschiedenste gesellschaftliche Bereiche haben wie etwa die Land- und Forstwirtschaft, die Wasserwirtschaft, die Energieversorgung oder auch die menschliche Gesundheit insbesondere in urbanen Räumen.

Obwohl die Ergebnisse von CLM und REMO auf einem, verglichen mit dem globalen Maßstab, sehr feinen Rechengitter vorliegen, werden für die Abschätzung von Klimafolgen im städtisch geprägten Bereich detailliertere Aussagen benötigt, zumal die Städte mit ihren veränderten Landnutzungen in der Regel gar kein Bestandteil der Regionalmodelle sind. Daher sind regionale Modelle mit einer für ihren Zweck sehr guten räumlichen Auflösung von 10 - 20 km nicht in der Lage, die relevanten lokalen Handlungsfelder wie fein strukturierte Wälder, unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen oder auch Städte räumlich aufzulösen und daher in den Klimaprojektionen ausreichend zu berücksichtigen.

Diese Aufgabe können kleinräumige, an den entsprechenden Raum angepasste mesoskalige Simulationsmodelle übernehmen. Diese sind aufgrund ihrer feinen räumlichen Auflösung in der Lage, die Vielfalt und Heterogenität der naturräumlichen Gliederung einer Landschaft auf die Verteilung der meteorologischen Größen zu erfassen.

Mesoskalige dreidimensionale Simulationen werden dabei nicht parallel zu einem regionalen Klimamodell ausgeführt, vielmehr erfolgt die Übertragung der regionalen Ergebnisse auf die lokale Ebene durch ein statistisch-dynamisches Verfahren. Dabei werden die größerskaligen Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Vielzahl von mesoskaligen Simulationen verknüpft. Es werden keine lokalen Klimaszenarienrechnung für die nächsten Dekaden durchgeführt, sondern die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle „intelligent“ auf kleinere Raumeinheiten interpoliert, wobei eine Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten einer Landschaft mit unterschiedlicher Landnutzung und Relief erfolgt. Die räumliche Auflösung der

verschiedenen Maßstabsebenen zeigt Abb. 7 beispielhaft für die Landnutzung. Da auf globaler Ebene die Klimamodelle mit einer groben Gitterweite von 100 km bis 500 km betrieben werden, wird eine Großstadt wie Hamburg kaum realitätsnah repräsentiert (roter Umriss). Auf regionaler Maßstabsebene sind die Gitternetzpunkte mit 10 km x 10 km schon deutlich dichter verteilt, so dass zumindest die Ballungsräume abgebildet werden können. Das Untersuchungsgebiet wird dabei von 16 Gitterzellen abgedeckt.

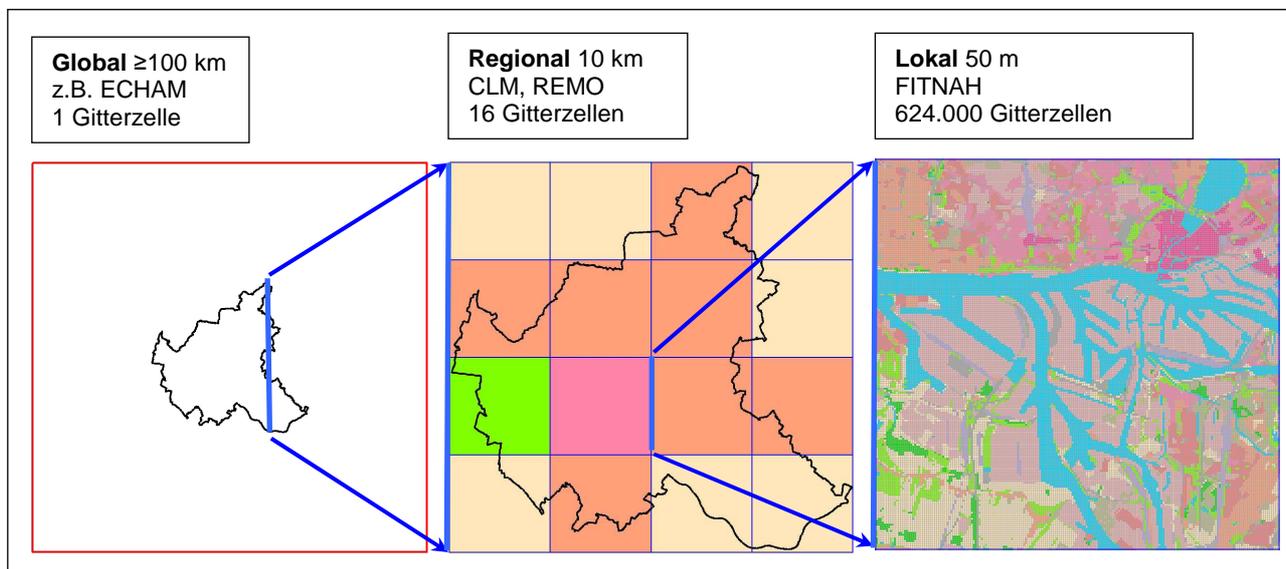


Abb. 7: Räumliche Auflösung globaler, regionaler und lokaler Klimamodelle

Erst mit der Verwendung eines hochauflösenden lokalen Klimamodells wie FITNAH kann deutlich werden, inwiefern sich die unterschiedlichen Stadtstrukturen verstärkend oder abschwächend auf die sommerliche Wärmebelastung unter dem Einfluss des Klimawandels auswirken. In Rahmen der durchgeführten Modellrechnung wurde das Stadtgebiet von Hamburg zusammen mit dem näheren Umland in insgesamt 624.000 Gitterzellen von jeweils 50 m x 50 m aufgelöst, wobei damit auch die Grünstrukturen in ihrer Funktion für das lokale Klima differenziert berücksichtigt werden konnten.

Ausgehend von einer definierten Fragestellung, werden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarienrechnungen problemspezifisch ausgewertet, so dass sie als übergeordnete Eingangsdaten für das mesoskalige Modell verwendet werden können. Beispielhaft soll das Vorgehen anhand der Fragestellung

Wie ändert sich die Wärmebelastung (Hitzestress) in Städten in der Zukunft? Wie viele Tage mit Hitzestress sind in der Zukunft zu erwarten?

beschrieben werden.

Die Wärmebelastung für den Menschen kann anhand eines Wärmehaushaltsmodells abgeschätzt werden (Klima-Michel), bei dem der Wärmeaustausch einer Norm-Person mit seiner Umgebung berechnet wird. Als Kriterium wird dabei ein PMV-Wert berechnet (PMV = „Predicted Mean Vote“), der eine Maßzahl für die thermischen Komfortbedingungen des Menschen darstellt. Die PMV-Skala reicht dabei (in der Regel) von -3 für Kältestress bis $+3$ (Hitzestress). Nach VDI (1998) sind Umgebungsbedingungen, die einen PMV-Wert von größer 2,5 bedingen, mit Hitzestress für den Menschen verbunden. Bei der Berechnung des PMV-Wertes müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, der Dampfdruck und die Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein. Diese meteorologischen Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen.

In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charakterisierung der großräumigen Wettersituation (z.B. Wind, Luftmasseneigenschaften), können mit Hilfe eines mesoskaligen Modells diese Verteilungen innerhalb eines urbanen Raumes detailliert berechnet werden.

Während die stadtspezifischen Eingangsgrößen bekannt sind oder für die Zukunft vorgegeben werden müssen, können die Wetterlageninformationen aus den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle abgeleitet werden. Zur Beantwortung der Ausgangsfrage kann die Auswertung der regionalen Klimaszenarienrechnungen problemspezifisch eingengt werden. Die regionalen Klimamodelle liefern aufgrund interner Variabilität für verschiedene Rechenläufe bei gleichem Emissionsszenario (z.B. A1B) durchaus unterschiedliche Resultate. Um sich von den Zufälligkeiten einer bestimmten Realisierung eines regionalen Klimaszenarios zu lösen ist es empfehlenswert, die Ergebnisse dieser Rechnungen statistisch zu analysieren und daraus die notwendigen Eingangsgrößen für das mesoskalige Modell zu generieren. Die aus den Zeitreihen berechneten Häufigkeitsverteilungen für Wind, Temperatur usw. liefern neben der Aufteilung in entsprechende Werteabschnitte auch die Eckpunkte (niedrigster Wert, höchster Wert), innerhalb derer sich die regionalen Ergebnisse für alle Tage der nächsten 100 Jahre bewegen (Abb. 8).

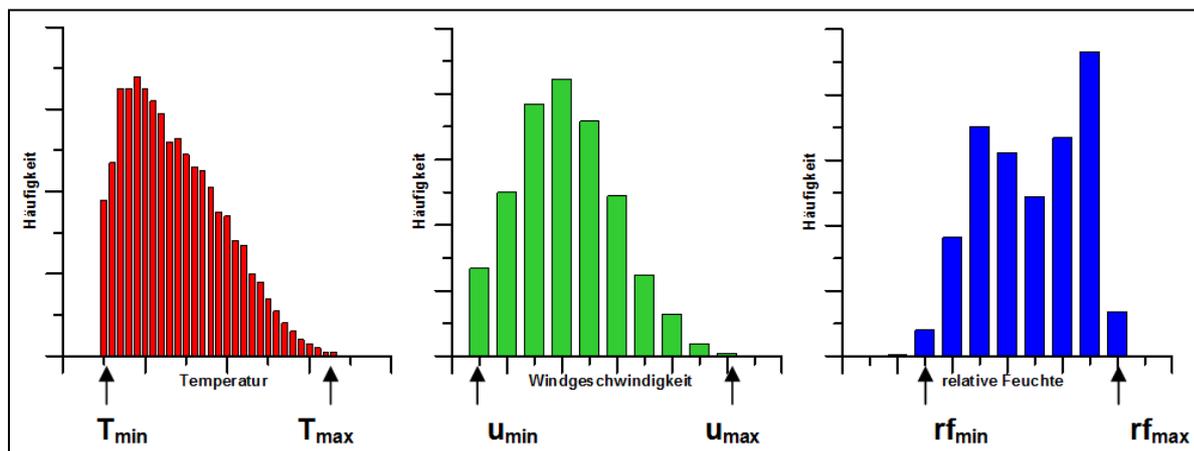


Abb. 8: Häufigkeitsverteilungen von Temperatur, Wind und relativer Feuchte für den Zeitraum bis 2100

Werden diese Auswertungen für die regionalen Variablen Wind, Temperatur und Dampfdruck durchgeführt, so spannen die daraus abgeleiteten Extremwerte (Minimum und Maximum) einen Raum auf, in dem sich z.B. die 14 Uhr Situationen in der Zukunft im Sommer abspielen (Abb. 10). Alle berechneten regionalen meteorologische Situationen liegen innerhalb dieses Raumes und werden von den Seitenflächen eingehüllt (engl.: „envelope“=Umhüllende). In Anlehnung an ein vom Deutschen Wetterdienst vorgestelltes Verfahren (Roos et al. 2009) werden für die größerskaligen meteorologischen Situationen, die durch die acht Eckpunkte des Würfels definiert sind, die Verteilungen der lokalen Wind-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse mit dem mesoskaligen Modell berechnet. Dabei bilden die mit dem mesoskaligen Modell berechneten Temperaturen in 2 m über Grund für verschiedene regionale Szenarien (u_{min} , T_{min} , r_{min} bzw. u_{max} , T_{max} , r_{max}) die Grundlage für die weitere Bearbeitung.

Basierend auf den Häufigkeitsverteilungen von Wind, Temperatur und relativer Feuchte (Abb. 8) des Regionalmodells wird eine große Anzahl von meteorologischen Situationen (Wetterlagen) festgelegt, die in ihrer statistischen Gesamtheit die Einzelverteilungen (Abb. 9) wiedergeben. Diese Vorgehensweise befreit von den individuellen Ergebnissen eines Szenarienlaufs des regionalen Modells, die für eine andere Realisierung durchaus abweichen kann. Die Bestimmung der Verteilungen von Wind, Temperatur und Dampfdruck für einen Untersuchungsraum für eine bestimmte meteorologische Situation der regionalen Klimarechnung erfolgt nunmehr nicht durch eine eigene mesoskalige Rechnung für diese Wetterlage, sondern aus der anteilmäßi-

gen Wichtung der Resultate der mesoskaligen Simulationen für die acht Eckpunkte des Würfels, der die Gesamtheit aller Wetterlagen des ausgesuchten Zeitabschnittes (z.B. Sommer, Dekade) umspannt (Abb. 11). Dabei wird jeweils eine lineare Änderung vorausgesetzt, was für einzelne, ausgewählte Situationen möglicherweise nur eine grobe Näherung darstellt.

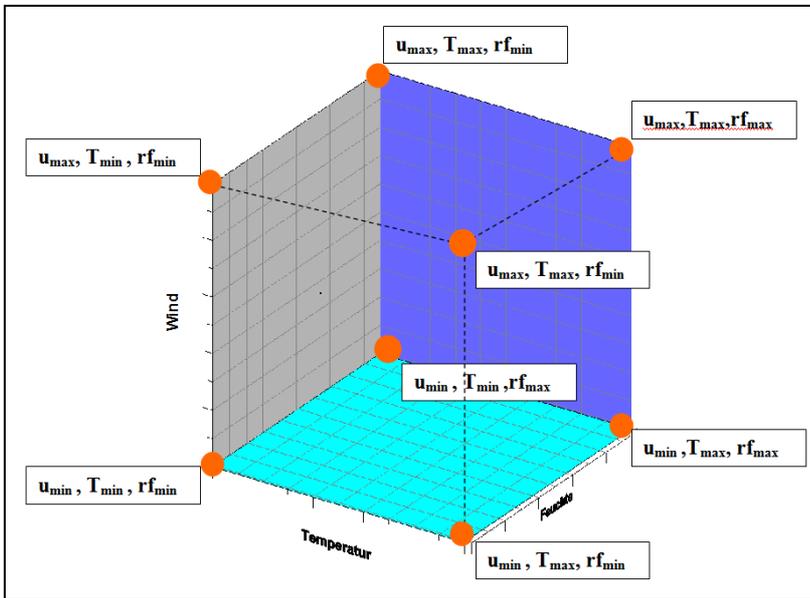


Abb. 9: Begrenzungsraum für die ausgesuchten Wettersituationen

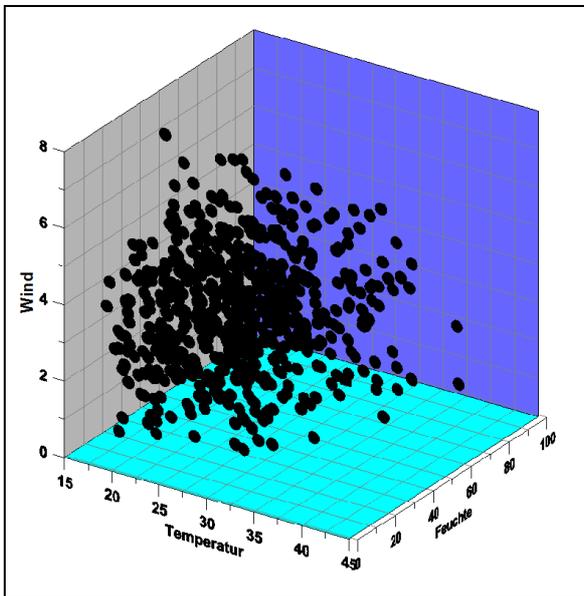


Abb. 10: Verteilung der 14-Uhr Situationen im Zustandsraum

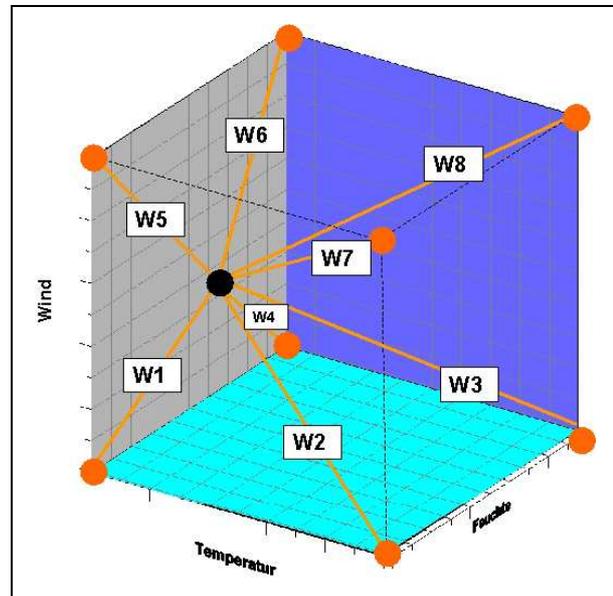


Abb. 11: Schema zur Berechnung der meteorologischen Variablen für einzelne Wettersituationen aus den Ergebnissen der 8 Basissimulationen

Für jeden Tag eines ausgesuchten Zeitfensters (z.B. Jahrhundert, Dekade) kann die räumliche Verteilung von beispielsweise Wind, Temperatur und Feuchte in einem Untersuchungsraum berechnet und daraus beispielsweise der PMV-Wert als Kriterium für die Wärmebelastung des Menschen abgeleitet werden. Anhand der Einzelergebnisse kann schließlich auch die Gesamtzahl der Tage mit Wärmebelastung pro Jahr bestimmt werden.

Betrachtetes Klimaszenario

Vom IPCC sind verschiedene Zukunftsszenarien entwickelt worden, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen entwickeln könnte. In Abhängigkeit von diesen Emissionsszenarien, in welche u.a. die Bevölkerungsentwicklung und das wirtschaftliche Wachstum eingehen, wurden entsprechende Klimaprojektionsrechnungen durchgeführt (Abb. 12).

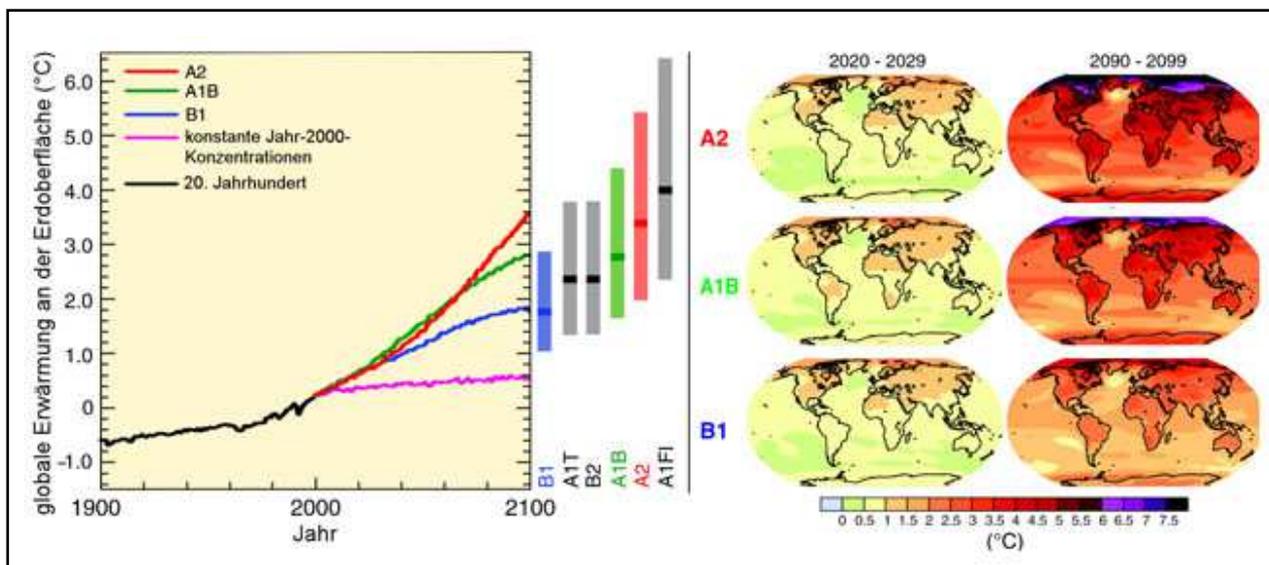


Abb. 12: Klimaszenarien und prognostizierter globaler Temperaturverlauf (Quelle: IPCC 2007)

Der IPCC veröffentlichte im Jahr 2000 einen Sonderbericht zu insgesamt ca. vierzig Szenarien, welche im „Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES) zusammengefasst wurden. Diese stellen die Grundlage für die Klimamodellierungen des vierten Sachstandsberichts (2007) dar. Das für die Regionalisierung der Klimawandelszenarien auf die Stadt Hamburg zugrunde liegende Szenario „A1B“ geht von einem schnellen wirtschaftlichen Wachstum und einer gleichzeitigen Nutzung fossiler und regenerativer Energieträger aus. Im Hinblick auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen insgesamt nimmt es unter den betrachteten Szenarien eine vermittelnde Stellung ein und wird daher oft für Klimaprojektionen als Referenz herangezogen.

Bei den Unsicherheiten von Prognosen muss bedacht werden, dass die Startwerte für komplexe meteorologische Modellrechnungen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies gilt einerseits für die angenommenen Treibhausgasemissionen, andererseits aber auch für die zukünftige Entwicklung der das Klima bestimmenden natürlichen und anthropogenen Faktoren wie die Landnutzung. Darüber hinaus kann das reale Klimasystem durch ein mathematisches Modell nicht exakt wiedergegeben werden. Mit der Durchführung mehrerer Modellrechnungen mit jeweils leicht veränderten Start- und Randwerten (Ensembletechnik) und der Kombination unterschiedlicher Modelle lassen sich für die Klimaszenarien Grundtendenzen ermitteln und die Unsicherheit eingrenzen. Für die Regionalisierung von Klimawandelszenarien mit dem Mesoskalenmodell FITNAH werden daher die Ergebnisse nicht für ein einzelnes Jahr sondern für einen längeren Zeitraum von bis zu 10 Jahren berechnet. Mit dem Zeitraum 2001 bis 2010 wird die jetzige Situation als Basisszenario beschrieben, während im Zeitraum 2046 bis 2055 als Zukunftsszenario zur Mitte des Jahrhunderts der Einfluss des Klimawandels deutlich wird.

Da erst durch das Downscaling eine feine Auflösung der Nutzungsstrukturen möglich wird, steht für die Übertragung auf die Mesoskalenebene die Relation der Ausprägung meteorologischer Parameter zwischen den einzelnen Nutzungsstrukturen im Vordergrund.

3. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Das Untersuchungsgebiet untergliedert sich in das ca. 747 km² große Stadtgebiet von Hamburg sowie einen Ausschnitt der angrenzenden Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Insgesamt ergibt sich daraus ein 1560 km² großes Untersuchungsgebiet, wobei die Ausdehnung 40 km x 39 km beträgt. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 50 m.

3.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) 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 (vgl. Abb. 13 bzw. Karte 1.1).

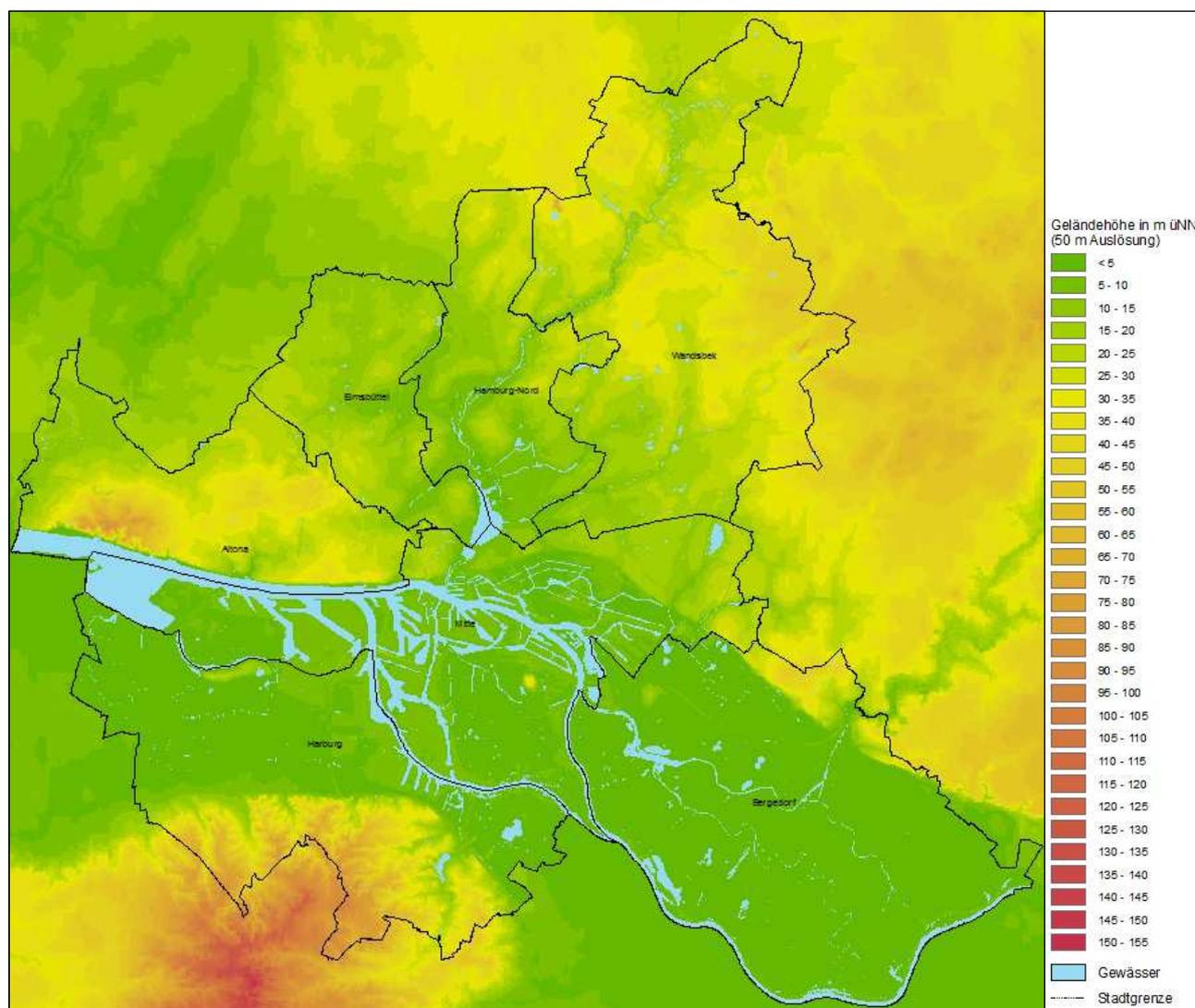


Abb. 13: Geländehöhe im Untersuchungsraum

Die höchste Erhebung im Stadtgebiet Hamburg ist mit ca. 116 m ü. NN der Hasselbrack in den Harburger Bergen. Der mit mehr als 150 m ü. NN höchste Geländepunkt des Modellgebietes liegt hingegen weiter süd-

lich außerhalb von Hamburg. Die niedrigsten Geländehöhen sind mit weniger als 5 m vor allem in den Bereichen Billwerder, Altes Land und Wilhelmsburg anzutreffen. Somit ergibt sich eine maximale Höhendifferenz von etwa 150 m innerhalb des Untersuchungsraumes.

3.2 Nutzungsstruktur

Für die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen wurde die Biotoptypenkarte der Stadt Hamburg herangezogen und durch neuere Daten zur Bebauungsstruktur wie z.B. Bebauungspläne ergänzt (STADT HAMBURG 2009). Im Anschluss wurde eine Überprüfung und teilweise auch eine Aktualisierung der Nutzungsdaten auf Basis von Luftbildern (Stand 2008) durchgeführt. Eine Korrektur der Nutzungsstrukturen war lokal vor allem im Raum Finkenwerder und Wilhelmsburg im Bereich erweiterter Gewerbeflächen bzw. Verkehrsinfrastruktur notwendig. Für die Areale außerhalb des Stadtgebietes, für die keine detaillierten Nutzungsdaten vorlagen, sind Corine-Landnutzungsinformationen zum Aufbau der Geodatenbasis herangezogen worden (EUROPEAN COMMISSION 1994). Die Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet zeigt Abbildung 14:

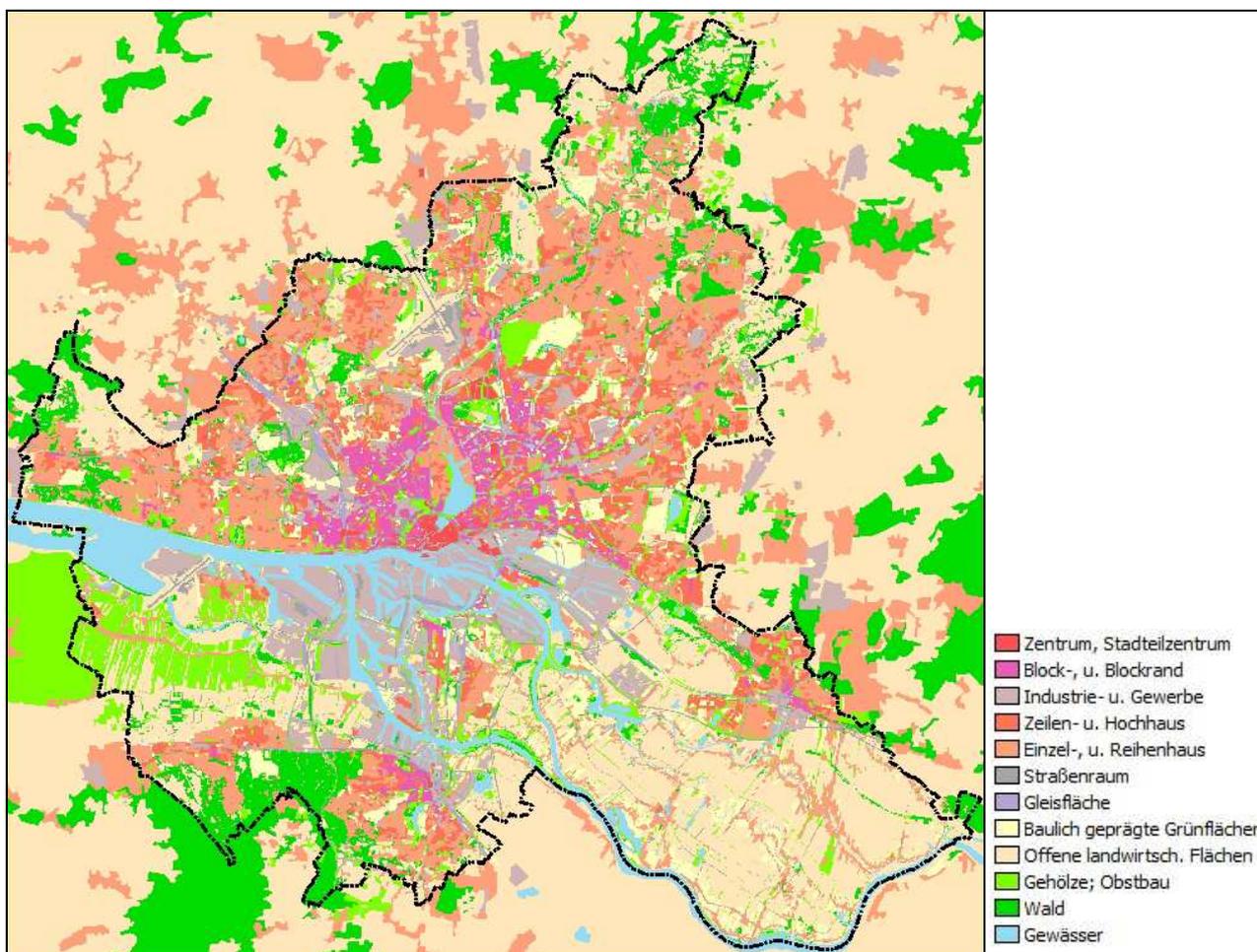


Abb. 14: Untersuchungsraum der Klimamodellierung

Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurden bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen die insgesamt 376 Biotoptypen zu einem 12-klassigen Nutzungsschlüssel aggregiert. Im Anschluss erfolgte eine Verschneidung der Siedlungsbereiche mit den vorliegenden Blockflächen, um somit auch die Straßenräume besser abgrenzen zu können. Die Tabelle 3 fasst die verwendeten Nutzungskategorien zusammen (vgl. auch Karte 1.2).

Klasse	Flächentyp	Beschreibung
1	Zentrumsbebauung	Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist.
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.
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. Dabei weisen insbesondere die ausgedehnten Hafensareale einen hohen Anteil ebenerdig versiegelter Fläche auf. Dies umfasst zudem die Containerstellflächen der vier großen Containerterminals.
4	Zeilen- und Hochhausbebauung	Zu diesem Flächentyp zählen sowohl freistehende Punkthochhäuser als auch halboffene Blockrandbebauung und Zeilenbebauung. Darüber hinaus sind häufig auch Gemeinbedarfsflächen und Kirchen dieser Kategorie zugeordnet worden. Gemeinsames Merkmal ist ein relativ hoher Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt.
5	Einzel- und Reihenhausbauung	Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbauung und einer Zeilenbebauung ist fließend.
6	Straßenraum	Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.
7	Gleisfläche	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe. Bereiche mit relevantem Gebäudebestand wie z.B. größere Bahnhöfe wurden meist separat ausgewiesen und als Industrie- und Gewerbefläche klassifiziert.
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.
9	Freiland	Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.
10	Gehölz	Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün.
11	Wald	Größere Waldflächen des Umlandes sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.
12	Wasserfläche	Still- und Fließgewässer.

Tabelle 3: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Für die Simulation ist allerdings 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. Es ist daher möglich, dass die zugewiesene Nutzungskategorie nicht in allen Fällen auch der jeweiligen Realnutzung entspricht. Beispielsweise sind die großflächigen Tanklager südlich des Kattwykdamms (Wilhelmsburg) in der Biotoptypenkarte als Industrieareale mit einem einheitlichen Versiegelungsgrad von 80 % bis 100 % ausgewiesen. Gleichzeitig weisen sie aber auch ausgedehnte grüngerprägte Abstandsflächen auf.

Da diese innere Differenzierung auch die (stadt-) klimatische Wirkung einer Einzelfläche beeinflusst, sind solche Areale nach Möglichkeit separat erfasst worden und aufgrund des geringeren Versiegelungsgrades z.B. als baulich geprägte Grünflächen in die Modellrechnung eingegangen. Durch Einbeziehung der Luftbilder konnte bei der Aufbereitung der Eingangsdaten zumindest in Teilräumen die Differenzierung der Nutzungsstrukturen deutlich erweitert und die Qualität der Eingangsdaten insgesamt erhöht werden.

Die Information zum Versiegelungsgrad wurde von der digitalen Versiegelungskarte (Stand 2008) im GIS direkt auf das Raster der Modellrechnung übertragen und, falls erforderlich, lokal nach Überprüfung im Luftbild angepasst (z.B. Heiligen-Geist-Feld). Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen dar, die einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausübt. Das von der BSU zur Verfügung gestellte 3-D-Modell auf Grundlage der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) beinhaltet sowohl die Geometrie der Gebäude als auch deren Höhe. Auf Grundlage des Gebäudekatasters wurde dem 50 m Raster der Modellrechnung eine mittlere Strukturhöhe zugewiesen. Da in der Biotoptypenkarte keine Angaben zu den Strukturhöhen der Grünflächen enthalten sind, wurde für die Einordnung deren Strukturhöhe nutzungsklassifiziert vorliegende Literaturdaten (u.a. MOSIMANN et al. 1999) genutzt, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen beruhen. Hinsichtlich der Wassertemperatur der Elbe wurde ein für die Sommermonate (Juni, Juli und August) repräsentativer mittlerer Wert der Messstelle Seemannshöft herangezogen. Außerdem wurden auf dem Gelände der vier großen Containerterminals auch die ausgedehnten Containerstellflächen separat erfasst. Da die gestapelten Container aufgrund ihrer Menge das oberflächen-nahe Strömungsfeld ähnlich wie Gebäude beeinflussen, sind sie mit einer mittleren Strukturhöhe (3 gestapelte Container) in die Modellrechnung eingebunden worden.

Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. Für die Modellrechnung zum Kaltlufthaushalt, auf dessen Grundlage die Klimafunktions- und Planungshinweiskarte beruht, ist eine einheitliche Rasterauflösung von 50 m x 50 m verwendet worden. Hinsichtlich der gesamtstädtischen Maßstabsebene des Landschaftsprogramms und unter Berücksichtigung der Größe des Untersuchungsraumes ist die verwendete Auflösung gut geeignet, die Stadtstrukturen adäquat abzubilden.

Flächenkulisse der Klimawandelszenarien

Während für die Modellrechnung zum *nächtlichen Kaltlufthaushalt* auch die in Planung bzw. Bau befindlichen Flächennutzungsänderungen aufgenommen wurden, weicht die Flächenkulisse für die Simulation der *Klimawandelszenarien* davon ab. Um die Zunahme der baulichen Nutzungen insgesamt adäquat bewerten zu können, stellt das Basisszenario für den Zeitraum 2001 bis 2010 nur die gegenwärtige Situation dar. Im Szenario 2046 bis 2055 wird hingegen die Flächenkulisse des geltenden Landschaftsprogramms als Grundlage für das Zukunftsszenario herangezogen und um sämtliche in Planung befindlichen FNP-Flächen, PAUL-Flächen (Potentialflächen Wohnen und Gewerbe) sowie die Hafenerweiterungsareale Zone I und II ergänzt. Für das

Zukunftsszenario ist darüber hinaus eine weitere bauliche Verdichtung von + 10 % für alle Siedlungsflächen außer dem Innenstadtbereich angenommen worden.

Insgesamt gesehen ergibt sich die Herausforderung, sehr langfristige Flächennutzungsprognosen für Hamburg bis zur Mitte des Jahrhunderts zu treffen. Zudem sind die Trends weiterer Faktoren wie z.B. der Bevölkerungsentwicklung und deren räumlichen Verteilung nur schwer zu prognostizieren. Um diesem Maß an Variabilität gerecht zu werden, ist die Rasterauflösung der Klimawandelberechnungen gegenüber der Simulation des Kaltlufthaushaltes von 50 m x 50 m auf 200 m x 200 m verringert worden. Diese Auflösung ist weiterhin geeignet, die räumlichen Veränderungen in der Ausprägung siedlungsklimatisch relevanter Parameter unter dem Einfluss des Klimawandels abzubilden.

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. Diese Zusammenhänge sind unter anderem von SCHLÜNZEN et al. (2008) in Hamburg messtechnisch erfasst worden. Der städtische Wärmeinseleffekt wurde anhand mehrerer innerstädtischer Stationen sowie einer ländlichen Referenzstation quantifiziert. Für den Jahresmittelwert konnte er zwischen der Station St. Pauli und der Umlandstation auf 1 °C ermittelt werden. Bei den durchschnittlichen Minimumtemperaturen zeigt sich mit 3 °C im Zeitraum Mai bis Oktober eine noch stärkere Abweichung, was auf den Wärme speichernden Effekt der Stadtstrukturen zurückzuführen ist.

Die absolute Dauer autochthoner Wetterlagen während der Sommermonate Juni, Juli und August in Prozent der Stunden ist im Rahmen der vorliegenden Untersuchung für den Standort HH-Fuhlsbüttel ausgewertet worden. Dabei wurde eine solche Wettersituation beispielhaft mit einer Windgeschwindigkeit < 2 Bf (entspricht ca. 3,3 m/s) sowie einem Wolkenbedeckungsgrad von < 4/8 als Abgrenzungskriterien betrachtet. Abbildung 15 zeigt einerseits die an der Station des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2011) von 1962 bis 2009 gemessenen Werte (grüne Farbe), andererseits sind die unter dem Einfluss des zu erwartenden Klimawandels simulierten Ergebnisse bis 2100 dargestellt (Orange; Modell CLM mit dem Klimawandelszenario A1B). Bei den gemessenen Werten lässt sich eine große Spannweite beobachten, die zwischen 2 % der Stunden im Jahr 1975 und 30 % im Jahr 1984 liegt. Das arithmetische Mittel für den Zeitraum 1962 bis 2009 beträgt 11 %.

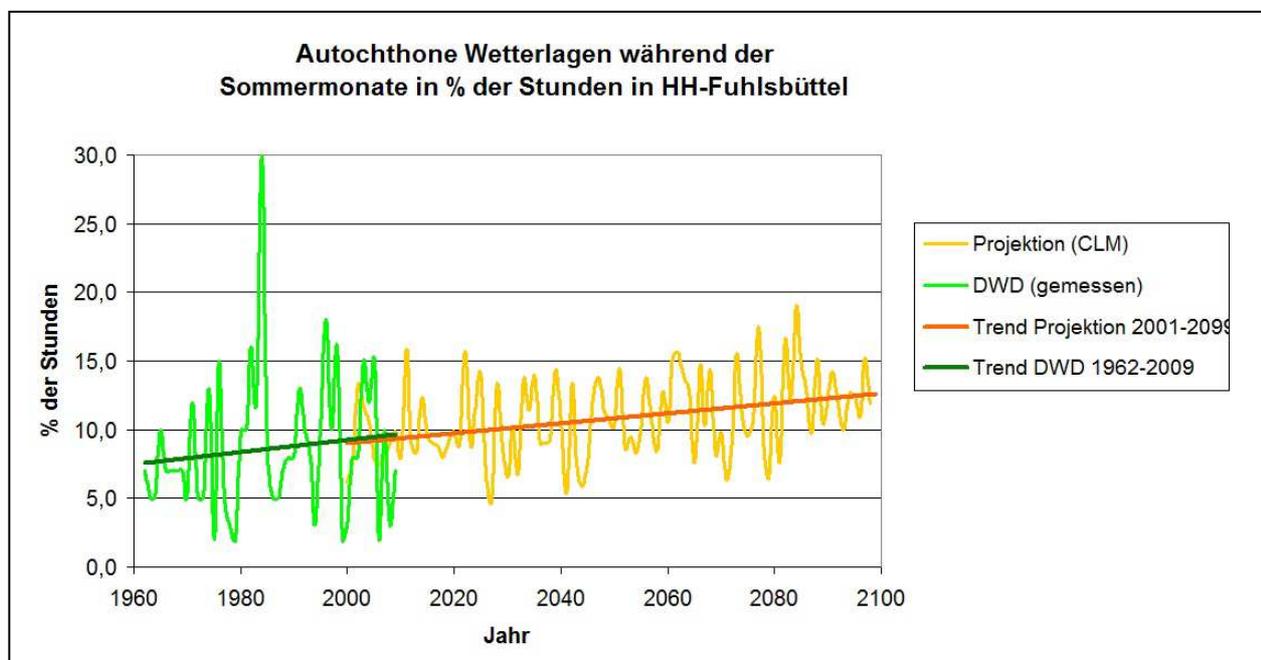


Abb. 15: Absolute Dauer autochthoner Wetterlagen in HH-Fuhlsbüttel in den Monaten Juni, Juli und August

Anhand der gemessenen Daten lässt sich ableiten, dass die absolute Dauer autochthoner Wetterlagen in den vergangenen 50 Jahren stetig zugenommen hat. Dieser Trend setzt sich auch in den Ergebnissen des Klimawandelszenarios weiter fort.

Es ist zu erwarten, dass damit auch die Wahrscheinlichkeit eines Andauerns von Wetterlagen mit bioklimatischen und ggf. auch lufthygienischen Belastungen bis zum Ende des Jahrhunderts weiter ansteigen wird. Die Ergebnisse der Klimaanalyse liegen für den Beginn der Nacht (22 Uhr) sowie die zweite Nachthälfte (04 Uhr) vor. Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens erläutert und am Beispielraum Stadtpark vertieft. Zu diesem Zeitpunkt haben sich auch die Luftaustauschprozesse am Stadtrand voll ausgebildet. Die Ergebniskarten für das gesamte Stadtgebiet Hamburg sind für beide Zeitschnitte in den Klimaanalysekarten dargestellt..

4.1 Kaltlufthaushalt

4.1.1 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 8 °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 aerodynamischer 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. verringern die Wärmeabstrahlung des Bodens) 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 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 gehölzbestandenen Grünflächen, eher milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können daher 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 Temperatur-

amplitude 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. Die Wassertemperatur der Elbe ist mit einem durchschnittlichen Wert für die Sommermonate in die Modellrechnung eingegangen (s. Kap. 3.2, S. 21). 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. Wie bereits in Kap. 2.3.1 (S. 9) beschrieben, wurden die Ergebnisse zu Beginn (22 Uhr - Karte 1.3) und zum Ende (04 Uhr - Karte 1.4) einer windschwachen Sommernacht ausgewertet. Hintergrund ist die zeitlich versetzte Kalt-/Frischlufthlieferung der innerstädtischen Grünflächen in der ersten Nachthälfte einerseits und der peripheren, eher umlandbezogenen Kaltluftentstehungsflächen andererseits. Im Folgenden wird das gesamtstädtische Temperaturfeld exemplarisch für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens erläutert (Abb. 16). Für den Vertiefungsbereich Stadtpark werden die Ergebnisse beider Zeitschnitte in Abb. 17 (S. 27) vergleichend dargestellt.

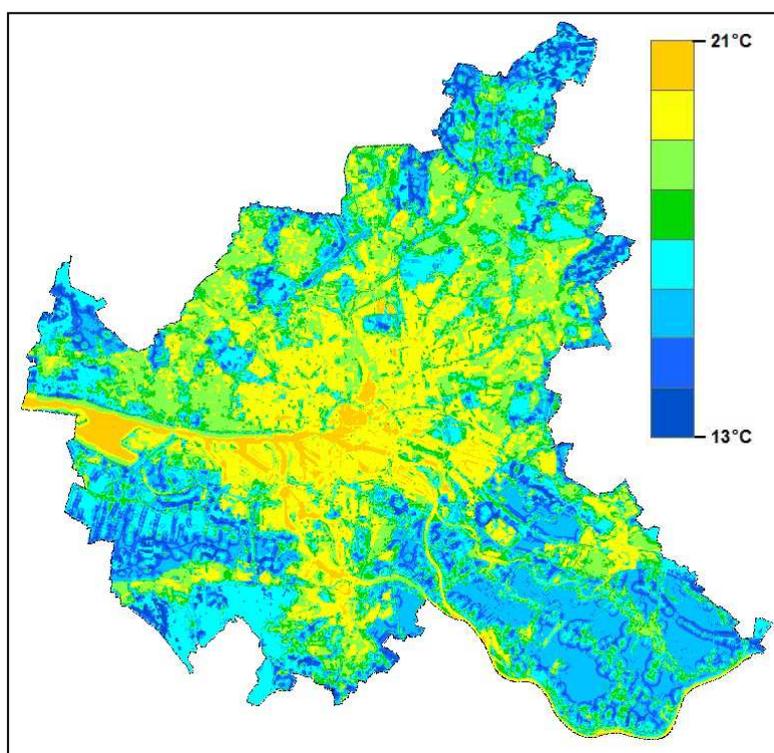


Abb. 16: Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund)

Ergebnisse Temperaturfeld: Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 11,5°C und Maximalwerten von 21°C eine Spannweite von etwa 9,5 °C¹. Die mittlere Temperatur des Untersuchungsgebietes liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17,3°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 weist vor allem die Zentrumsbebauung der Innenstadt Temperaturen von mehr als 20°C auf und geht mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung von bis zu 95% einher (Abb. 16). Diese Temperaturen sind, wenn auch weniger flächenhaft ausgeprägt, ebenso im Stadtteilzentrum der Altonaer Altstadt und der City-Nord anzutreffen. Die sich an den Innenstadtbereich anschließende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 19°C bis 20°C ebenfalls ein erhöhtes Temperaturniveau. Dies trifft auch für die Gewerbeflächen und Hafenanlagen zu, die von Waltersdorf über Steinwerder bis nach Billbrook große Areale einnehmen.

Diese Temperaturen sind, wenn auch weniger flächenhaft ausgeprägt, ebenso im Stadtteilzentrum der Altonaer Altstadt und der City-Nord anzutreffen. Die sich an den Innenstadtbereich anschließende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 19°C bis 20°C ebenfalls ein erhöhtes Temperaturniveau. Dies trifft auch für die Gewerbeflächen und Hafenanlagen zu, die von Waltersdorf über Steinwerder bis nach Billbrook große Areale einnehmen.

¹ Entsprechend DIN werden Temperaturdifferenzen in Kelvin (Einheitenzeichen: K) wiedergegeben. Zum besseren Verständnis werden diese Werte im Folgenden in Grad Celsius (°C) angegeben.

Große Bereiche des Hamburger Siedlungsraumes sind aber auch durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbauung geprägt. Diese Baustruktur weist unter den Siedlungsflächen das geringste Temperaturniveau auf, wobei 19°C selten überschritten werden. In den dörflich geprägten Stadtteilen Hamburgs wie z.B. Neuenfelde oder Moorfleet betragen die Lufttemperaturen nur noch zwischen 17°C und 18°C. Darüber hinaus zeigen die Verkehrsflächen, abhängig vom Versiegelungsgrad, Temperaturen zwischen 18°C und 19°C.

Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor, wobei auf ihre Rolle als Kaltluft produzierende Flächen auch in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als 14°C über den ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen am Stadtrand anzutreffen, was in der starken langwelligeren Ausstrahlung nach Sonnenuntergang begründet liegt. Die geringsten Werte von 12,5°C bis 13°C treten meist in Senkenbereichen auf, wo sich die Kaltluft aufgrund ihrer höheren Dichte sammelt. Aber auch Waldareale besitzen in Abhängigkeit von der Höhenlage ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau von 16°C bis 17°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, ein höheres Wertespektrum auf, welches meist zwischen 16°C und 18°C beträgt. Über den weiteren, kleineren Grünflächen sinkt die Temperatur nur noch selten auf weniger als 17°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. Insgesamt gesehen treten die vegetationsgeprägten Landschaftsachsen im Stadtgebiet Hamburg mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen hervor.

Lufttemperatur - Beispiel Stadtpark

Zu den größten städtischen Grünflächen zählt mit etwa 140 ha der Stadtpark, welcher von Gehölzen und Bäumen bestanden ist und zugleich in seinem zentralen Bereich auch eine Wiesenfläche aufweist. Dies geht mit einer entsprechend heterogenen Ausprägung der oberflächennahen Lufttemperaturen einher. In Abb. 17 sind die oberflächennahen Lufttemperaturen für die Zeitschnitte 22 Uhr und 04 Uhr gegenübergestellt.

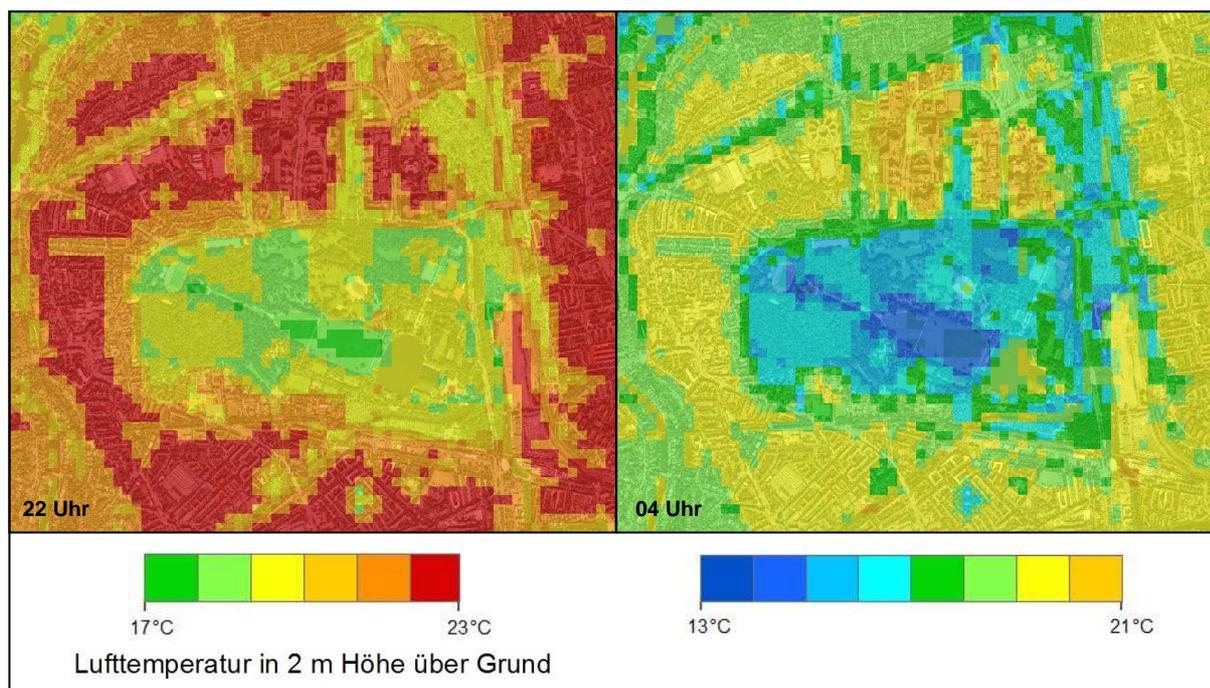


Abb. 17 Temperaturfeld zu den Zeitpunkten 22 Uhr abends und 4 Uhr morgens im Bereich des Stadtparks

Zu beiden Zeitpunkten sind die niedrigsten Werte von etwa 17°C (22 Uhr) bzw. 13,5°C (04 Uhr) aufgrund der ungehinderten Ausstrahlung und damit der intensivsten Abkühlung über dem ausgedehnten Wiesenareal in der Mitte des Parks vorzufinden.

Über den anderen Teilflächen des Stadtparks beträgt die Lufttemperatur zwischen 18°C bis 20°C zu Beginn der Nacht bzw. nur noch 15°C bis 17°C in der zweiten Nachthälfte. Hier dämpft der vorhandene Gehölz- und Baumbestand die Auskühlung der Erdoberfläche.

Zum 22 Uhr-Zeitpunkt (Karte 1.3) treten die Siedlungsflächen mit einem einheitlich hohen Temperaturniveau von mehr als 20°C hervor (rote Farbe), wobei zu Beginn einer Sommernacht die Abgabe der tagsüber gespeicherten Wärmeenergie an die Atmosphäre noch am stärksten ist. Gleichzeitig wird die abkühlende Wirkung des Stadtparks als „Saum“ mit geringeren Temperaturen im näheren Umfeld des Stadtparks vor allem im Westen und Süden sichtbar (Orange).

In der zweiten Nachthälfte (04 Uhr - Karte 1.4) differenzieren sich die Nutzungsstrukturen deutlicher heraus. Während im Bereich der City-Nord aufgrund des Bauvolumens mit mehr als 20°C die höchsten Lufttemperaturen auftreten (Orange), sind innerhalb der den Stadtpark umrahmenden Block- und Blockrandbebauung noch Werte zwischen 19°C und 20°C zu beobachten (Gelb). Innerhalb der durchgrünten Stadthausbebauung entlang der Alster gehen diese auf 18°C bis 19°C weiter zurück (hellgrüne Farbe). Damit ergibt sich ein Temperaturgradient von bis zu 6,5 °C auf etwa 900 m Distanz, welcher den „Antrieb“ für die nächtlichen Flurwinde darstellt (vgl. Kap. 4.1.2).

4.1.2 Autochthones Windfeld

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

Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen, welche meist im Süden des Stadtgebietes Hamburgs auftreten, bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 18). Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. KIESE et al. 1992).

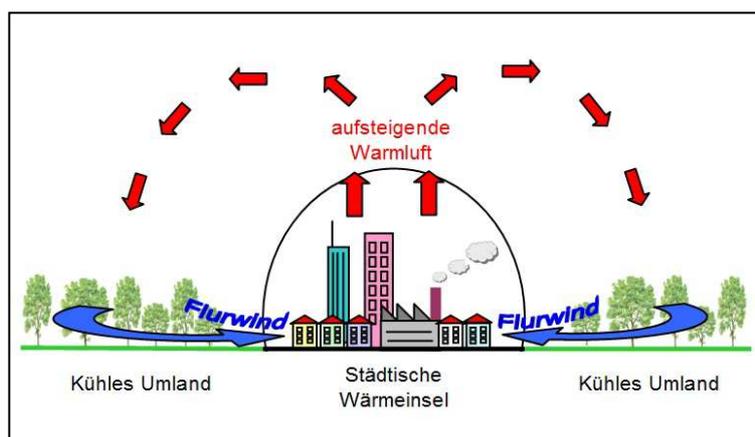


Abb. 18: Prinzipskizze Flurwind

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

Ergebnisse Strömungsfeld:

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (Karte 1.6) eingegangen. Die Ergebnisse für den Zeitpunkt 22 Uhr sind Karte 1.7 zu entnehmen.

Die Ergebniskarten stellen das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 200 m (16 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 $\geq 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Untersuchungsraums reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ über den ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im südlichen Stadtgebiet Hamburgs. Die räumliche Ausprägung der Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr im Stadtgebiet zeigt Abb. 19 als Raster. Auftretende Hangneigungen mit mehr als 1° führen lokal zu Kaltluftabflüssen, welche gegenüber den rein thermisch angetriebenen Flurwinden meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten aufweisen. Diese treten vor allem im Umfeld der Harburger Berge auf, sind aber auch über Teilen des Stadt- bzw. Volksparks vorzufinden. Überdurchschnittlich hohe Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sind zudem über der Elbe westlich der Airbus-Werft zu beobachten, wobei die über dem warmen Wasserkörper aufsteigenden Luftmassen durch bodennah zuströmende Kaltluft ersetzt wird und einen dementsprechend starken Luftaustausch bewirkt. Als Kaltluftliefergebiet ist hier vor allem der Stadtteil Blankenese zu nennen. Im Umfeld der größeren innerstädtischen Grünflächen liegen die Strömungsgeschwindigkeiten in einer Größenordnung von verbreitet $0,5$ bis $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Die Strömungsgeschwindigkeiten der von kleineren Grünflächen ausgehenden Flurwinde sind mit $0,2$ bis $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ deutlich geringer. Damit Grünflächen überhaupt einen Flurwind ausbilden können, sollten sie eine Mindestgröße von etwa 1 Hektar aufweisen (SCHERER 2007).

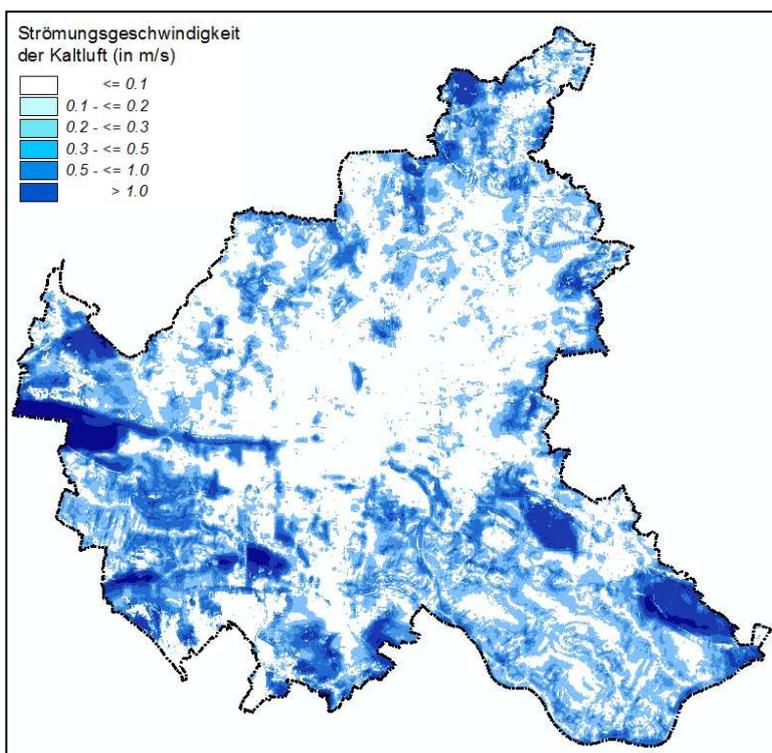


Abb. 19: Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten aufweisen. Diese treten vor allem im Umfeld der Harburger Berge auf, sind aber auch über Teilen des Stadt- bzw. Volksparks vorzufinden. Überdurchschnittlich hohe Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sind zudem über der Elbe westlich der Airbus-Werft zu beobachten, wobei die über dem warmen Wasserkörper aufsteigenden Luftmassen durch bodennah zuströmende Kaltluft ersetzt wird und einen dementsprechend starken Luftaustausch bewirkt. Als Kaltluftliefergebiet ist hier vor allem der Stadtteil Blankenese zu nennen. Im Umfeld der größeren innerstädtischen

Grünflächen liegen die Strömungsgeschwindigkeiten in einer Größenordnung von verbreitet $0,5$ bis $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Die Strömungsgeschwindigkeiten der von kleineren Grünflächen ausgehenden Flurwinde sind mit $0,2$ bis $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ deutlich geringer. Damit Grünflächen überhaupt einen Flurwind ausbilden können, sollten sie eine Mindestgröße von etwa 1 Hektar aufweisen (SCHERER 2007).

Die Eindringtiefe der Kaltluft in die Siedlungsräume und damit auch das Maß der bioklimatischen Gunstwirkung während sommerlicher Hochdruckwetterlagen hängt ab von der Bebauungsstruktur und der Intensität der Kaltluftdynamik.

Ganz allgemein wird eine vergleichsweise gering überbaute Einzel- und Reihenhausbauung besser durchströmt als eine Block- und Blockrandbebauung. Die Spanne der Eindringtiefe beträgt zwischen 150 m im Innenstadtbereich und bis zu 1300 m im Raum Blankenese. Hier ermöglichen die über den angrenzenden ausgedehnten Freiflächen entstehenden Kaltluftvolumina einerseits und die vergleichsweise durchströmungsgünstige Einzel- und Reihenhausbauung andererseits eine flächenhafte Durchlüftung.

Große Teile der überbauten Flächen in Hamburg werden hingegen 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. Die peripheren, eher dörflich strukturierten Stadtteile von Hamburg weisen dagegen einen höheren Durchlüftungsgrad mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ auf.

Kaltluftströmungsfeld - Beispiel Stadtpark

Den Stadtpark mit seinem näheren Umfeld zeigt Abb. 20, wobei das Strömungsfeld der Kaltluft als Pfeilsignatur und die Windgeschwindigkeit als flächenhaftes Raster für den Zeitpunkt 4 Uhr dargestellt sind. Die über dem Stadtpark gebildete Kaltluft strömt vor allem in östliche Richtungen ab und dringt bis zu 350 m in die angrenzende Bebauung ein. Die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten betragen bis zu $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ über der Wiesenfläche und $0,1$ bis $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ im Bereich des Wald- bzw. Gehölzbestandes.

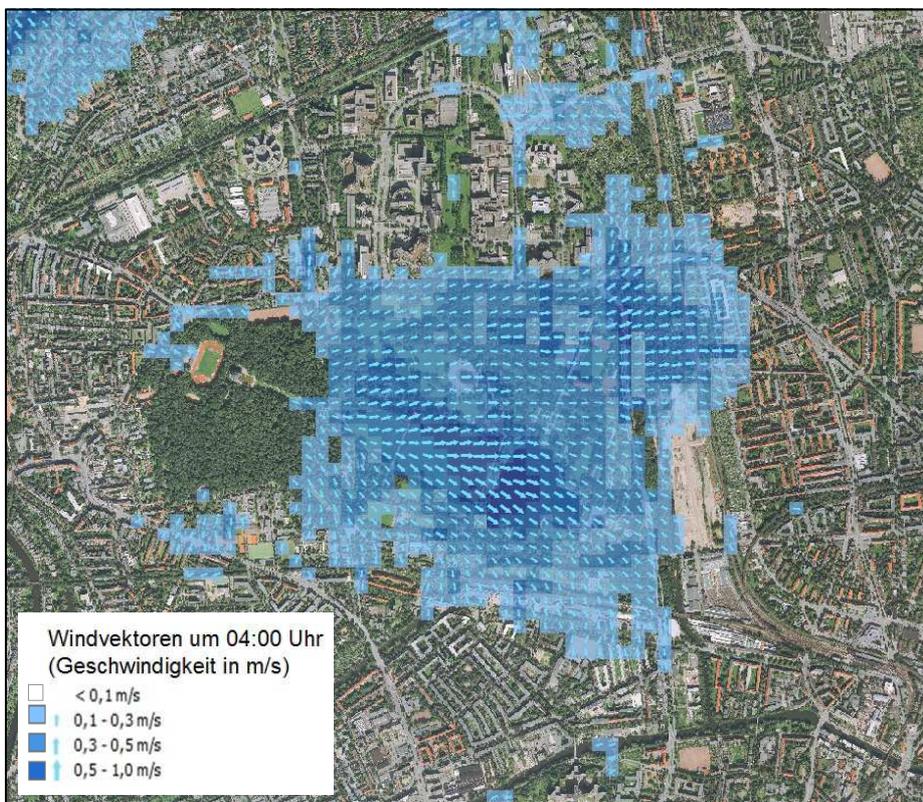


Abb. 20 Strömungsfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgen im Bereich des Stadtparks

Gleichzeitig wird auch ein östlich der City-Nord über der Kleingartenanlage gebildeter Flurwind mit einer westlichen Strömungsrichtung sichtbar. Im Vergleich zum Stadtpark ist die Strömungsgeschwindigkeit mit weniger als $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ aber schwächer ausgeprägt.

4.1.3 Kaltluftvolumenstrom

Allgemeines und Ergebnisse:

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.

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt.

Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte 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 Kaltluftschicht² bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. 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 neben der Strömungsgeschwindigkeit die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials. Die Klassifizierung des Volumenstroms orientiert sich am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Untersuchungsgebietes. Da der Kaltlufthaushalt zu Beginn der Nacht noch nicht voll ausgeprägt ist, erfolgt für den 22 Uhr (Karte 1.8) bzw. 04 Uhr Zeitpunkt (Karte 1.9) eine eigene Klassifikation, welche sich am jeweiligen Gebietsmittelwert orientiert. Die qualitative Bewertung dieses Klimaparameters zeigt Tabelle 4. Anhand der Klassenbreiten wird deutlich, wie sich die Intensität der Luftaustauschprozesse bis zur zweiten Nachthälfte erhöht.

Bewertungskategorie	Kaltluftvolumenstrom in $m^3 \cdot s^{-1}$ zum Zeitpunkt 22 Uhr	Kaltluftvolumenstrom in $m^3 \cdot s^{-1}$ zum Zeitpunkt 04 Uhr
Sehr hoch	> 900	> 4000
Hoch	500 bis 900	2000 bis 4000
Mittel	300 bis 500	1000 bis 2000
Gering	150 bis 300	500 bis 1000
Sehr gering	< 150	< 500

Tab. 4: Qualitative und quantitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des Strömungsfeldes einher, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen sehr geringen bis geringen Volumenstrom aufweisen.

² Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als $0,1 m \cdot s^{-1}$ wird

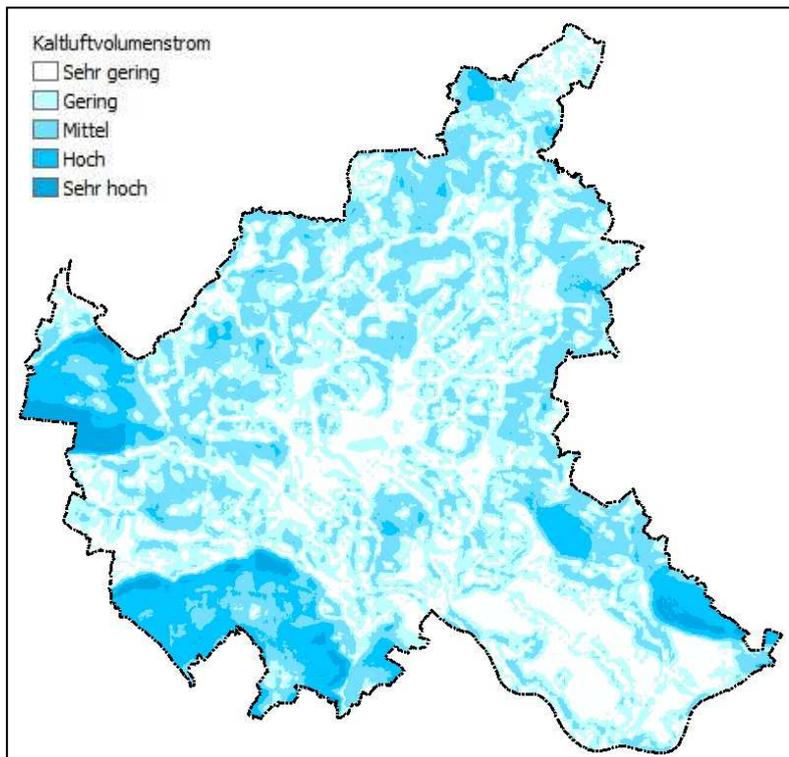


Abb. 21: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Ganz allgemein treten überdurchschnittliche Werte vor allem bei neigungsbedingten Kaltluftabflüssen und Strömungskanalierungen in Leitbahnbereichen auf. Abbildung 21 zeigt den Volumenstrom flächenhaft für das Stadtgebiet Hamburg. Die hohen bis sehr hohen Kaltluftvolumenströme sind, wie in Kap. 4.1.1 für das Strömungsfeld beschrieben, vor allem im Umfeld der Harburger Berge, Bergedorf sowie im Raum Blankenese zu beobachten. Innerhalb der an größere Grünflächen angrenzenden Wohnbebauung kann dagegen auch ein mittlerer Volumenstrom beobachtet werden, was durch wenig verdichtete Siedlungsstrukturen begünstigt wird.

4.2 Verkehrsbedingte Luftbelastung

Die durchgeführte lufthygienische Untersuchung der verkehrsinduzierten Luftschadstoffbelastung beruht auf den Daten des für das Stadtgebiet Hamburg mit dem Programm PROKAS (IVU UMWELT 2005) durchgeführten Screenings. Die darin für Abschnitte des Hauptstraßennetzes ausgewiesenen Verkehrszahlen und Emissionen wurden von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt bereitgestellt und in das Raster des numerischen Simulationsmodells FITNAH überführt. Ausgehend von den Verkehrsmengen für die jeweiligen Straßenabschnitte wurde die Ausbreitungssituation für die verkehrstypische Leitkomponente Stickstoffdioxid (NO₂) (Bezugsjahr 2009) für eine *austauscharme Wetterlage* berechnet, wie sie auch der Klimaanalyse zugrunde liegt. Die Modellierung von Immissionsfeldern geht über den punkthaften Charakter von Messungen hinaus und macht zudem die räumliche Komponente bei der Ausprägung von Luftschadstoffe deutlich. Bei der Interpretation der vorliegenden Modellergebnisse sollte allerdings berücksichtigt bleiben, dass sich diese bei einer Rasterzellenweite von 50 m x 50 m immer noch auf der Mesoskalenebene bewegen und z.B. Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst wurden. Bei der Bewertung der Modellergebnisse muss bedacht werden, dass mikroskalige Sondersituationen innerhalb der angewandten Rasterauflösung nur begrenzt wiedergespiegelt werden können. Die Immissionsbelastung wird im Rahmen der eingesetzten Methodik vor allem durch Verkehrsmenge und Fahrsituation beeinflusst. Die in Karte 1.10 (s. Kartenanhang) dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die bodennahe Schicht der Atmosphäre (= 2 m über Grund), die mit dem Aufenthaltsbereich des Menschen gleichzusetzen ist.

Die Ergebnisse charakterisieren sowohl hinsichtlich der Immissionen als auch der Wetterlage eine „Worst-Case“-Situation, so dass das Immissionsfeld in einer ersten Näherung mit der Kurzzeitbelastung verglichen werden kann. In diesem Szenario ist von einer hohen Belastungssituation auszugehen, da die atmosphärischen Verdünnungsprozesse nicht durch die übergeordnete Strömung sondern vor allem durch kleinräumig wirksame Prozesse erfolgen. Diese Windsysteme bilden sich, angetrieben durch die strukturbedingten Temperaturunterschiede, zwischen bebauten und unbebauten Flächen aus (vgl. Kap. 4.1.2). Das Immissionsfeld wird somit ausschließlich durch die Emissionssituation und die eigenbürtigen aus dem Umland bzw. Stadt- raum entstehenden Strömungssystemen geprägt. Hohe Verkehrszahlen mit entsprechenden Emissionen einerseits und eingeschränkter Luftaustausch andererseits begünstigen das Auftreten von Belastungen. Die NO₂-Immission für das gesamte Stadtgebiet Hamburg sind in Karte 1.10 flächendeckend darstellt. Ausgehend von der räumlichen Verteilung der Verkehrsmengen ergeben sich im Stadtgebiet Hamburg mehrere Belastungsschwerpunkte.



Abb. 22: NO₂-Immission im Bereich Stadtpark während einer austauscharmen Wetterlage

So sind auf den Autobahnen A 7 und A 1 mehr als 130.000 Kfz/Tag anzutreffen, während im innenstadtnahen Raum vor allem die Willy-Brandt-Straße sowie Kennedy- und Lombardsbrücke mit bis zu 70.000 Kfz/Tag befahren werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Immissionsberechnungen für NO₂ für eine austauscharme Wetterlage im Umfeld des Stadtparks dargestellt (Abb. 22). Zur besseren Abbildung der lokalen Gegebenheiten sind sie im Folgenden mit einem Luftbild hinterlegt worden.

Beispiel Stadtpark

Der Stadtpark wird von mehreren Hauptverkehrsstraßen eingerahmt, wobei der nördlich angrenzende Jahning mit bis zu 63.000 Kfz/Tag zu den überdurchschnittlich stark befahrenen Straßen gehört (Abb. 23). Die auftretenden NO₂-Immissionen liegen hier in einer Größenordnung von 90 µg/m³ bis 100 µg/m³ und können lokal auf 120 µg/m³ ansteigen. Konzentrationen von etwa 90 µg/m³ NO₂ sind östlich des Stadtparks entlang der Saarlandstraße anzutreffen, wobei die Verkehrsstärke hier 30.000 Kfz/Tag beträgt.

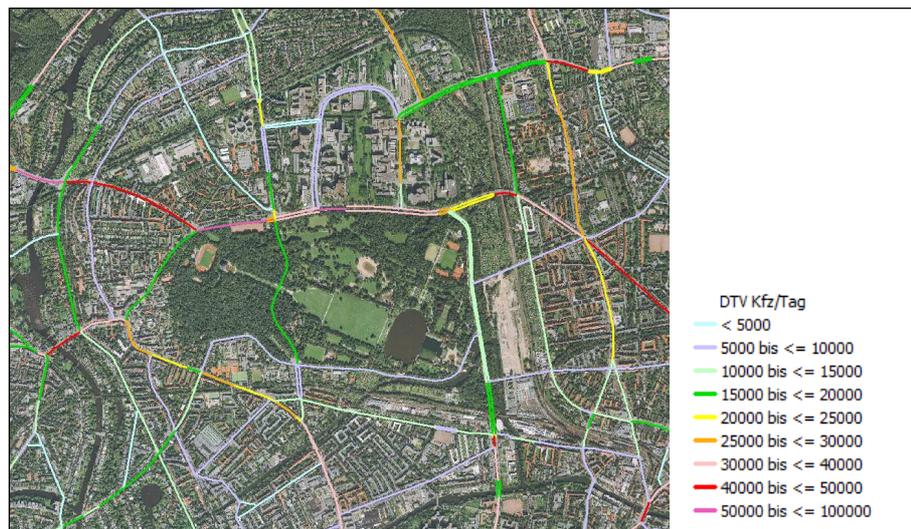


Abb. 23: Tägliche Verkehrsmenge im Bereich Stadtpark

Im Mittelpunkt der durchgeführten Ausbreitungsrechnung steht die flächenhafte Belastungssituation im Stadtgebiet Hamburg, woraus lufthygienische Belastungsschwerpunkte *innerhalb von Grünflächen* abgeleitet wurden. Wie Abb. 24 für den Bereich des Stadtparks anhand eines Luftbildes beispielhaft zeigt, geht die räumliche Ausprägung der Immissionen mit dem Kaltluftströmungsfeld einher und führt zu deren Verdriftung. Die abgebildeten Pfeile drücken die Strömungsrichtung der Kaltluft aus.

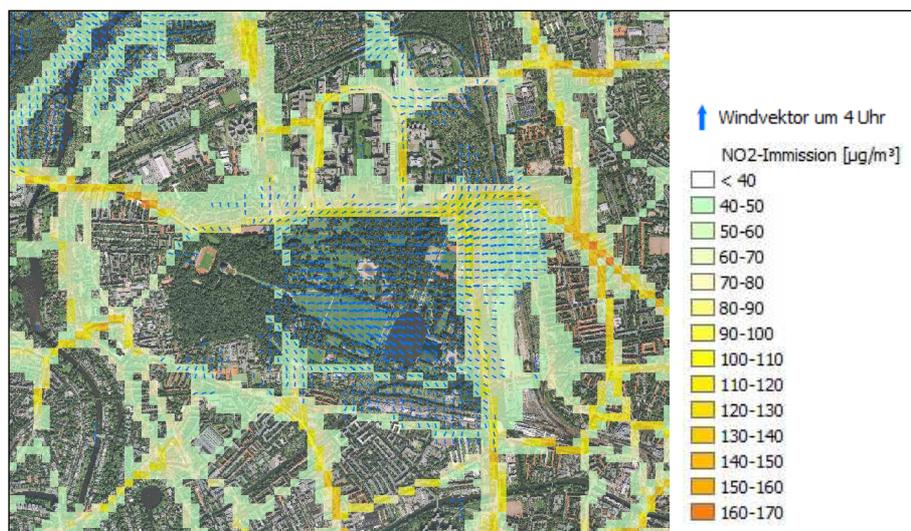


Abb. 24: NO₂-Immission und Strömungsfeld im Bereich Stadtpark

So sind die mit NO₂ belasteten Areale meist im Lee der überströmten Straßenabschnitte anzutreffen, was sich deutlich im Bereich der nördlichen Saarlandstraße zeigt. Hier führt die westlich einströmende Kaltluft zu einer Verfrachtung von NO₂, welche, ausgehend vom Straßenraum, bis zu 40 µg/m³ NO₂ in einer Entfernung

von 300 m betragen kann. Ein ähnlicher Effekt ist auch entlang der übrigen stark befahrenen Straßen zu beobachten, wenngleich die Einwirkbereiche meist geringer sind.

Lufthygienische Belastung von Grünflächen

Um die flächenhaft ausgeprägte verkehrsbedingte Zusatzbelastung innerhalb von Grünflächen ausweisen zu können, sind in einem ersten Schritt alle Areale abgegrenzt worden, wo die NO_2 -Konzentrationen $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ übersteigt (orangene Signatur, Abb. 25). In einem zweiten Schritt sind diese lufthygienisch belasteten Bereiche mit den Grünflächen der Biotoptypenkarte verschnitten worden (magentafarbene Signatur, Abb. 24) und stehen somit als Informationsebene für die Darstellung in der Klimafunktionskarte bzw. Planungshinweiskarte bereit.

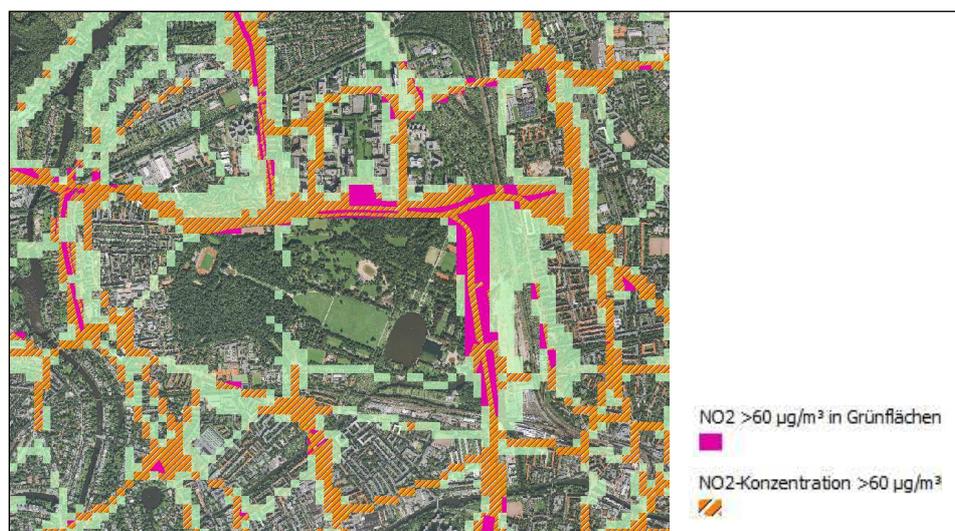


Abb. 25: Lufthygienische Belastungsbereiche innerhalb von Grünflächen im Bereich Stadtpark während einer austauscharmen Wetterlage

Im Hinblick auf den *Jahresmittelwert* der NO_2 -Konzentrationen werden in der Klimafunktions- und Planungshinweiskarte auch die im Rahmen des Screenings mit dem Programmsystem PROKAS (IVU 2005) berechneten Jahresmittelwerte für jeden beurteilten Straßenabschnitt linienhaft dargestellt. Dies sind Straßenabschnitte mit einer Randbebauung (Straßenschluchtsituation), für die eine Überschreitung des Jahresmittelwertes von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nach 39. BImSchV zu erwarten sind. Diese mit PROKAS berechneten Werte sind als „mittleren“ Bedingungen im Verlauf eines Jahres anzusehen und beinhalten damit auch vergleichbare austauscharme Wettersituationen.

5 Klimaökologische Funktionen

Im Folgenden wird auf die Klimafunktionskarte als Hauptergebnis dieser Untersuchung eingegangen. Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Stadtgebiet Hamburgs zugrunde. Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld sowie die lufthygienische Belastung durch verkehrsbezogene Schadstoffe modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (**Wirkungsraum**) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (**Ausgleichsräume**). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (**Luftleitbahnen**) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des **Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges** im Stadtgebiet Hamburg. Die Klimafunktionskarte (Karte 1.11) 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 Klimafunktionskarte 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 bauleitplanerische und 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 Klima/Luft in der Landschaftsplanung / Bauleitplanung bereit. Der Aufbau der Kartenlegende folgt dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, wobei im Folgenden auf die Inhalte eingegangen wird.

5.1 Grün- und Freiflächen

Vegetationsbestandene Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion stellen klima- und immissionsökologische **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. Aufgrund der Reliefsituation mit entsprechenden geringen Hangneigungen von weniger als 1° dominieren in Hamburg vorwiegend thermisch induzierte Kaltluftströmungen. Die Gesamtfläche der Kaltluft produzierenden Grünflächen beziffert sich auf etwa 34.170 Hektar, was einem Flächenanteil von rund 46 % des Stadtgebietes entspricht. Der Kaltluftvolumenstrom charakterisiert den Zustrom von Kaltluft, wobei für jede Grünfläche ein mittlerer Wert berechnet wurde. Da bei den innerstädtischen Grünflächen der Luftaustausch in der ersten Nachthälfte am stärksten ist und sich andererseits am Stadtrand die Kaltluftströmungen erst zum frühen Morgen hin vollständig ausbilden, ist für jede Teilfläche der jeweils höhere Wert herangezogen worden und wird in der Klimafunktionskarte, ausgehend vom Durchschnittswert im Untersuchungsraum (entspricht 50 %), in Prozentstufen dargestellt (Tab. 5). Dabei werden vor allem die Freiflächen im Südwesten des Stadtgebietes im Bereich der Harburger

Berge als Zonen einer *sehr hohen Kaltluftlieferung* sichtbar. Hier führen die durch das Relief ausgelösten Kaltluftabflüsse zu einer intensiven Kaltluftdynamik und haben somit eine unterstützende Funktion für die Kaltluftlieferung der direkt an den Siedlungsraum angrenzenden Freiflächen. Diese Kaltluftabflüsse tragen somit direkt zur Frisch-/Kaltluftversorgung der Stadtteile Harburg und Neugraben bei. Sehr hohe Kaltluftvolumina entstehen außerdem über den Grünflächen der Stadtteile Rissen, Sülldorf und Blankenese. Darüber hinaus sind sie über Teilflächen des Volksparks, des Niendorfer Geheges sowie über landwirtschaftlich genutzte Flächen in den Stadtteilen Bergedorf und Curslack zu beobachten. Als bedeutsame Grünflächen mit *hoher* Kaltluftlieferung und zentraler Lage sind vor allem Volkspark, Niendorfer Gehege sowie der Friedhof Ohlsdorf hervorzuheben. Mit einer Gesamtfläche von ca. 2.430 ha für die sehr hohe und 8.537 ha für die hohe Kaltluftlieferung beträgt der Flächenanteil dieser Kategorien an der Gesamtgrünfläche ca. 7 % bzw. 25 %.

Die Ausgleichsleistung von Flächen, die eine *mittlere Kaltluftlieferung* aufweisen, ist ebenfalls als klimaökologisch relevant einzuschätzen. Dies betrifft vor allem die Grünflächen im innenstadtnahen Bereich wie den Stadtpark oder Volkspark. Daran angrenzende, kleinere Grünareale können zudem als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den jeweiligen klimatischen Einwirkbereich vergrößern. Die Flächensumme dieser mittleren Kategorie beträgt ca. 8.422 Hektar, was einem Anteil von ca. 25 % an der Gesamtgrünfläche entspricht.

Grünflächen, die durch eine *geringe Kaltluftlieferung* charakterisiert sind, haben mit 9.587 Hektar einen Anteil von ca. 28 % am Grünflächenbestand. Dabei handelt es sich häufig um Wald- und Gehölzflächen innerhalb der Landschaftsachsen, welche aufgrund ihrer linienhaften Form und geringen Breite weniger stark abkühlen. Zudem weisen auch die kleineren städtischen Parkareale, Friedhöfe und nicht überbauten Ruderalflächen mit einer Größe von wenigen Hektar einen geringen Kaltluftvolumenstrom auf. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkbereich 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. Einen sehr geringen Kaltluftvolumenstrom weisen mit 5.193 ha etwa 15% der Grünflächen auf.

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 Innenstadtbereich relevant. Tabelle 5 fasst die ausgewiesenen Kategorien zusammen:

Kaltluftlieferung	Gesamtgröße der Kategorie in Hektar	Anteil am Grünflächenbestand
Sehr hoch	2.430	7 %
Hoch	8.537	25 %
Mittel (50 %)	8.422	25 %
Gering	9.587	28 %
Sehr gering	5.193	15 %

Tab. 5 Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Hamburg

Somit führen unterschiedliche Struktureigenschaften der Grünflächen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Intensität hinsichtlich der Kaltluftdynamik. Die einzelnen Grünflächen innerhalb eines Kaltluftein-

zugsgebietes besitzen in ihrer Summenwirkung eine Entlastungsfunktion für benachbarte und weiter entfernte Siedlungsräume.

5.2 Siedlungsräume

Wie in Kap. 3.4 beschrieben, ist die **bioklimatische Belastungssituation** der Baublöcke auf Basis des PMV-Wertes (Predicted Mean Vote; FANGER 1972) als Maß für die Wärmebelastung in einer Sommernacht ausgewiesen worden. Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. (vgl. Kap. 2.3.2, S. 11) Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende *Kaltlufteinwirkbereiche*, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Kaltlufteinwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Zu Beginn einer warmen Sommernacht werden um 22 Uhr ca. 24 % des gesamten Stadtgebiets mit Kalt-/Frischlufte versorgt. Dieser Anteil steigt bis zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens auf etwa 53 % an. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich dann ca. 40 % der Siedlungsfläche im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Wie in Kap. 4.1.2 erläutert, hängt die **Reichweite einer Kaltluftströmung** in die Bebauung vor allem vom Ausmaß der Kaltluftdynamik ab. Sie ist bei Kaltluftabflüssen mit Bezug zu großräumigen Kaltluftentstehungsflächen wie z.B. im Raum Harburg am intensivsten. Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt, abhängig von der Bebauungsstruktur, zwischen ca. 150 m und bis zu 1300 m. Darüber hinaus spielt auch die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle. In den peripheren, vergleichsweise gering überbauten dörflichen 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 geringen Versiegelungsgrad und hohem Grünanteil am geringsten ausgeprägt. Daher weisen vor allem die peripheren Stadtteile wie Blankenese oder Ohlstedt in Teilbereichen günstige bis sehr günstige Bedingungen auf.

Diesen Gunsträumen stehen **Belastungsbereiche** mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die innerstädtischen Siedlungsräume, 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 Versiegelungsanteile wie die Zentrumsbebauung aufweisen.

Einen Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte für den Bereich Stadtpark zeigt Abb. 26, wobei die bioklimatische Situation der Siedlungsräume mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Im näheren Umfeld des Stadtparks sind vor allem die City-Nord sowie gewerblich genutzte Areale südlich des Wiesendamms/Barmbeker Straße als bioklimatisch ungünstig anzusprechen (dunkelrot). Die an den Stadtpark angrenzende Bebauung ist vor allem südlich und westlich durch etwas günstigere Bedingungen gekennzeichnet, was auf im Wesentlichen das Einwirken der Kaltluft zurück zu führen ist. Neben einer ausreichenden Durchlüftung hängt die Belastung aber auch vom Strukturtyp der Bebauung und damit vom Überwärmungsgrad ab. Daher weist die entlang der Alster vorhandene Stadthausbebauung deutlich günstigere Bedingungen auf (gelb/orange).

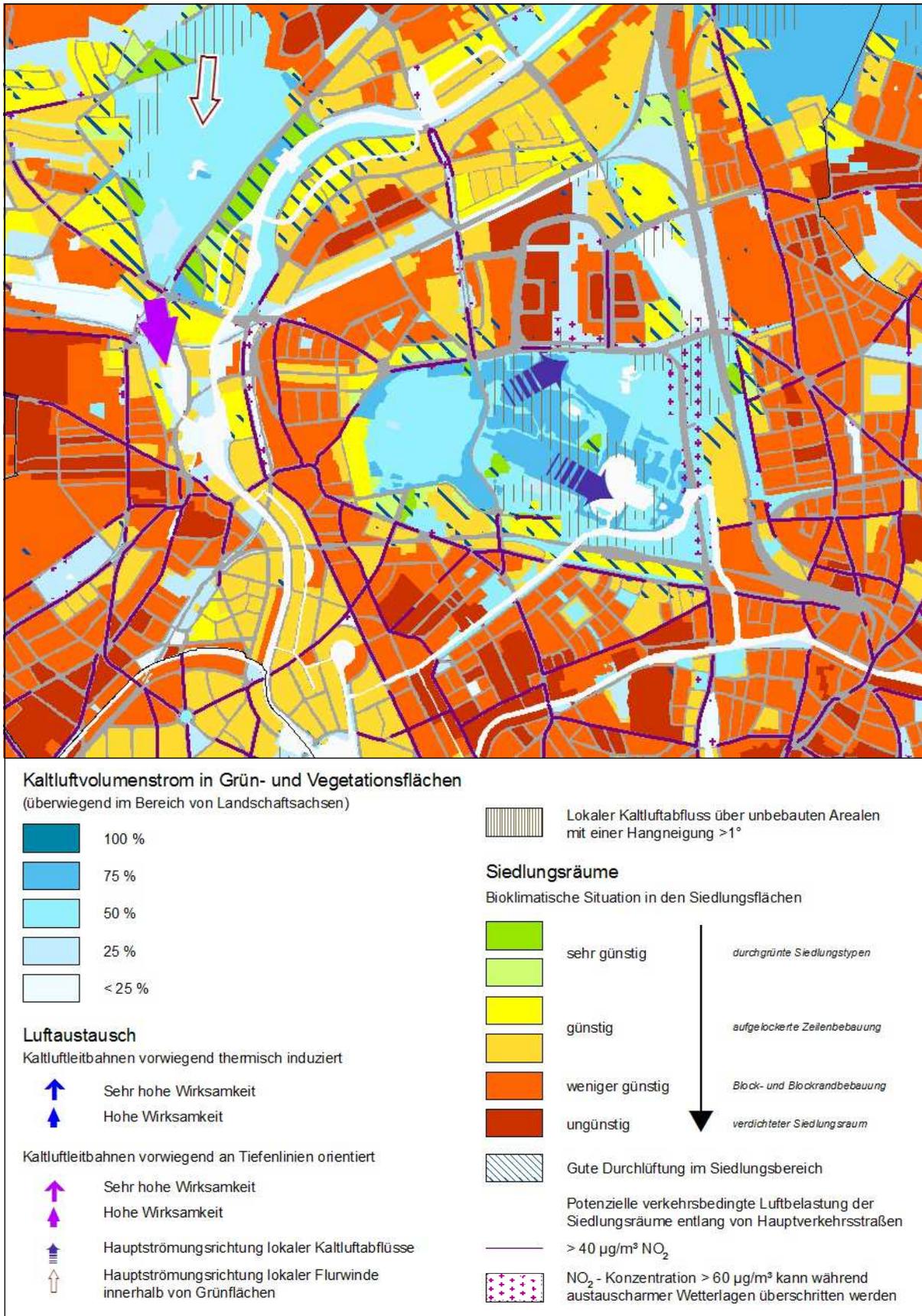


Abb. 26 Klimafunktionen im Bereich des Stadtparks

5.3 Luftaustausch

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. *Kaltluftleitbahnen* sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf Wirkungsräume ausgerichtet sein. Grundsätzlich kommen Tal- und Auenbereiche, größere Freiräume aber auch ausgedehnte Gleisareale als geeignete Strukturen in Frage. Bei der Ausweisung wurde zwischen reliefbezogenen (z.B. an einer Tiefenlinie wie einem Gewässer) sowie nutzungsbezogenen (in ebener Lage) Leitbahnen unterschieden. Im Rahmen der Klimaanalyse wurden insgesamt 21 Leitbahnen ausgewiesen. Als besonders bedeutsam sind die folgenden zu nennen, wobei diese meist auch Bestandteil einer Landschaftsachse sind:

- Volkspark-Achse
- Eimsbüttler Achse zusammen mit dem Niendorfer Gehege
- Hummelsbüttler Achse
- Teile der Alster-Achse
- Horner Geest-Achse
- Göhlbach-Achse
- Jenischpark

Allerdings sind die o.g. Grünzüge nicht durchgängig als Leitbahn anzusprechen. Vielmehr treten einzelne Abschnitte mit einer entsprechenden Funktion hervor. Die **Landschaftsachsen** begünstigen aber grundsätzlich vor allem am Stadtrand das Eindringen von Kaltluft aus den Kaltluftentstehungsgebieten des Umlandes in die ausgedehnten Siedlungsflächen. Es erfolgt hingegen keine Leitbahnausweisung für Bereiche, wo Kaltluft von Grünflächen direkt in die Bebauung strömt. In diesen Fällen grenzen Ausgleichs- und Wirkungsräume direkt aneinander, so dass eine Leitbahnausweisung nicht möglich ist. Dies ist häufig bei den innerstädtischen Grünflächen gegeben.

6 Planungskarte Stadtklima

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (Karte 1.13) stellt eine integrierende Bewertung der in der Klimafunktionskarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihr lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Diesem Leitgedanken entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

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

In Folgendem wird auf die planerische Einordnung der klimaökologisch relevanten Elemente in Hamburg eingegangen. Basis für die Beurteilung und Abgrenzung der Räume hinsichtlich ihrer planerischen Prioritäten sind die Simulationsergebnisse der Klimaparameter für eine austauscharme sommerliche Strahlungswetterlage (Nachtsituation). Die Legende folgt dabei dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges.

6.1 Grün- und Freiflächen

Innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Aus größeren, zusammenhängenden Grünarealen ergibt sich das **klimatische Regenerationspotenzial**. Der produzierte Kaltluftvolumenstrom als entscheidender Parameter für die Bewertung tritt aber an dieser Stelle in den Hintergrund. Für die planerische Einordnung ist vielmehr die Lage im Raum entscheidend und damit die Frage, welche bioklimatische Belastung eine zugeordnete Bebauung aufweist. Denn letztendlich kann auch eine Grünfläche mit einer vergleichsweise geringen Kaltluftproduktion eine signifikante **Wohlfahrtswirkung** in stark überbauten Bereichen erbringen. Dabei werden die Grünflächen bis zu einer Entfernung von 500 m im Umfeld von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsflächen mit der höchsten klimatischen Relevanz eingeordnet. Grünflächen mit Bezug zu mäßig belasteten Siedlungsräumen wurden innerhalb einer Entfernung von 400 m erfasst und mit einer mittleren bis hohen klimaökologischen Bedeutung ausgewiesen. Eine geringe bis mittlere Bedeutung erhalten die Grünflächen in der Umgebung bis 200 m von gering belasteten Bereichen.

Eine **hohe bis sehr hohe stadtklimatische Bedeutung** erlangen die Grün- und Freiflächen mit Einfluss auf bioklimatisch belastete Siedlungsräume. Diese Kategorie ist vor allem im innerstädtischen Raum anzutreffen, wobei zu den größten der Friedhof Ohlsdorf, der Stadtpark sowie Pflanzen und Blumen gehören. Weiterhin sind viele Teilflächen von Landschaftsachsen als stadtklimatisch hoch bis sehr hoch bedeutsam einzuordnen. Dies gilt auch für die Bereiche mit einer Funktion als Kaltluftleitbahn. Die Gesamtgröße dieser Teilflächen beziffert sich auf insgesamt ca. 5.954 Hektar.

Eine hohe Bedeutung kann darüber hinaus auch den kleineren Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zukommen, sofern sie Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Daraus resultiert für diese Flächen die **höchste Empfindlichkeit** gegenüber einer Nutzungsintensivierung mit den folgenden Planungsempfehlungen:

- Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen,
- Reduzierung von Emissionen und
- mit benachbarten Freiflächen vernetzen.

Dies bedeutet, dass bauliche und zur Versiegelung beitragende Nutzungen dieser Flächen zu weiteren, bedenklichen klimatischen Beeinträchtigungen führen können.

Grün- und Freiflächen, die einen Bezug zu Siedlungsräumen mit einem geringen Belastungsniveau oder sogar günstigem Kleinklima aufweisen, besitzen eine **mittlere stadtklimatische Bedeutung**. Sie sind meist innerhalb der peripheren Stadtteile lokalisiert und haben Bezug zu den weniger verdichteten und deshalb bioklimatisch geringer belasteten Siedlungsräumen wie Nienstedten, Billstedt, Bramfeld und Rahlstedt. Für diese Flächen ergibt sich eine **hohe Empfindlichkeit** gegenüber einer Nutzungsintensivierung, bei der insbesondere der Luftaustausch mit der Umgebung berücksichtigt werden sollte.

Als dritte Kategorie werden Grün- und Freiflächen mit einer **geringen stadtklimatischen Bedeutung** ausgewiesen. Dabei handelt es sich sowohl um Areale mit Bezug zu bioklimatisch günstigen Siedlungsflächen als auch um die übrigen siedlungsfernen Freiflächen, welche keinen nennenswerten Einfluss auf - belastete - Siedlungsbereiche ausüben. Dort wären bauliche Eingriffe, die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigen, nur mit **geringen klimatischen Veränderungen** verbunden. Tabelle 6 fasst die Flächenanteile der ausgewiesenen Kategorien zusammen:

Planerische Bedeutung	Anteil am Grünflächenbestand	Anteil am Stadtgebiet
Hoch bis sehr hoch	17 %	8 %
Mittel bis hoch	14 %	6 %
Gering bis mittel	69 %	31 %

Tab. 6: Bilanzierung der planerisch relevanten Grünflächen

Somit lassen sich ca. 16 % des Grünflächenbestandes einer hohen bis sehr hohen planerischen Priorität zuzuordnen, während 14 % eine mittlere bis hohe Bedeutung aufweisen. Den mit 69 % höchsten Anteil machen allerdings die Grün- und Freiflächen mit einer geringen Bedeutung aus. Dabei handelt es sich vor allem um die vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen in den Bezirken Harburg und Bergedorf, welche aufgrund ihrer Randlage keinen direkten Einfluss auf belastete Siedlungsflächen ausüben.

6.2 Siedlungsräume

Die Siedlungsräume zeichnen sich durch eine unterschiedliche Bebauungsdichte aus. Daraus resultieren unterschiedliche **bioklimatische Bedingungen**, die während sommerlicher, austauscharmer Strahlungswetterlagen durch lokale Luftaustauschprozesse mitbestimmt werden. Daraus folgt auch eine differenzierte planerische Betrachtung. Eine Wohnbebauung, welche **günstige bioklimatische Bedingungen** aufweist, ist meist durch eine offene Bebauungsstruktur, einem überdurchschnittlich hohen Grünflächenanteil sowie einer wirksamen Kaltluftströmung gekennzeichnet.

Diese Räume weisen am ehesten ein Potenzial zur weiteren maßvollen, baulichen Verdichtung auf, da sie lediglich **gering** bzw. **nicht belastet** sind. In diesem Zusammenhang sollten die folgenden planerischen Aspekte berücksichtigt werden:

- Bei nutzungsintensivierenden Eingriffen die Baukörperstellung im Hinblick auf Kaltluftströmungen berücksichtigen. Daher Neubauten parallel zur Kaltluftströmung ausrichten.
- Bauhöhen insgesamt gering halten.
- Grün- und Freiflächenanteil erhalten.
- Durch eine weiterhin gute Durchlüftung und hohen Grünanteil das günstige Bioklima erhalten

Belastungsbereiche weisen hingegen einen Durchlüftungsmangel, eine überdurchschnittliche Wärmebelastung und lokal auch eine lufthygienische Belastung auf. Unterschieden werden Siedlungsräume mit weniger günstigen bioklimatischen Bedingungen sowie ungünstigen Verhältnissen als höchste Belastungskategorie. Darüber hinaus sind Areale mit einem überdurchschnittlich hohen Anteil empfindlicher Bevölkerungsgruppen (> 65 Jahre bzw. < 5 Jahre) sowie dichter Bebauungsstruktur (GFZ >1) innerhalb bioklimatischer Belastungsbereiche ausgewiesen.

Für diese Gebiete können die folgenden Empfehlungen gegeben werden:

- Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils
- Erhalt von Freiflächen
- Reduzierung/Vermeidung von Emissionen
- Herabsetzung des Versiegelungsgrades und ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen
- Verbesserung im Bestand z.B. durch Dach- und Fassadenbegrünung
- Möglichst keine weitere Verdichtung

Diese Bereiche weisen daher gegenüber einer weiteren Nutzungsintensivierung eine **hohe** (mäßig bis hoch belastet) bzw. die **höchste Empfindlichkeit** (hoch bis sehr hoch belastet) auf.

6.3 Luftaustausch

Kaltluftleitbahnen stellen die Verbindung zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen her, wobei prinzipiell gehölzarme Tal- und Niederungsbereiche, größere Grünflächen sowie Bahnareale als geeignete Strukturen in Frage kommen. In diesem Zusammenhang dienen Leitbahnen im Stadtgebiet Hamburg der Zufuhr von Kaltluft aus dem stadtnahen Umland sowie größeren innerstädtischen Grünflächen, sofern kein flächenhaftes Einströmen in den Siedlungsraum erfolgt. Dabei wurden, analog zu den Kaltluftentstehungsgebieten, Kaltluftleitbahnen mit einer hohen sowie einer mittleren Planungspriorität ausgewiesen. In Rahmen der Klima- und Windfeldmodellierung sind die in Kap. 5.3 genannten Leitbahnen ermittelt worden. Für alle Leitbahnen gelten die folgenden Planungshinweise:

- Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten
- Bauhöhe gering halten
- Neubauten parallel zur Kaltluftströmung ausrichten
- Randbebauung vermeiden

➤ Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils

Diese Hinweise gelten auch für lokale Kaltluftabflüsse und Flurwinde innerhalb kleinerer Grünflächen. Die Gewässerbereiche unterstützen zusätzlich die Durchlüftung von Siedlungsflächen auch bei austauschstärkeren Wetterlagen. Einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte gibt Abb. 27 für den Bereich Stadtpark (vereinfachte Legende).

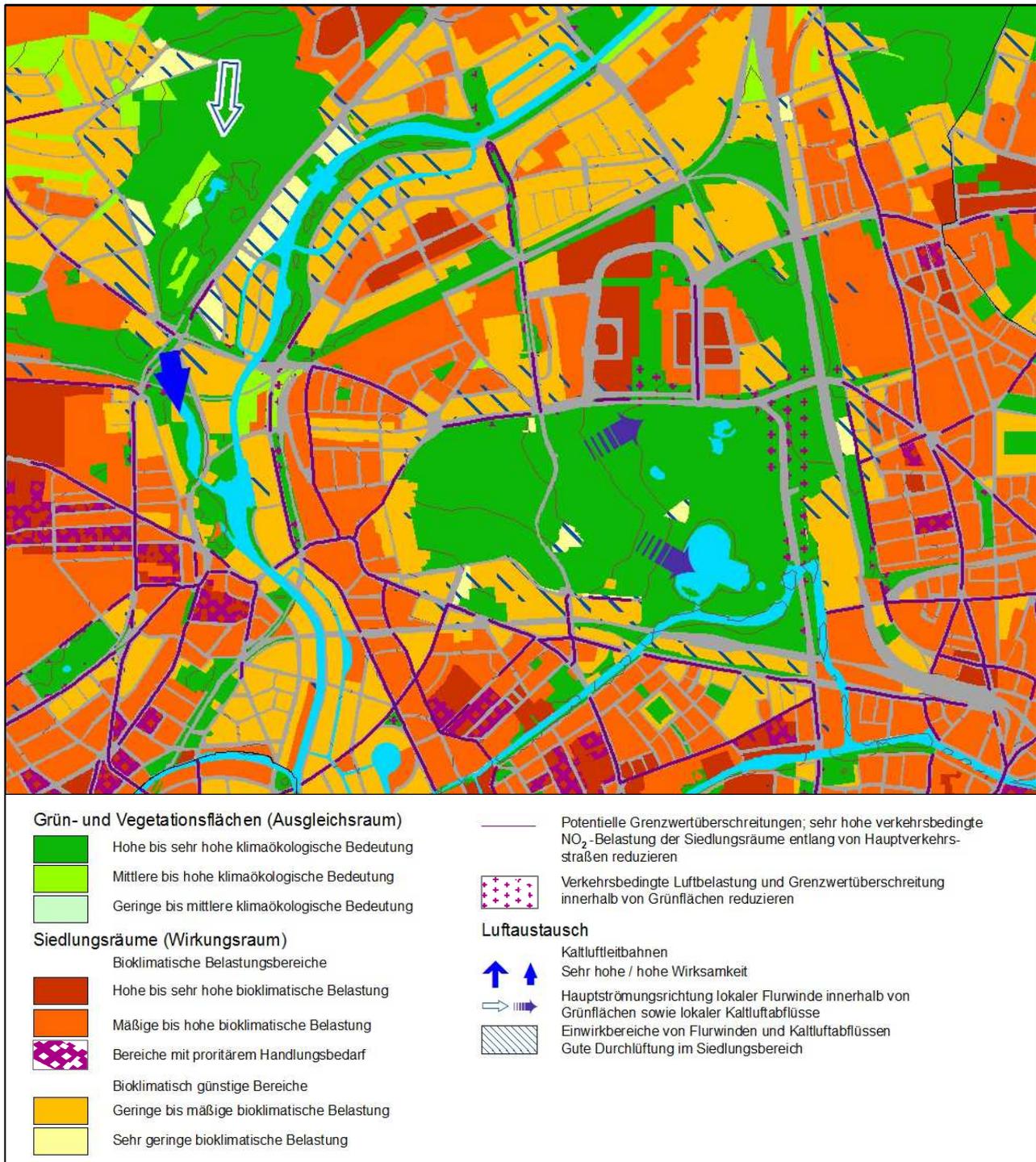


Abb. 27 Planungshinweise im Bereich des Stadtparks

Lufthygienische Situation

Im Rahmen des Luftaustausches wird auch der Aspekt der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung mit einbezogen (Bezugsjahr 2009). Als **lufthygienische Belastungsbereiche** innerhalb von Grünflächen wurden flächenhaft Areale abgegrenzt, die eine erhöhte Konzentration von mehr als $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 während austauscharmer Wetterlagen aufweisen, wie sie auch der Klimaanalyse zugrunde liegen. Darüber hinaus werden auch die linienhaften Berechnungen der potenziell verkehrsbedingten Luftbelastung für Stickstoffdioxid (NO_2) dargestellt. Dies sind Straßenabschnitte mit einer Randbebauung (Straßenschluchtsituation), für die eine Überschreitung des Jahresmittelwertes von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nach 39. BImSchV zu erwarten sind. Diese mit dem Screening-Modell PROKAS (IVU 2005) berechneten Werte repräsentieren die „mittleren“ Bedingungen im Verlauf eines Jahres.

6.4 Nutzungshinweise für die Bauleitplanung

Die Planungshinweiskarte (Karte 1.12) stellt die stadtklimatisch relevanten Strukturen mit ihrer jeweiligen Bedeutung dar und erlaubt im Falle einer geplanten Nutzungsänderung die **Ersteinschätzung der Empfindlichkeit von Grün- und Siedlungsflächen**. Aufgrund ihrer wichtigen lokalklimatischen Funktionen sowie der Rolle im Stadtökosystem insgesamt sollte die Überbauung von Grünflächen aber grundsätzlich vermieden werden. Sind dennoch konkrete Eingriffe vorgesehen, können entsprechende zu berücksichtigende Maßnahmen aus der jeweiligen Empfindlichkeit im Plangebiet abgeleitet werden, gleiches gilt für die Siedlungsflächen. Sämtliche Aspekte sind zusammenfassend in Tab. 7 (S. 49) dargestellt.

Am Beispiel der Überdeckung der BAB 7 im Bereich Bahrenfeld/Othmarschen soll anhand der Planungshinweiskarte eine Ersteinschätzung der Vulnerabilität des Plangebietes am Südrand des Volksparks Altona erläutert werden.

Beispiel Überdeckung BAB 7 in Bahrenfeld/Othmarschen

Die Überdeckung eines mehr als 2 km langen Abschnittes der BAB 7, vorrangig aus Gründen des Lärmschutzes, geht mit der gleichzeitigen Realisierung von Grün-/Freiflächen und Kleingärten auf dem Tunnel-dach einher. Darüber hinaus sollen im Nahbereich des geplanten Grünzugs bis zu 1.700 Wohnungen gebaut werden. Den betreffenden Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte zeigt Abb. 28, wobei auf der rechten Seite die geplanten Baufelder rot abgegrenzt sind. Aufgrund der Leitbahnfunktion in der südlichen und südöstlichen Verlängerung des Altonaer Volksparks (Pfeilsignatur) weisen auch diese an den Park angrenzenden Bereiche (Friedhöfe, Kleingärten sowie Baum- und Gehölzflächen) die höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen auf. Zudem liegt aufgrund des starken Verkehrsaufkommens von mehr als 100.000 Fahrzeugen/Tag (Bezugsjahr 2009) entlang der BAB A7 in der jetzigen Situation ein hohes Immissionsniveau verkehrsbezogener Luftschadstoffe vor.

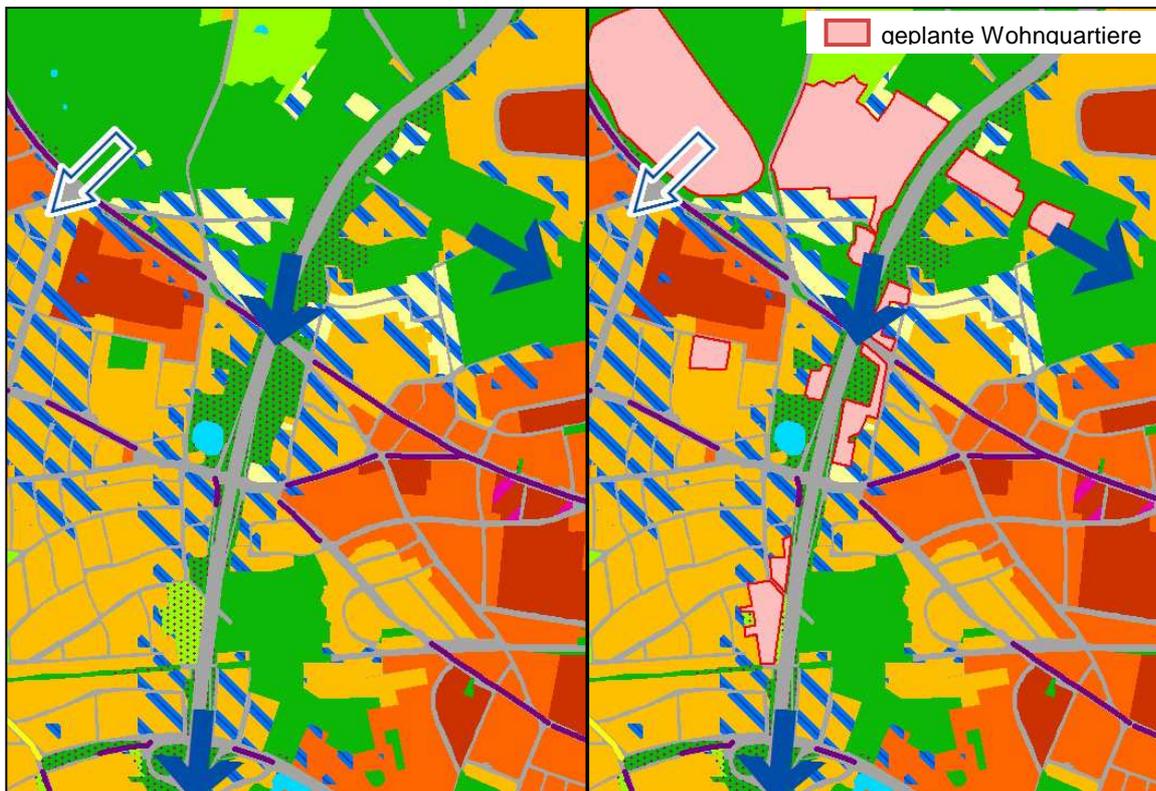


Abb. 28: Beispiel Deckel A7 Bahrenfeld/Othmarschen

Die vom Volkspark ausgehenden Kaltluftströmungen sind intensiv ausgeprägt, wobei deren „Reichweite“ über die blaue Strichsignatur dargestellt wird. In ihrem Einwirkungsbereich liegen meist bioklimatisch günstige Bedingungen vor (Beige/Orange). Daran angrenzend sind in den dichter bebauten und meist unzureichend durchlüfteten Siedlungsflächen eher ungünstige Bedingungen anzutreffen (Hellrot/Dunkelrot).

Daraus lassen sich die folgenden wichtigsten *Auswirkungen* zusammenfassen:

- Mit der Entstehung weiterer Grünzüge werden die Landschaftsachsen an den Altonaer Volkspark angebunden und durch weitere Kleingärten auf dem Deckel ergänzt.
- Gleichzeitig sollen im Umfeld des geplanten Grünzugs mehrere Wohnquartiere entstehen.
- Mit der Überdeckung verändert sich auch die Immissionssituation entlang der A 7.

Bei diesem Beispiel steht einerseits der Einfluss der künftigen Bebauung bzw. der grünplanerischen Ausgestaltung auf die Leitbahnfunktion sowie andererseits die lufthygienische Situation im Vordergrund.

Daraus ergeben sich die folgenden potentiellen *Konflikte*:

- Wohin werden die verkehrsbedingten Luftschadstoffe abgeleitet und freigesetzt? Wie hoch ist die Immissionsbelastung am Tunnelmund?
- Es wird zwar neue Grünfläche im Bereich des Deckels gewonnen, gleichzeitig sind Kaltluft produzierende Areale für die Überbauung vorgesehen.
- In wiefern wird die Leitbahnfunktion bzw. der Luftaustausch insgesamt beeinträchtigt? Verschlechtert sich die günstige bioklimatische Situation im Umfeld der Leitbahnbereiche?

Um mögliche klimaökologische bzw. lufthygienische Auswirkungen des Vorhabens zu minimieren, lassen sich in einem weiteren Schritt die entsprechenden *Maßnahmen* herleiten:

- Erhaltung der Kaltluftleitbahnen für die Kalt-/Frischluftversorgung der bestehenden Bebauung.
- Die Baukörperstellung sollte weiterhin Kaltluftabflüsse und Flurwinde ermöglichen.
- Versiegelungs- und Überbauungsgrad sollten möglichst gering halten und das günstige Bioklima erhalten werden.
- Geschlossene Randbebauung vermeiden, eine „perforierte“ Bebauungsstruktur der Baufelder ist anzustreben.
- Aspekt „Klimavielfalt“ bei der grünbaulichen Ausgestaltung des Areals berücksichtigen (vgl. Kap. 7.1).
- Emissionsarme Wärmeversorgung/Verkehrerschließung der Wohnquartiere

Ziel ist es, auch im Rahmen einer Überplanung und Flächennutzungsänderung das eigenbürtige Luftaustauschsystem Volkspark – angrenzende Bebauung und die damit verbundene klimaökologische Wohlfahrtswirkung aufrecht zu erhalten. Mit der durchgeführten modellgestützten Analyse der klima- und immissionsökologischen Funktionen stehen flächendeckend aktuelle Informationen zu den Schutzgütern Klima und Luft für das gesamte Stadtgebiet Hamburgs zur Verfügung. Damit wird eine fundierte klimatisch-lufthygienische Ersteinschätzung von Planungsvorhaben ermöglicht und kann anschließend in die Detailplanung von Flächennutzungsänderung einfließen.

Tab. 7: Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen

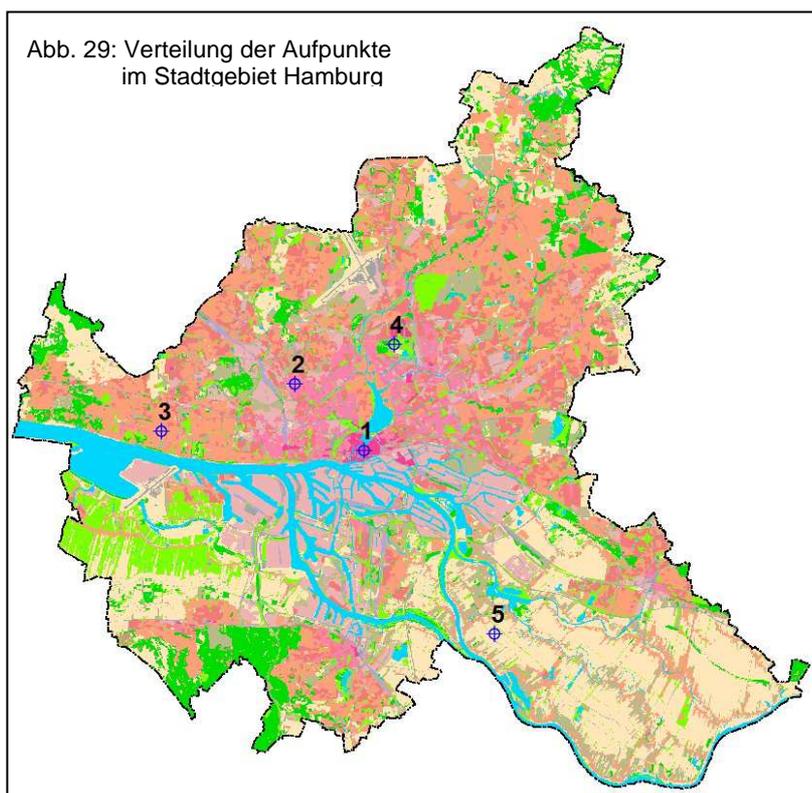
Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen				
1	2	3	4	5
Flächentyp - Stadtklimatische Bedeutung	Betroffene Funktion	Grund der Einstufung	Beurteilung der Empfindlichkeit	Maßnahmen
Grünflächen - hohe Bedeutung	Kalt-/Frischluftlieferung	Kaltluftentstehungsgebiete mit Bezug zu bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen.	Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, Mit benachbarten Freiflächen vernetzen.
	Kaltluftleitbahn	Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen.	Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> Vermeidung/Beseitigung baulicher und sonstiger Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Randbebauung vermeiden. Neubauten längs zur Luftleitbahn ausrichten. Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren.
Grünflächen - mittlere Bedeutung	Kalt-/Frischluftlieferung	Kaltluftentstehungsgebiete mit Bezug zu bioklimatisch weniger günstigen Siedlungsräumen.	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> Luftaustausch mit der Umgebung sichern. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren.
	Leitbahn	Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen.	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> Vermeidung/Beseitigung baulicher und sonstiger Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Randbebauung vermeiden. Neubauten längs zur Luftleitbahn ausrichten. Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren.
Grünflächen - geringe Bedeutung	Kalt-/Frischluftlieferung	Freiflächen mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete und/oder unbedeutender Kalt-/Frischluftproduktion.	Geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> Nutzungsänderung (Versiegelung/Bebauung), die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, ist möglich. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren,
Siedlungsraum – sehr geringe Belastung	Siedlungsraum	Siedlungsraum mit sehr günstigen bzw. günstigen bioklimatischen Bedingungen. Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit hohem Durchgrünungsgrad und meist guter Durchlüftung.	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.	<ul style="list-style-type: none"> Günstiges Bioklima erhalten. Bauhöhen gering halten. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, Baukörperstellung im Hinblick auf Kaltluftströmungen beachten.
Siedlungsraum – mäßige bis hohe bioklimatische Belastung	Siedlungsraum	Siedlungsstruktur mit weniger günstigen bioklimatischen Bedingungen. Areale mit höherer Bebauungsdichte und/oder unzureichender Durchlüftung.	Hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Durchlüftung. Erhöhung des Vegetationsanteils. Erhalt von Freiflächen. Entsiegelung und ggf. Begrünung der Blockinnenhöfe sowie Dach- und Fassadenbegrünung. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren.
Siedlungsraum – hohe bis sehr hohe bioklimatische Belastung	Siedlungsraum	Siedlungsstruktur mit ungünstigen bioklimatischen Bedingungen. Sehr hoher Versiegelungs- und Überbauungsgrad und unzureichender Durchlüftung.	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung der Durchlüftung. Erhöhung des Vegetationsanteils. Erhalt von Freiflächen. Entsiegelung und ggf. Begrünung der Blockinnenhöfe sowie Dach- und Fassadenbegrünung. Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren.

7 Gesamtstädtische Simulation ausgewählter meteorologischer Kennwerte zur sommerlichen Wärmebelastung unter dem Einfluss des Klimawandels / Szenario 2050

Die mit dem zu erwartenden Klimawandel eintretenden Veränderungen von Niederschlag und Lufttemperaturen werden sich auf die Gesellschaft in ganz unterschiedlicher Weise auswirken. Dabei wird vor allem die höhere Variabilität der Niederschläge die Land- und Forstwirtschaft vor eine große Herausforderung stellen. Aber auch hinsichtlich der Lebensqualität in den urbanen Räumen ist mit einer höheren sommerlichen Wärmebelastung zu rechnen, als dies heute der Fall ist. Da sich voraussichtlich die Anzahl der Tage mit Hitze stress erhöhen wird, kommt der zukunftsorientierten räumlichen Planung zur Erhaltung bioklimatisch unbedenklicher Lebensbedingungen eine wichtige Rolle zu. Denn auch die weitere städtebauliche Entwicklung trägt ihrerseits zu einer weiteren Erwärmung der Siedlungsgebiete bei, die sich durch die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in den nächsten Dekaden noch verschärfen wird.

Die höchsten bioklimatischen Belastungen treten dort auf, wo sich der Effekt der „Städtischen Wärmeinsel“ besonders gut ausprägen kann. Dabei handelt es sich meist um Siedlungsflächen, welche besonders dicht überbaut sind, eine starke Versiegelung aufweisen und nur über wenige Grünflächen verfügen. Gerade hier kommt der Vermeidung von Gesundheitsbelastungen, die insbesondere durch höhere Tages- und Nachttemperaturen ausgelöst werden können, und damit der Gewährleistung gesunder bioklimatischer Verhältnisse auch unter den Bedingungen des Klimawandels besondere Bedeutung zu.

Die lokale Ausprägung des Belastungspotenzials im Stadtgebiet hängt jedoch ganz wesentlich von der Nutzungsstruktur und der Zuordnung bebauter und begrünter Flächen sowie speziell den damit einhergehenden Einflussfaktoren Bebauungsdichte und -höhe, Versiegelungsgrad und Grünstruktur ab. An dieser Stelle findet methodisch der Übergang von der Ebene der regionalen Klimamodellierung (hier CLM) auf die kleinräumigere (mesoskalige) Modellebene statt, die in dieser Arbeit mit dem Klimamodell FITNAH bewältigt wurde.



Im Folgenden werden nun die Ergebnisse zu verschiedenen, bei autochthonen Wetterlagen auftretenden Parametern in einem repräsentativen Stadtausschnitt Hamburgs erläutert. Der in den folgenden Kapiteln gewählte Ausschnitt deckt den Großteil des in Hamburg auftretenden Spektrums an Nutzungsstrukturen ab. Anhand mehrerer Aufpunkte (Abb. 29) wird die Werteausprägung in Abhängigkeit vom Flächennutzungstyp erläutert. Dabei handelt es sich um die Zentrumsbebauung der Neustadt (1), Block - und Blockrandbebauung in Eimsbüttel (2) sowie Einzel- und Reihenhausbebauung in Othmarschen (3).

Damit wird im Wesentlichen die Abstufung der baulichen Dichte vom Zentrum bis an den Stadtrand nachvollzogen. Mit dem Stadtpark (4) sowie landwirtschaftlich genutzter Freifläche in Ochsenwerder (5) sind auch unterschiedlich geprägte Grünflächentypen enthalten. Für das Flächenszenario 2050 wurde, abgesehen von Innenstadtbereich, eine weitere Verdichtung von +10 Prozent angenommen. Zusätzlich wurden alle im Flächennutzungsplan vorgesehenen Reserveflächen einbezogen (vgl. Methode Kap. 3.2, S. 19).

Hinsichtlich der Grünausstattung liegen den für den Zeithorizont 2050 durchgeführten Simulationen die derzeitigen klimatischen Rahmenbedingungen zugrunde. Unter dem Einfluss des sich abzeichnenden Klimawandels kann allerdings die Funktionsfähigkeit von Grünflächen z.B. durch Veränderungen im jahreszeitlichen Niederschlagsregime, Bodenfeuchte, Temperatur und dem dadurch beeinflussten Wuchsverhalten sowie dem Artenspektrum abnehmen. Die Tendenz zu höheren Winterniederschlägen und trockeneren Sommern kann daher negativ auf das Stadtgrün einwirken. Gleichzeitig kann dies zu einem höheren Pflegeaufwand oder sogar sinkender Klimawirksamkeit führen. Eine Einbeziehung oder Abschätzung dieser Zusammenhänge war in der vorliegenden Untersuchung aufgrund deren Komplexität und Umfang nicht möglich und musste auf die stadtklimatischen Prozesse begrenzt bleiben.

7.1 Siedlungsklimatische Rolle des Stadtgrüns

Die verschiedenen klimatisch wirksamen Eigenschaften der Stadtstrukturen spiegeln sich räumlich differenziert in den Ergebnissen zur Wärmebelastung unter dem Einfluss des Klimawandels wieder. Die Auswertungen der folgenden Kapitel beziehen sich vor allem auf die Parameter, welche die Wärmebelastung der Tagsituation wiedergeben. Während über den von Wiese oder Acker geprägten Arealen am Tage durch die intensive Einstrahlung und dem Mangel an Verschattung ähnlich hohe Werte wie in den verdichteten Siedlungsflächen auftreten können, ist dort gleichzeitig in der Nachtsituation die stärkste Abkühlung zu erwarten. Hier kann einerseits in der Nacht eine ungehinderte (langwellige) Ausstrahlung verbunden mit starker Abkühlung der darüber lagernden Luftmasse erfolgen. Am Tage ist andererseits ein hoher (kurzwelliger) solarer Strahlungsinput mit starker Erwärmung der Bodenoberfläche die Folge (vgl. Temperaturverlauf Abb. 5, S. 8).

Andererseits weisen die durch Bäume und Gehölze geprägten Flächen an wolkenlosen Sommertagen mit starker Sonneneinstrahlung aufgrund der Schattenspende und der Verdunstung von Wasser das geringste Belastungspotential auf. Damit kommt den innerstädtischen Grünflächen vor allem in den stärker überbauten Quartieren eine wichtige Rolle zu. Zur Aufwertung der Aufenthaltsqualität sollten vor allem innerhalb der Quartiersplätze ausreichend große beschattete Areale ausgebildet werden. Insbesondere das Gehen/Radfahren im Schatten sollte möglich sein. Dabei sind vor allem lockere, hochstämmige Baumgruppen und Baumalleen als Beschattungselemente sinnvoll. Darüber hinaus sollten größere Grünflächen auch ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten wie beispielsweise beschattete und besonnte Bereiche oder kühlende Wasserflächen aufweisen, um den unterschiedlichen Bedürfnissen der Menschen hinsichtlich des Aufenthaltes im Freien entgegen zu kommen (Mikroklimavielfalt).

Damit wird die unterschiedliche Bedeutung von Grünflächen am Tage bzw. in der Nacht deutlich. Einerseits sollen sie eine gute Aufenthaltsqualität am Tage gewährleisten, andererseits könne nächtliche Flurwinde die Wärmebelastung in den Siedlungsräumen lindern. 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 mitbestimmt. Sofern ein bedeutsamer Luftaustausch durch Flurwinde stattfinden kann, sollte dieses (eigenbürtige) Luftaustauschsystem Grünfläche – angrenzende Bebauung und die damit verbundene klimaökologische Wohlfahrtswirkung aufrecht erhalten werden. In diesem Zusammenhang und in Bezug auf die nächtliche Kaltluftproduktion weist ein vorwiegend durch Wiese geprägter Flächentyp die besten Eigenschaften auf. Da auch von dichteren Vegetationselementen eine Hinderniswir-

kung für den Luftaustausch ausgehen kann, sollte der Übergangsbereich zur Bebauung von Grünstrukturen wie dichten Baumgruppen, Gehölzen oder hohen Hecken weitestgehend frei gehalten werden.

7.2 Anzahl der Sommertage

Als Sommertage werden Tage eingeordnet, sofern sie eine Maximumtemperatur von mehr als 25°C aufweisen. Der Einfluss der Nutzungsstrukturen auf die Anzahl der Sommertage im Stadtgebiet wird durch den Einsatz des mesoskaligen Modells FITNAH sichtbar. Ganz maßgeblich ist in diesem Zusammenhang der Einfluss der jeweiligen Nutzungsstrukturen auf den Energiehaushalt, der über Einflussgrößen wie z.B. Albedo, Versiegelungsgrad und Bauvolumen gesteuert wird. Größere Gewässer wie Elbe und Alster wirken insgesamt dämpfend auf die Ausprägung von Sommer- und Hitzetagen, da sie zum Einen Sonnenlicht reflektieren und zum Anderen als turbulentes Medium eine große Menge an Wärmeenergie aufnehmen können. Außerdem gibt ein Wasserkörper die gespeicherte Wärme in der Nacht wieder an die Luft ab, so dass er insgesamt klimatisch ausgleichend wirkt.

Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2001 - 2010

In Abb. 30 sind für einen Ausschnitt von Hamburg die Ergebnisse des Zeitraums 2001 bis 2010 und 2046 bis 2055 gegenübergestellt. Demnach weisen im Istzustand die dicht überbauten Siedlungsflächen eine höhere Anzahl an Tagesmaxima der Lufttemperatur >25°C auf als locker bebaute Areale. Während im Zentrum (1) bis zu 21 Sommertage/Jahr auftreten (gemittelt für 2001-2010), geht der Wert innerhalb der Block- und Blockrandbebauung von Eimsbüttel nur wenig auf etwa 20 Tage/Jahr zurück.

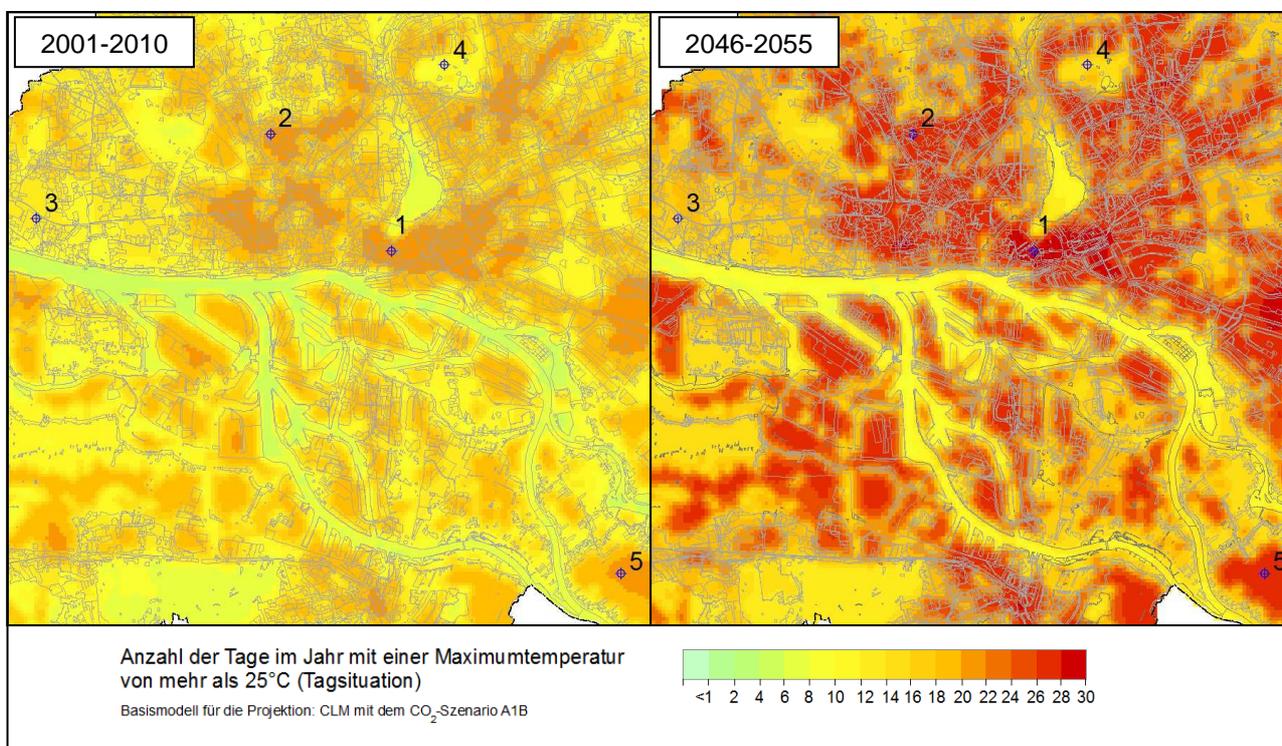


Abb. 30: Anzahl der Sommertage/Jahr

Dagegen sind in den stärker durchgrünter Siedlungsflächen von Othmarschen nur noch bis zu 12 Tage/Jahr zu beobachten. Hier trägt der hohe Vegetationsanteil der Einzel- und Reihenhausbebauung zur Dämpfung der Lufttemperatur bei. Damit zeigt sich eine deutliche Schwankungsbreite der Anzahl an Tagen über 25°C

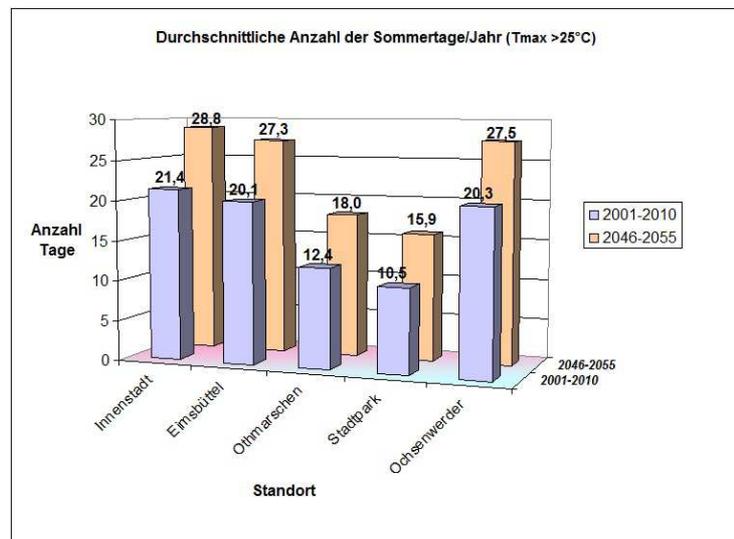
und macht den Einfluss der Bebauungsstruktur und Grünausstattung von Siedlungsflächen auf die lokalklimatische Situation deutlich.

Grünflächen weisen ebenfalls eine breite Spanne an Werten auf, was unmittelbar auf den Grünflächentyp zurückzuführen ist. Eine vergleichsweise hohe Anzahl an Sommertagen von bis zu 20 Tage/Jahr ist gegenwärtig über den landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Raum Ochsenwerder anzutreffen.

Eine mit 10 Tagen/Jahr etwa halb so hohe Anzahl an Sommertagen ist dagegen im Bereich des Stadtparks anzutreffen (Abb. 30). Hier führt das Bestandsklima der Wald- und Gehölzflächen zu einem ausgeglichen Tagesgang der Temperaturen, wobei am Tage durch Verschattung und Verdunstungswirkung der Bäume ein insgesamt deutlich niedrigeres Temperaturniveau als über den Ackerflächen (5) vorliegt. Damit zeigt sich auch bei Grünflächen die wichtige Rolle des Schattens auf den Energiehaushalt einer Nutzungsstruktur und damit auf die Temperatursituation am Tage.

Anzahl der Sommertage im Zeitraum 2046 - 2055

Die Ergebnisse für den Zeithorizont 2046 bis 2055 lassen den Einfluss des globalen Klimawandels allmählich sichtbar werden (Abb. 31). So liegt die Anzahl an Sommertagen in den stark überbauten Siedlungsflächen der Neustadt nun bei bis zu 29 Tage/Jahr, während er im Bereich Eimsbüttel mit bis zu 27 etwas geringer ausgeprägt ist. Die niedrigste Anzahl von Sommertagen innerhalb der Siedlungsflächen liegt u.a. in der Einzel- und Reihenhausbebauung von Othmarschen mit bis zu 18 vor.



Die Werte der betrachteten Aufpunkte sind für beide Zeitschnitte in Abb. 30 zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass unter dem Einfluss des Klimawandels die relativen Unterschiede zwischen den Nutzungsstrukturen auf ein insgesamt höheres Niveau angehoben werden. Auch innerhalb der Grünflächen ist eine Zunahme an Sommertagen mit mehr als 25°C zu beobachten. Während über den ausgedehnten Ackerflächen im Raum Ochsenwerder nun etwa zwischen 27 und 28 Tage/Jahr anzutreffen sind, ist die Anzahl der Sommertage im Stadtpark mit ca. 16 Tagen/Jahr unter den betrachteten Nutzungsstrukturen am niedrigsten (Ergebniskarten 2.3 und 2.4).

Abb. 31: Gegenüberstellung der Sommertage beider Zeithorizonte

7.3 Anzahl der Hitzetage

Als Hitzetage bzw. heiße Tage werden Witterungssituationen bezeichnet, an denen die Tageshöchsttemperatur über 30°C hinaus geht. In Abb. 32 sind die an der Station Hamburg-Fuhlsbüttel im Zeitraum 1891 bis 2007 aufgezeichneten Werte für Hitze- und Sommertage gemeinsam dargestellt (RIECKE u. ROSENHAGEN 2009). Dabei zeigt sich eine hohe Variabilität der Messungen, wobei insgesamt ein deutlicher Trend in der Zunahme von Sommer- und Hitzetagen zu beobachten ist. Während in den ersten zwei Dekaden des Messzeitraums kaum mehr als 2 heiße Tage/Jahr auftraten, betrug sie in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts häufig 5 und mehr Tage/Jahr. Nach einem Zeitraum vergleichsweise geringer Werteausprägungen in den 50er und 60er Jahren nahmen sie in den 70er Jahren wieder zu und gehen teilweise auch über 5 Tage/Jahr hinaus. Die höchsten Werte von bis zu 18 heißen Tagen/Jahr sind ab 1994 gemessen worden, wobei diese Tendenz mit Beginn des neuen Jahrhunderts anhält. Bezogen auf den linearen Trend ist ein Anstieg der Hitzetage von 1 Tag/Jahr am Ende des 19. Jahrhunderts auf 4 bis 5 zu Beginn des 21. Jahrhunderts zu beobachten.

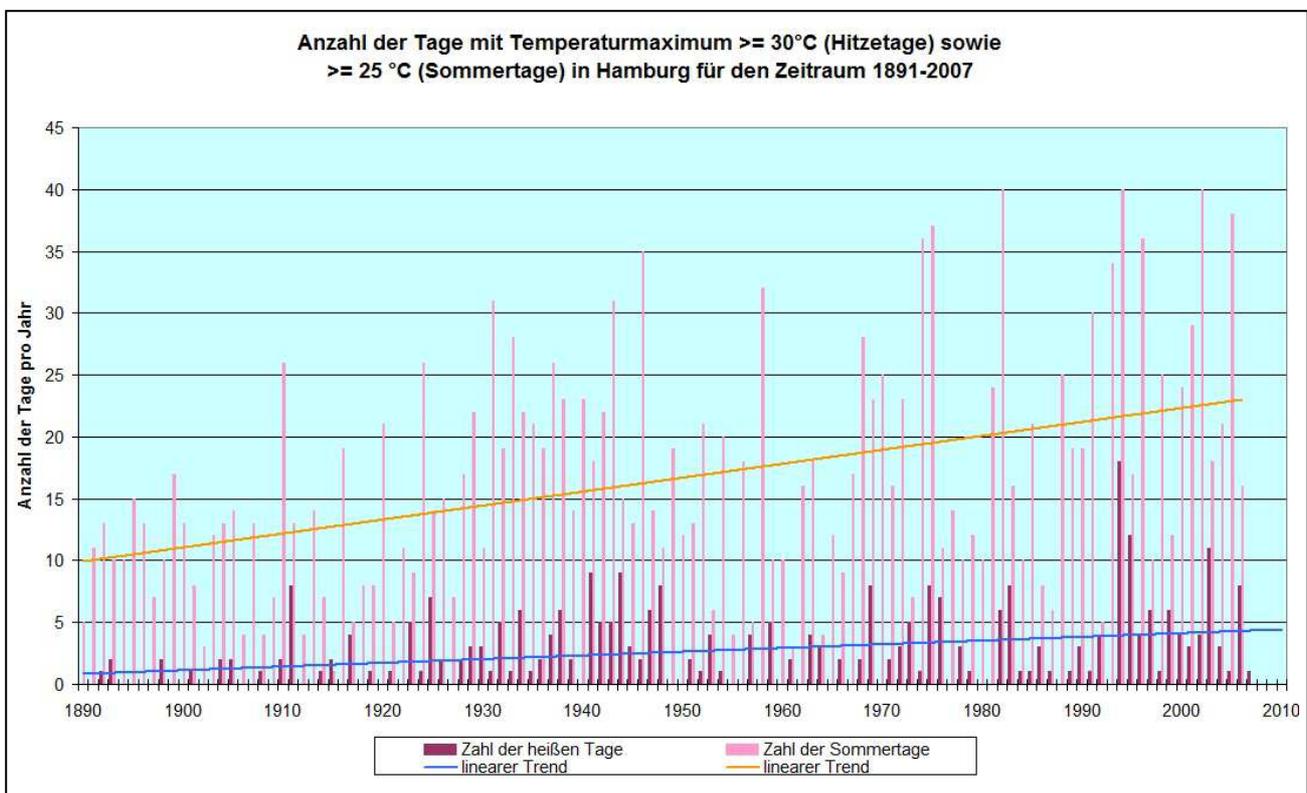


Abb. 32: Sommertage und Hitzetage im Zeitraum 1891 bis 2007 am Standort Fuhlsbüttel (Quelle: Riecke u. Rosenhagen 2009)

Auch die Anzahl der Sommertage ist innerhalb der Messperiode angestiegen, sie hat sich von durchschnittlich 10 Tage/Jahr auf 23 mehr als verdoppelt. Die höchsten Messwerte von über 35 Sommertagen/Jahr treten ab Mitte der 1970er Jahre auf. Die Ausprägung des Wertenniveaus geht tendenziell mit den Hitzetagen einher, wobei sich die Phasen mit einer hohen Anzahl von Sommertagen in den o.g. Zeiträumen verorten lassen. Wie die Modellrechnungen zum Klimawandel zeigen, setzt sich dieser Trend in der Zukunft voraussichtlich weiter fort. Während die dargestellten Werte den Freilandstandort einer Wetterstation repräsentieren, kann die tatsächliche Anzahl von Sommer- und Hitzetagen innerhalb von Siedlungsflächen durch den Einfluss von Bebauung und versiegelter Fläche noch größer sein.

Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 2001 - 2010

Die mit dem Klimamodell FITNAH modellierte Ausprägung der heißen Tage für den gewählten Ausschnitt von Hamburg zeigt Abb. 33 unter Berücksichtigung der lokalen nutzungsbedingten Einflussfaktoren. In den stark versiegelten Arealen der Hamburger Neustadt (1) sind die höchsten Werte von bis zu 6,2 heißen Tagen/Jahr zu beobachten. Mit bis zu 5,9 Tagen/Jahr ist das Auftreten von heißen Tagen in der Block- und Blockrandbebauung von Eimsbüttel (2) ähnlich hoch, während in der Einzel- und Reihenhausbebauung von Othmarschen (3) durchschnittlich bis zu 2 Tage/Jahr mit mehr als 30°C zu beobachten sind. Bei dieser Angabe handelt es sich um einen Durchschnittswert, der in einzelnen Jahren auch deutlich übertroffen werden kann.

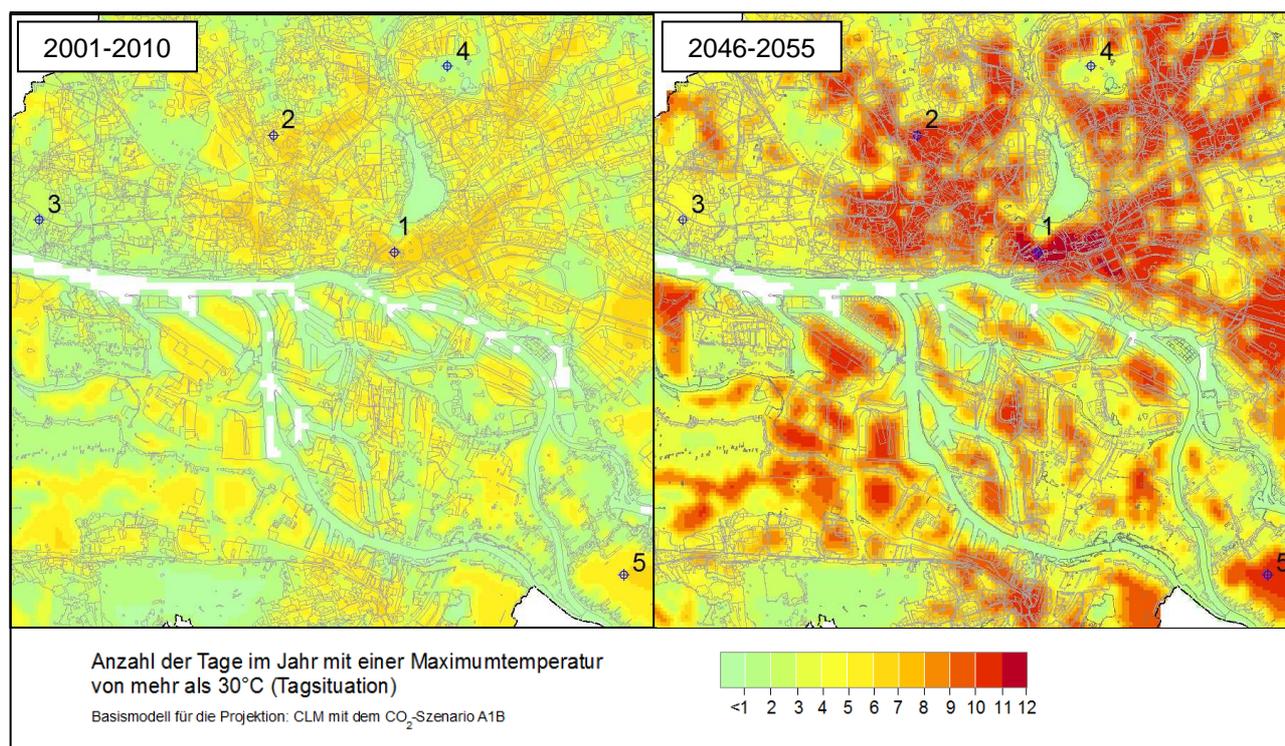
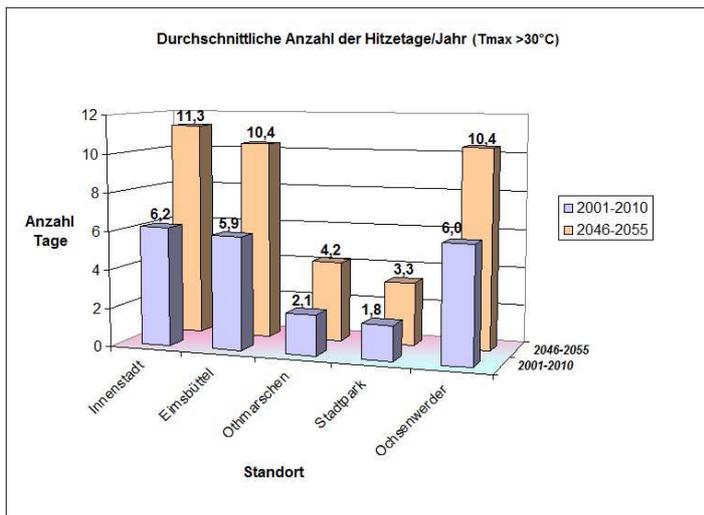


Abb. 33: Anzahl der Hitzetage/Jahr

Auch für die Grünflächen zeigt sich hier eine räumlich abgestufte Wertausprägung. Aufgrund der hohen solaren Einstrahlung und der damit einher gehenden Erwärmung der Luft ist im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen im Raum Othmarschen (5) eine vergleichsweise hohe Anzahl von bis zu 6 Tage/Jahr zu beobachten. Für den Stadtpark sind mit ca. 2 Tagen/Jahr wesentlich niedrigere Werte simuliert worden, da der ausgeprägte Baum- und Gehölzbestand einer stärkeren Erwärmung entgegen wirkt (vgl. Karte 2.5).

Anzahl der heißen Tage im Zeitraum 2046 - 2055

Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist eine markante Zunahme der heißen Tage zu verzeichnen. Mit einem Anstieg von 6 auf 11 Tage/Jahr in der Hamburger Neustadt bzw. auf 11 im Raum Eimsbüttel bedeutet dies nahezu eine Verdoppelung der Werte unter dem Einfluss des Klimawandels. Dies lässt sich auch innerhalb der Einzel- und Reihenhausbebauung von Othmarschen beobachten, hier steigt die Anzahl der Hitzetage von 2 auf 4 Tage/Jahr an (vgl. Karte 2.6).



Über Freiland ist die Anzahl der Hitzetage mit etwa 10 Tagen/Jahr ähnlich hoch wie in der Block- und Blockrandbebauung von Eimsbüttel (Abb. 34). Der Stadtpark weist mit etwa 3 Tage/Jahr das geringste Wertenniveau auf, wobei auch die übrigen innerstädtischen Grünflächen sowie die Landschaftsachsen mit vergleichsweise geringen Werten innerhalb der Siedlungsflächen hervortreten. Damit bildet sich die Heterogenität der Nutzungsstrukturen mit ihren jeweiligen thermischen Eigenschaften deutlich in den Ergebnissen ab.

Abb. 34: Gegenüberstellung der Hitzetage beider Zeithorizonte

7.4 Anzahl der Tropennächte

Die im Zeitraum 1935 bis 2010 gemessene Anzahl der Tropennächte, in der die Lufttemperatur nicht unter 20°C zurückgeht, ist mit durchschnittlich 0,2 Nächten pro Jahr sehr gering ausgeprägt. Das Maximum von vier Nächten ist im Jahr 1994 verzeichnet worden (DWD 2010). Das markante Wertemaximum, wie es für die Sommer- und Hitzetage beschrieben wurde, findet sich somit auch in diesem Parameter wieder.

Anzahl der Tropennächte im Zeitraum 2001 - 2010

Die räumliche Ausprägung der Tropennächte für den Zeithorizont 2001 - 2010 ist in Abb. 35 und in Ergebniskarte 2.1 (s. Kartenanhang) dargestellt. Dabei zeigt sich eine recht homogene Verteilung der Werte innerhalb der Siedlungsräume, wobei flächenhaft eine Anzahl von etwa 0,5 Tropennacht/Jahr beobachtet werden kann (grüne Farbe).

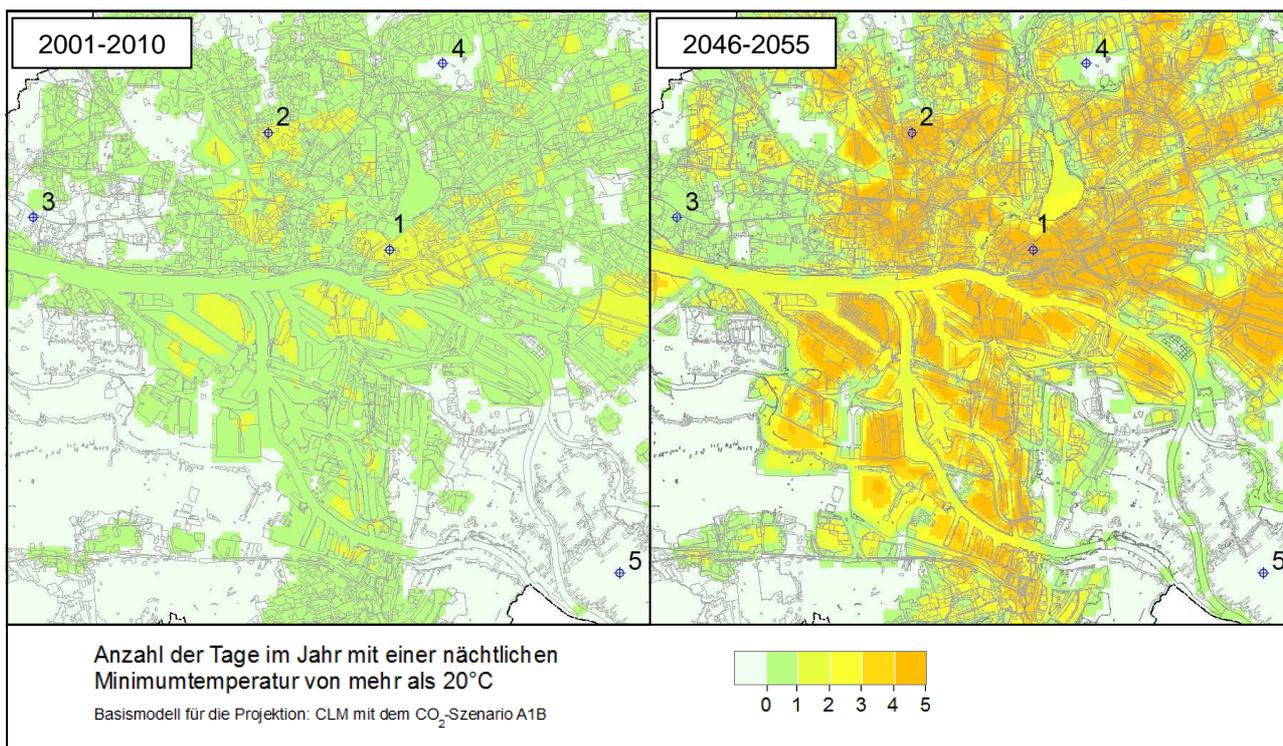


Abb. 35: Anzahl der Tropennächte/Jahr

Lediglich innerhalb der dichter bebauten Quartiere liegt mit mehr als 1 Nacht eine deutlich geringere Anzahl vor. Die Abstufung, die für die Parameter Sommertage und heiße Tage im innerstädtischen Bereich tagsüber sichtbar wurde, ist hier aufgrund des niedrigeren Ausgangsniveaus weniger deutlich vorhanden. Die größeren innerstädtischen Grünflächen weisen ebenfalls ein recht einheitliches Niveau auf. Mehr als durchschnittlich 0,5 Tage/Jahr sind dort in der Regel nicht zu verzeichnen.

Anzahl der Tropennächte im Zeitraum 2046 - 2055

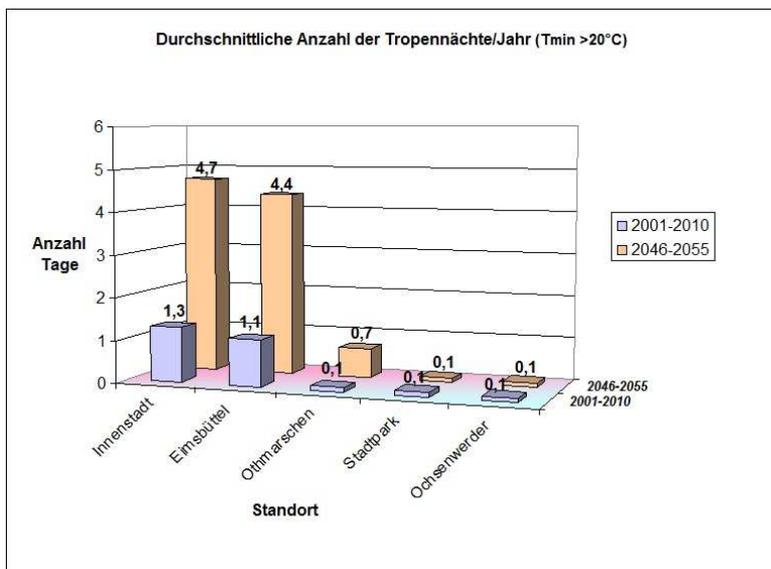


Abb. 36: Gegenüberstellung der Tropennächte beider Zeithorizonte

Ausgehend vom Zeitraum 2001-2010 ist zur Mitte des Jahrhunderts die Anzahl der Tropentage deutlich angestiegen (Abb. 36). So sind nun innerhalb der dichten Bebauung der Neustadt und angrenzender Bezirke bis zu 5 Tropennächte anzutreffen, während die Anzahl in den weniger dicht bebauten Arealen wie Othmarschen auf bis zu 1/Jahr leicht ansteigt. Gleichzeitig lässt sich der nächtliche temperatordämpfende Effekt der innerstädtischen Grünflächen und Landschaftsachsen beobachten. Innerhalb des Stadtparks ist die Anzahl

der Tropennächte/Jahr mit weniger als 0,5 weiterhin gering. Dies gilt auch für die ausgedehnten Freiflächen außerhalb des Umlands (s. Karte 2.2).

7.5 Integrierende Bewertung der Wärmebelastung am Tag

Eine wichtige Grundlage für die Beurteilung der bioklimatischen Belastung ist in der durchgeführten Untersuchung der Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die Wärmebelastung. Dieser basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und gibt den Grad der Unbehaglichkeit bzw. Behaglichkeit als mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Anzahl von Menschen in Wertestufen wieder. Als bedeutende, den PMV mitbestimmende Parameter sind Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und relative Feuchte zu nennen. Dabei sind vor allem in den dichter bebauten Siedlungsflächen die Lufttemperatur erhöht und gleichzeitig die Windgeschwindigkeit reduziert, was sich in dieser Kombination besonders ungünstig auf die Behaglichkeit auswirkt (vgl. Kap. 2.3.2, S. 11).

Ein Tag mit Wärmebelastung wird durch einen PMV-Wert von > 2.5 definiert, was einem „heißen“ thermischen Empfinden am Tage entspricht und beim Menschen eine Wärmebelastung bewirkt. Im Folgenden wird nun die Auswertung zur Anzahl der Tage mit einer Überschreitung dieser 2,5-Grenze im Jahr für beide Zeitschnitte erläutert.

Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2001 - 2010

Die räumliche Ausprägung der Anzahl von Tagen mit einem PMV >2.5 geht eng mit der baulichen Dichte der Siedlungsstrukturen einher, wobei ein hohes Bauvolumen in Verbindung mit einer geringen Grünausstattung das Auftreten von Wärmebelastungen begünstigt (Abb. 37). So tritt im Istzustand die höchste Anzahl von bis zu 20 Tage/Jahr flächenhaft vor allem im Bereich der Neustadt (1) auf, innerhalb der ausgedehnten Gewerbeareale wie den Hafenumflächen sind noch bis zu 17 Tage/Jahr zu beobachten (orange). Innerhalb der Block- und Blockrandbebauung liegt die Anzahl an Belastungstagen meist zwischen 12 und 14 pro Jahr. Die weniger verdichtete Einzel- und Reihenhausbebauung weist unter den Siedlungsräumen mit bis zu 5 Tage/Jahr die geringste Anzahl an Tagen mit einer Wärmebelastung auf.

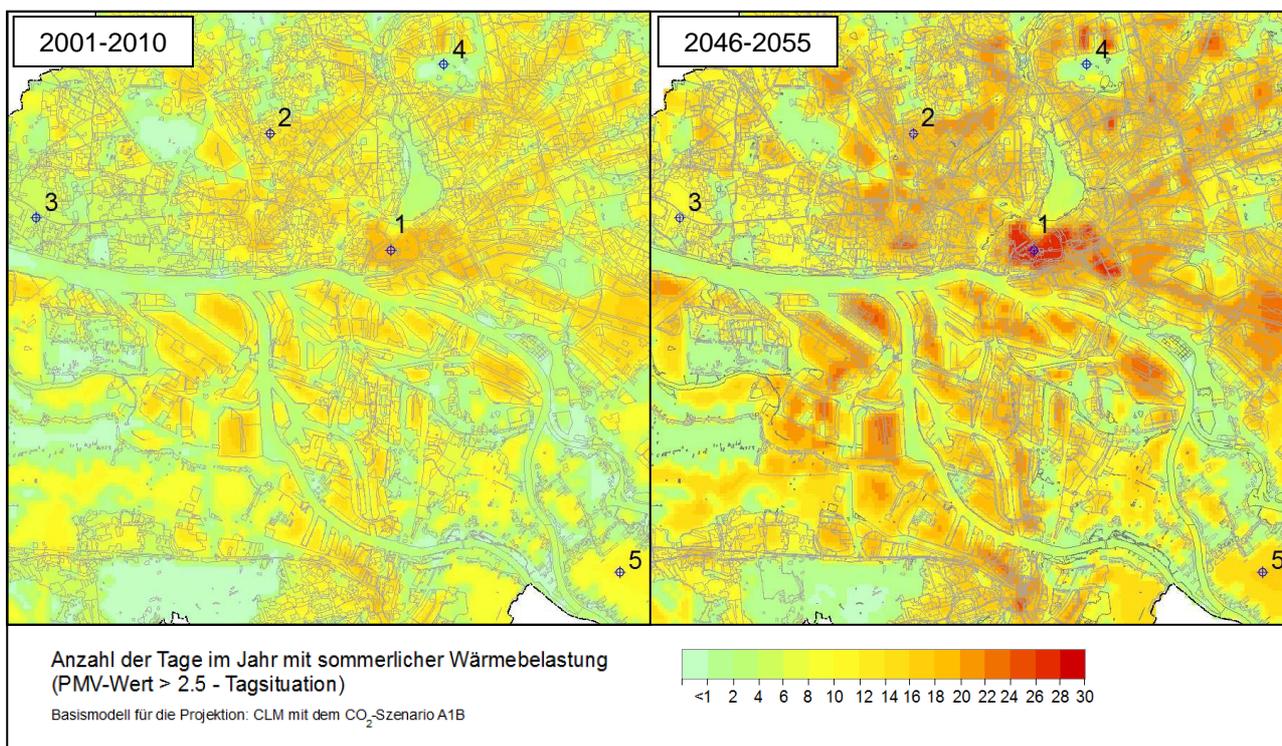
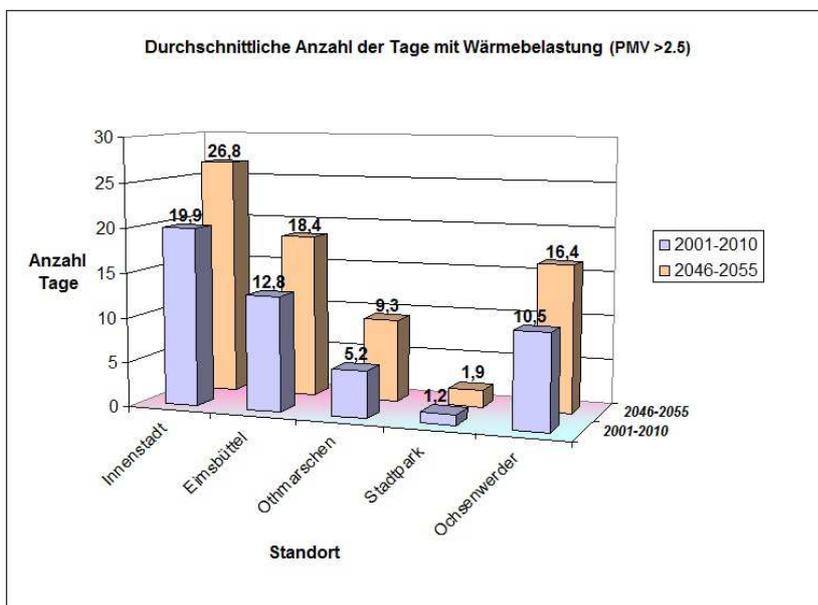


Abb. 37: Anzahl der Tage mit Wärmebelastung

Im Gegensatz zu den Tropennächten, welche ein recht einheitliches Niveau aufweisen, spiegeln sich die Eigenschaften der verschiedenen Grünflächen (s. Kap. 7.1) viel stärker in den Ergebnissen wider. So weisen die landwirtschaftlich genutzten Flächen des Umlands mit mehr als 10 Tagen/Jahr ein vergleichsweise hohes Belastungspotenzial auf, was auf den offenen, durch Ackerfläche geprägten Flächentyp mit starker Erwärmung am Tage zurück zu führen ist. Innerhalb der mit Bäumen und Gehölzen bestandenen Grünflächen wie dem Stadtpark tritt ein PMV >2,5 lediglich an etwa 1 Tag/Jahr auf. Hier wirken sich die vom Bestand ausgehende Verschattung und Verdunstungswirkung günstig auf das thermische Empfinden aus.

Anzahl der Tage/Jahr mit PMV > 2.5 am Tage im Zeitraum 2046 - 2055

Zur Mitte des Jahrhunderts wird sich die Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung vor allem in den dichteren Siedlungsflächen auf mehr als 26 Tage im Jahr erhöhen (Abb. 38). In der zentrumsnahen Wohnbebauung mit Block- und Blockrand wie in Eimsbüttel steigt die Anzahl der Tage auf etwa 18 bis 20 aber weniger stark an, da Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad meist geringer sind.



Innerhalb der durch Einzel- und Reihenhausbebauung gekennzeichneten Siedlungstypen ist die sommerliche Wärmebelastung tagsüber mit weniger als 10 Tage/Jahr etwa halb so hoch. Innerstädtische Grün- und Freiflächen heben sich, abhängig vom Flächentyp, ebenfalls durch deutlich niedrigere Werte ab, wobei der Stadtpark an etwa 2 Tagen im Jahr eine Wärmebelastung aufweist. Über Freiland bzw. den durch Wiese geprägten Grünflächen liegt mit ca. 16 Tagen/Jahr ein überdurchschnittliches Belastungs-

Abb. 38: Gegenüberstellung der Tage mit Wärmebelastung beider Zeithorizonte

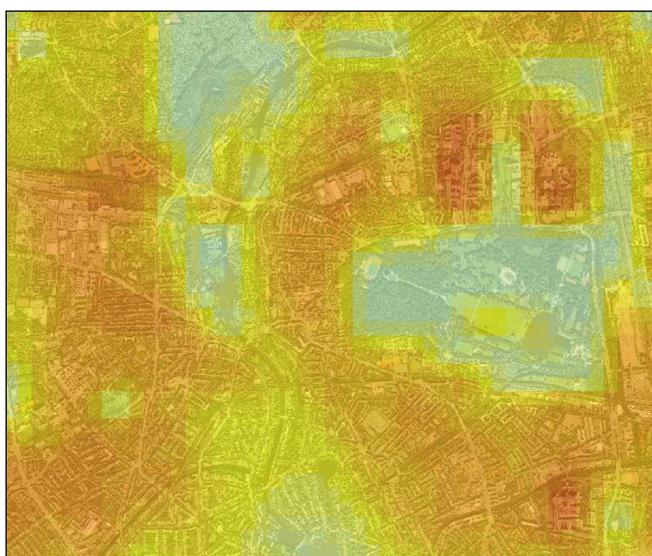


Abb. 39: Wärmebelastung im Bereich Stadtpark/Alster (Zeitschnitt 2050)

niveau vor, was auf den offenen Flächentyp mit einhergehender intensiver Einstrahlungssituation zurückzuführen ist. In Abb. 39 ist der Bereich Alster/Stadtpark dargestellt. Darin zeichnen sich die City Nord sowie die vorwiegend gewerblich genutzten und stärker versiegelten Flächen mit einer hohen Wärmebelastung ab (Orange). Gleichzeitig wird am Beispiel der Alsterniederung der positive Einfluss von Landschaftsachsen und anderen Grünflächen sichtbar, welche die „städtische Hitzeinsel“ in bioklimatische weniger belastete Areale untergliedern und damit auch als Bereiche hoher Aufenthaltsqualität während belastender sommerlicher Wetterlagen anzusehen sind (Hellgrün).

7.6 Bewertungskarte „Wärmebelastung innerhalb von Siedlungsflächen“

Als ein weiteres Ergebnis der Modellrechnungen wurde auf Grundlage der Zeitschnitte 2001 bis 2010 und 2046 bis 2055 eine Bewertungskarte erarbeitet, welche zum Ziel hat, diejenigen Siedlungsflächen hervorzuheben, welche bis zur Mitte des Jahrhunderts voraussichtlich am stärksten von einer Zunahme der sommerlichen Wärmebelastung am Tage betroffen sein werden. Für die weitere Bearbeitung wurden die rasterbasierten Ergebnisse der im Kap. 7.4 erläuterten Wärmebelastung (Anzahl der Tage mit einem PMV-Wert $> 2,5$ tagsüber) als Flächenmittelwerte auf die Blockflächen des Siedlungsraumes übertragen und mittels einer statistischen Analyse (Z-Transformation) die Ausprägung der Anzahl der Belastungstage innerhalb der Blockflächen untergliedert. Als Kriterium dient eine Anzahl von mehr als 11 Tagen im Jahr mit einem PMV-Wert $> 2,5$. Die Magentafarben kennzeichnen dabei insgesamt für beide Zeitschnitte diejenigen Siedlungsflächen, welche die höchste Wärmebelastung am Tage erwarten lassen (Abb. 40). Einen Detailausschnitt zeigt Abb. 41 auf S. 60.

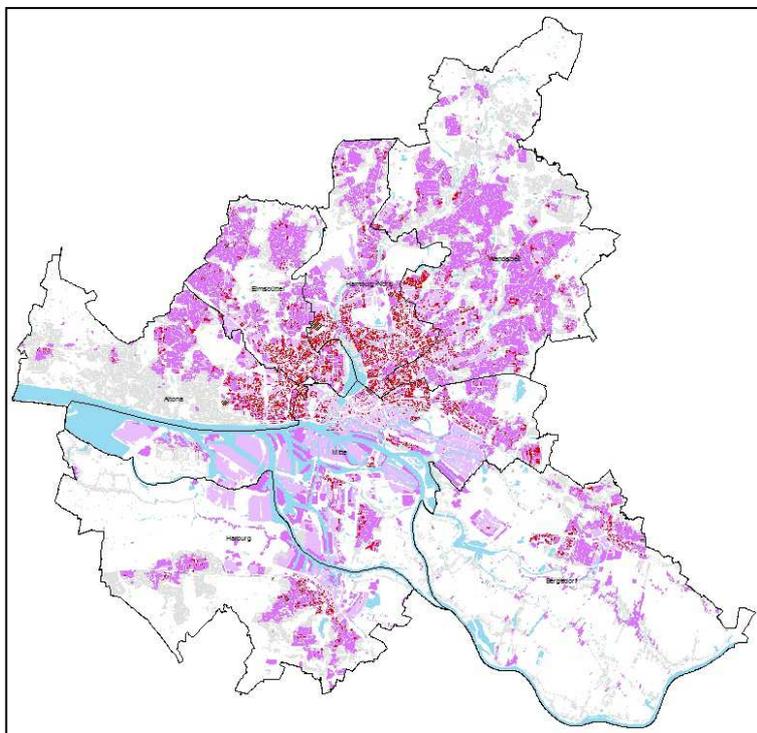


Abb. 40: Bewertungskarte Wärmebelastung situation - Karte 2.9)

(Tag-

Während das helle Magenta die Siedlungsflächen mit Wärmebelastung am Tage für den Ist-Zustand (Zeitraum 2001 bis 2010) kennzeichnet, sind die bis zur Mitte des Jahrhunderts zusätzlich belasteten Siedlungsflächen mit dunklem Magenta dargestellt. Um räumliche Handlungsschwerpunkte identifizieren zu können, sind zusätzlich Siedlungsflächen mit prioritärem Handlungsbedarf ausgewiesen worden. Dabei handelt es sich zum Einen um öffentliche Einrichtungen des Gesundheitswesens wie z.B. Krankenhäuser. Zum Anderen sind Wohnnutzungen gekennzeichnet, welche einen hohen Anteil junger (< 5 J.) oder älterer (> 65 J.) Menschen, eine überdurchschnittliche bauliche Dichte (Geschossflächenzahl > 1), sowie eine erhöhte Einwohnerdichte (> 10.000 EW/km²) aufweisen.

Aufgrund dieser Merkmale ergibt sich in diesen Bereichen eine besondere Empfindlichkeit und sind somit Vorranggebiete für die Durchführung von Maßnahmen im Handlungsfeld Bioklima.

In der bewerteten Ist-Situation weist ein Großteil der Siedlungsflächen in den Bezirken Neustadt, Altona und St. Georg eine bioklimatische Belastung an Sommertagen auf (helles Magenta Abb. 41). Ausgehend vom Istzustand, wird sich dieser Flächenanteil bis zur Mitte des Jahrhunderts in Richtung auf die Peripherie vergrößern. Die durchgrüneten Siedlungsflächen im Bereich Othmarschen sowie beispielsweise auch im Umfeld der Außenalster weisen auch zur Mitte des Jahrhunderts mit einer geringen Belastungssituation noch meist vergleichsweise günstige bioklimatische Bedingungen am Tage auf (graue Farbe). Gleichzeitig sind auch die an Grün- bzw. Landschaftsachsen angrenzenden Siedlungsflächen meist gering belastet, was die Abhängigkeit der bioklimatischen Situation von Bebauungsstruktur einerseits und der Nähe zu entlastenden Grünflächen andererseits deutlich macht.

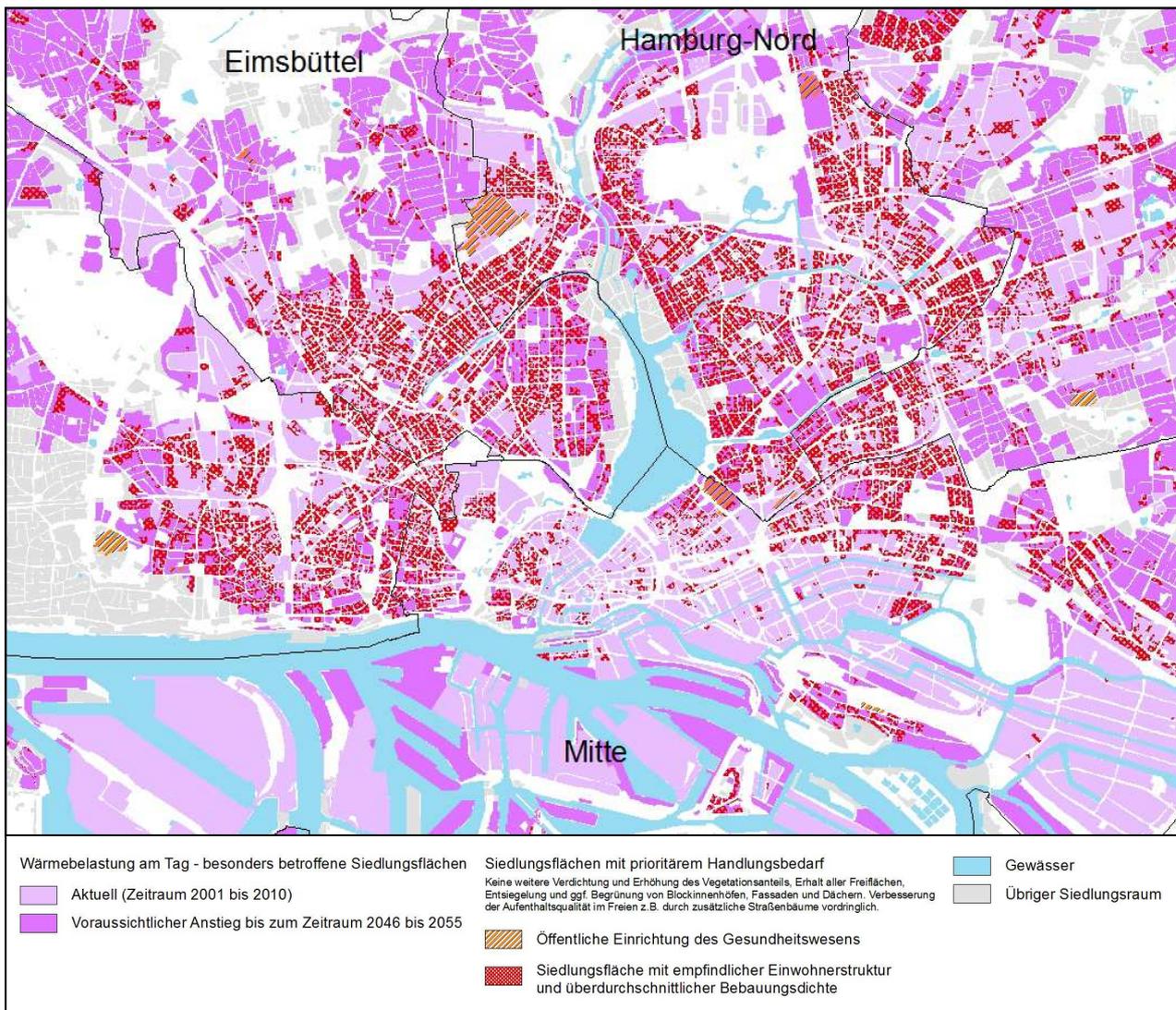


Abb. 41: Bewertungskarte Wärmebelastung (Ausschnitt Karte 2.9)

Im ersten Teil der Klimaanalyse stehen der lokale nächtliche Kaltluftaustausch und die Sicherung und Verbesserung der damit in Zusammenhang stehenden relevanten Strukturen und Grünflächen im Vordergrund. Die planerischen Schlussfolgerungen aus den Klimawandelszenarien haben zum Ziel, vor allem die Wärmebelastung am Tage zu verringern. Sie unterscheidet sich hinsichtlich der Prozesse von der nächtlichen Wärmebelastung.

Allgemeine Maßnahmen zur 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 wird gleichzeitig weniger Strahlungsenergie in der Baumasse gespeichert und in der Nacht auch weniger Wärme an die Luft abgegeben.

Die für die belasteten Bereiche abzuleitenden Hinweise zielen deshalb vor allem darauf ab, einerseits durch zusätzliche Verschattung die Aufenthaltsqualität im Freien zu steigern und andererseits den Gebäudebestand hitzeangepasst zu gestalten:

- Keine weitere Verdichtung und Erhöhung des Vegetationsanteils
- Erhalt aller Freiflächen / wenn möglich Schaffung neuer Frei- und Vegetationsflächen
- Entsiegelung von Blockinnenhöfen und Straßenraum
- Straßenbäume erhalten und Lücken schließen
- Verbesserung der wohnungsnahen Grünflächenversorgung

Zudem lässt sich über 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 die Schallreflexion und damit die Lärmbelastung und kann zu einem gewissen Grad Stäube und Luftschadstoffe binden.

Bei der Dachbegrünung wirkt die Vegetation zusammen mit dem Substrat isolierend und verringert damit das Aufheizen darunter liegenden Wohnraums. Zudem senkt die Dachbegrünung die Oberflächentemperatur des Daches aufgrund der Verdunstung von Wasser ab und verringert die Temperatur in der oberflächennahen Luftschicht. Voraussetzung dafür ist allerdings 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 hinaus gehen. 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 Retentionsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird.

Die beschriebenen Maßnahmen beziehen sich prinzipiell auf sämtliche Siedlungsflächen mit aktueller und zukünftiger Wärmebelastung. Vordringlich werden sie aber vor allem in den dichter bebauten Siedlungsflächen, welche zudem einen überdurchschnittlich hohen Anteil junger bzw. älterer Menschen mit besonderer Empfindlichkeit gegenüber sommerlicher Wärmebelastung aufweisen. Diese Areale sind in Karte 2.9 ausgewiesen.

Betroffenheitsanalyse - Siedlungsflächen mit Wärmebelastung

Auf Grundlage der vorhandenen Bevölkerungsdaten (Stand 2009) wurde in einem weiteren Schritt eine Betroffenheitsanalyse zur sommerlichen Wärmebelastung durchgeführt. Da derzeit noch keine Prognose zur Bevölkerungsentwicklung vorliegt, wird die Betroffenheitsanalyse auf Grundlage der Daten von 2009 durchgeführt. Um Aussagen über die Veränderungen bis zur Mitte des Jahrhunderts treffen zu können, sind die für den Zeitraum 2001 bis 2010 sowie 2046 bis 2055 ausgewiesenen Belastungsbereiche hinsichtlich der Bevölkerungsstruktur ausgewertet worden (vgl. Flächenkulisse in Abb. 41 bzw. Karte 2.9). Im Zeitraum 2001 bis 2010 sind tagsüber 22 % der Siedlungsfläche in Hamburg als bioklimatisch belastet einzustufen. Bis zum Zeithorizont 2046 bis 2055 nimmt dieser Anteil auf etwa 68 % zu.

Betroffenheitsanalyse - Anzahl betroffener Einwohner

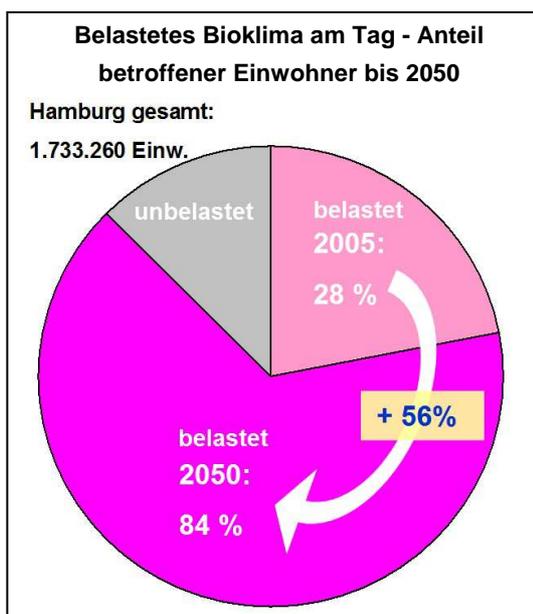


Abb. 42: Anteil betroffener Einwohner

Bezogen auf die Einwohnerzahlen lässt sich feststellen, dass derzeit (Zeithorizont 2001-2010) etwa 28 % der Bevölkerung betroffen sind (Abb. 42). Bis zum Zeithorizont 2046-2055 wird dieser Anteil um 56 Prozentpunkte auf 84 % ansteigen. Aus dieser Zahl lässt sich in einem weiteren Schritt der Anteil der von sommerlicher Wärmebelastung vorrangig betroffenen Gruppen an der Gesamtbevölkerung ermitteln.

Bei den besonders empfindlichen Bevölkerungsgruppen handelt es sich neben Kranken vor allem um die ganz jungen bzw. alten Menschen, da wegen ihrer körperlichen Konstitution sommerliche Hitzeperioden eine gesundheitliche Gefahr darstellen können. Aufgrund der Flächenzunahme von bioklimatisch belasteten Siedlungsraum wie sie in Karte 2.9 dargestellt wird und unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der empfindlichen Gruppen wird der von Wärmebelastung betroffene Anteil *junger Menschen* (< 5 J.) von aktuell 27 % auf zukünftig 84 % im Jahr 2050 ansteigen, was einer Zunahme von etwa 58 Prozentpunkten entspricht.

Ältere Menschen werden in ähnlichem Ausmaß von einem Abstieg der Belastung betroffen sein. Dieser Anteil erhöht sich von 21,7 % auf 81,1 % im Jahr 2050. Damit zeichnet sich, auf Grundlage der momentan zur Verfügung stehenden Informationen, eine markante Zunahme in der Betroffenheit gesundheitlich empfindlicher Bevölkerungsgruppen bis zur Mitte des Jahrhunderts ab. Genauere Aussagen werden erst mit dem Vorliegen von weiteren Bevölkerungsdaten möglich sein, welche auch die perspektivische demographische Entwicklung bis zur Mitte des Jahrhunderts beinhalten.

8 Fazit

Die vorliegende Untersuchung hat die klimaökologischen Funktionszusammenhänge im Stadtgebiet Hamburg während austauscharmer, sommerlicher Hochdruckwetterlagen dargelegt. Durch die Zufuhr von frischer und kühlerer Luft können klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistungen für die Belastungsräume erbracht werden. In diesem Rahmen sind bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume einerseits sowie entlastende, Kaltluft produzierende Flächen andererseits ausgewiesen worden. Insgesamt gesehen ist das klimatische Ausgleichspotenzial der umgebenden Freiflächen als ausreichend anzusehen. Jedoch weisen Teilräume des Untersuchungsgebietes ein erhöhtes bioklimatisch-lufthygienisches Belastungspotenzial in der Nacht auf (Abb. 43). Eine Flächenbilanzierung der vorliegenden Belastungsklassen ergibt:

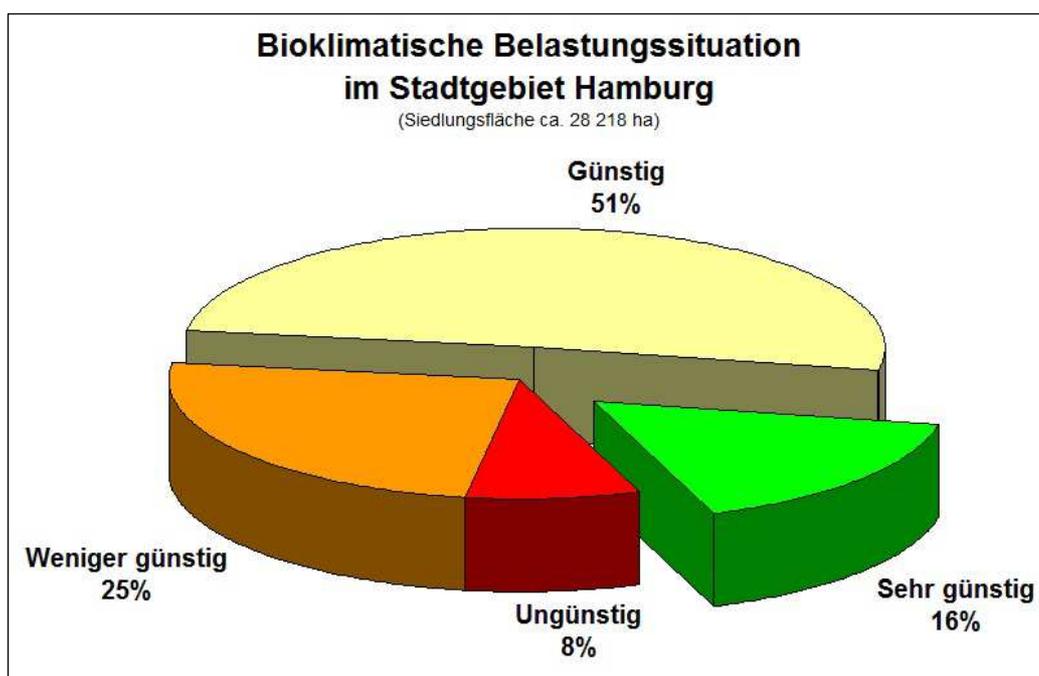


Abb. 43: Flächenanteile der bioklimatischen Belastung (Nachtsituation)

- 8 % der Siedlungsfläche weisen, bezogen auf die Verhältnisse in der Region Hamburg, eine sehr hohe bioklimatische Belastung auf und sind als ungünstig einzuordnen.
- 25 % sind hoch belastet
- 51 % weisen günstigere Bedingungen auf und haben damit eine mäßige Belastung
- 16 % des Siedlungsraumes sind gering belastet und als bioklimatisch sehr günstig anzusehen

Des Weiteren werden ca. 30 % des *Stadtgebietes* zum Zeitpunkt 22:00 von Kaltluft durchströmt. Dieser Flächenanteil steigt bis 04:00 Uhr auf 53 % an. In der zweiten Nachthälfte befinden sich etwa 40 % der *Siedlungsfläche* im Einwirkungsbereich von Flur-/Strukturwinden und/oder lokalen Kaltluftabflüssen.

Als klima- und immissionsökologisches Qualitätsziel ergibt sich die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung wichtiger Oberflächenstrukturen zur Verbesserung bzw. Erhaltung bioklimatisch günstiger Verhältnisse sowie der Luftqualität. Durch die Kenntnis der wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie Kaltluftentstehungsflächen, Luftleitbahnen und Komforträumen sowie ihrer

qualitativen Einordnung steht mit der vorliegenden Untersuchung eine wichtige Grundlage zur Umsetzung dieser Ziele bereit.

Für die Bewertung der bioklimatischen Situation von Siedlungsflächen wird nach VDI (2008) das lokale Wertenniveau eines Untersuchungsraumes herangezogen und dient als Grundlage für die räumliche Abgrenzung der unterschiedlichen Belastungsbereiche. Damit stehen weniger die absoluten Werte im Vordergrund als vielmehr die Abweichung von den mittleren Verhältnissen. Je höher beispielsweise die Lufttemperatur oder PMV-Wert in einer Siedlungsfläche vom Gebietsdurchschnitt abweicht, desto günstiger (niedrigere Temperatur: z.B. Einzelhausbebauung) bzw. ungünstiger (höhere Temperatur: z.B. Blockbebauung) ist die Situation zu bewerten. Über eine räumliche Analyse lässt sich dann die Flächenkulisse der bioklimatischen Situation ausweisen.

Um die gemachten Aussagen zur bioklimatischen Situation in Hamburg besser einordnen zu können, sind in Abb. 44 am Beispiel des Parameters „Tage mit Wärmebelastung“ die Werte für Hannover und Karlsruhe vergleichend für verschiedene Stadtstrukturen dargestellt. Dabei handelt es sich ebenfalls um die mit dem Methodenpaket „Envelope“ (Kap. 2.4, S. 13) für mehrere Zeitschnitte simulierten Ergebnissen. Es zeigt sich, dass die relative Werteverteilung innerhalb der Nutzungsstrukturen zwischen den Städten vergleichbar sind, sie sich aber deutlich in ihrem Wertenniveau unterscheiden.

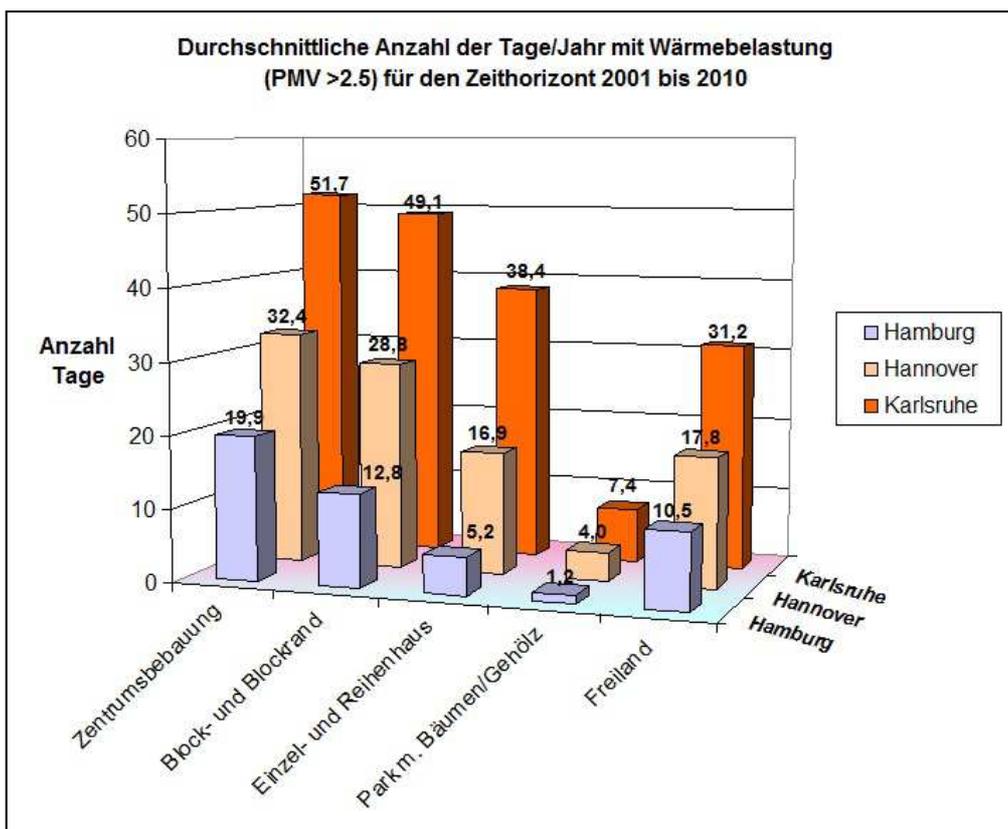


Abb. 44 Ausprägung der sommerlichen Wärmebelastung (tagsüber) in verschiedenen Städten

Die Gegenüberstellung in Abb. 44 macht deutlich, dass aufgrund der räumlichen Lage Hamburgs und den damit einhergehenden maritimen Wettereinflüssen auch das Belastungsniveau geringer ist. Wie die Ergebnisse in Kap. 7 zeigen, wird sich das Wertenniveau bis zur Mitte des Jahrhunderts dem derzeitigen von Hannover annähern. Während in der Hamburger Neustadt mit einer ausgeprägten Zentrumsbebauung derzeit bis zu 20 Tage/Jahr mit Wärmebelastung zu beobachten sind, liegen sie in der Innenstadt von Hannover bei etwa 34 Tage/Jahr.

Deutlich höher ist die Anzahl der Belastungstage in Karlsruhe, wo sich die Werte im Vergleich zu Hamburg durch die Lage im Rheintal, dem häufigen Auftreten austauscharmer Wetterlagen sowie einem insgesamt höheren Temperaturniveau mehr als verdoppeln. In allen drei Städten weisen andererseits die weniger stark überbauten Flächentypen wie Einzel- und Reihenhausbauung günstige bioklimatische Bedingungen auf. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist von einem weiteren Anstieg der sommerlichen Wärmebelastung auszugehen. Vor dem Hintergrund des sich abzeichnenden Klimawandels ist eine klimagerechte Stadtentwicklung auch für eine küstennahe Metropole wie Hamburg relevant.

Der Fokus der weiteren städtebaulichen Entwicklung liegt in Hamburg bei der Innenverdichtung. Dies trägt zur Auslastung der sozialen und technischen Infrastruktur bei (Schulen, Kindergärten, ÖPNV) und vermindert weitere Versiegelungen, die Zunahme von Verkehrsflächen und Flächeninanspruchnahme im Außenbereich. Nachverdichtungs- und Innenentwicklungsprojekte tragen jedoch auf der anderen Seite vermutlich auch zu weiteren Erwärmungen des Siedlungsgebietes bei, die sich durch die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in den nächsten Dekaden noch verstärken wird. Damit die Nachverdichtung nicht zu klimatisch negativen Effekten führt ist es notwendig, die Wechselwirkungen zwischen der baulichen Dichte, den damit verbundenen Gebäudevolumina, Grünanteilen sowie Versiegelungsgraden auf der einen Seite und der bioklimatischen Belastung einzelner Quartiere in der Zukunft zu betrachten, damit planerische Entscheidungen diese Belange mit in die Abwägung einbeziehen können.

9 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

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-/Frischluchtströmung in einen → 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: 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 m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt.

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-/Frischluff 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.

PMV-Wert: Grundlage für die Beurteilung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen. Er basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und gibt den Grad der Unbehaglichkeit bzw. Behaglichkeit als mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Anzahl von Menschen wieder.

PMV Z-Transformation: Dieses Verfahren wird für die Untergliederung der Siedlungsflächen in bioklimatisch günstige bzw. ungünstige Bereiche herangezogen. Es legt das lokale/regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde und bewertet die Abweichung des PMV-Wertes (oder eines anderen Klimaparameters) von den mittleren Verhältnissen in einem Untersuchungsraum (vgl. VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1). Unter Berücksichtigung der oberen und unteren S1-Schranke der Standardabweichung werden 4 Bewertungskategorien (sehr günstig / günstig / weniger günstig / ungünstig) ausgewiesen.

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).

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 °C 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-/Frischluff aus dem → Ausgleichsraum, die zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen beiträgt.

10 Literatur

- DEUTSCHER WETTERDIENST (2011): Wetterdaten der Station Hamburg-Fuhlsbüttel für den Zeitraum 1962 bis 2009.
- 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.
- EUROPEAN COMMISSION (1994): EUR 12585 - CORINE Landcover project - Technical guide. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg.
- IVU UMWELT GmbH (2005): Programmsystem PROKAS.
- 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
- 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.
- RIECKE, W. und ROSENHAGEN, G. 2009): Das Klima von Hamburg. Ber. Dt. Wetterdienst, ergänzte Neuauflage von Ber. dt. Wetterd. 15 (H3), 1976.
- RÖCKLE, R. und C.-J. RICHTER (1995): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. PEF-Bericht 136, Forschungszentrum Karlsruhe.
- RODI, W. (1980): Turbulence models and their application in hydraulics. IAHR Section on Fundamentals of Division II: Experimental and mathematical fluid dynamics, Delft.
- SCHÄDLER, G. et al. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. PEF Bericht 138, Forschungszentrum Karlsruhe.
- SCHERER, D. (2007): Viele kleine Parks verbessern Stadtklima. Mit Stadtplanung Klima optimieren. In: TASPO Report. Die Grüne Stadt. Oktober 2007
- SCHLÜNZEN et al. (2009): Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. Internat. J. Climatology, Early View 2009.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2009): Digitale Orthophotos für das Stadtgebiet Hamburg.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2009): Digitale Biotoptypenkarte für das Stadtgebiet Hamburg.

FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2009): Digitales Versiegelungskataster für das Stadtgebiet Hamburg.

FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2009): Digitales Gebäudemodell für das Stadtgebiet Hamburg.

FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2009): Digitales Geländehöhenmodell für das Stadtgebiet Hamburg.

UBA (2010): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 3.1/Januar 2010. INFRAS AG, Bern Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin.

ULRICH, W. (1987): Simulationen von thermisch induzierten Winden und Überströmungssituationen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 57.

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.