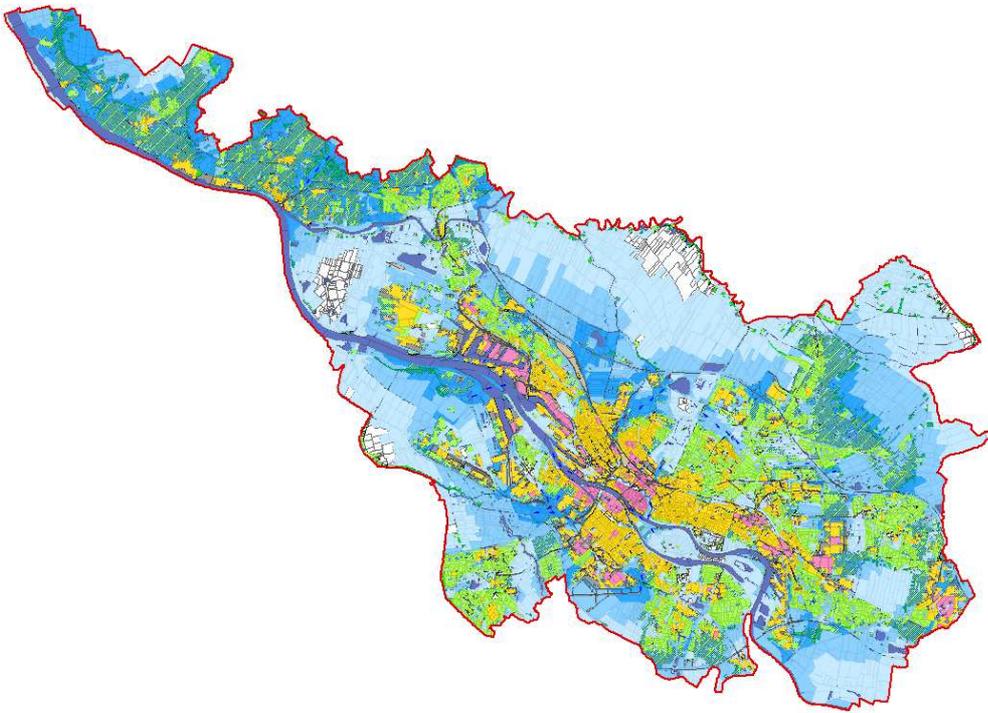


Klimaanalyse

für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen



Auftraggeber:

Freie Hansestadt Bremen
Der Senator für Umwelt,
Bau und Verkehr
Ansgaritorstraße 2
28195 Bremen



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

3 0 1 6 1 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 Kleinklima der IHK Hannover-Hildesheim

Hannover, August 2013

Auftrag: Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansstadt Bremen

Standort: Hansestadt Bremen
Bundesland: Bremen
Deutschland

Auftraggeber: Freie Hansestadt Bremen
Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Angaritorstraße 2
28195 Bremen

Projektnummer: 2_12_013

Berichtsnummer: 2_12_013_Bremen-Klimaanalyse_rev02

Version: 3

Datum: 21.08.2013

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

Erstellt von: 

Dr. Christa Etling

Unter Mitarbeit von: 

Prof. Dr. Günter Groß

Geprüft von: 

Dipl.-Geogr. Peter Trute

Inhaltsverzeichnis

Seite:

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
1. Aufgabenstellung	3
2. Die klimatische Situation von Bremen	4
3 Methodik und Datengrundlagen der Stadtklimaanalyse	8
3.1. Einleitung.....	8
3.2. Eingangsdaten.....	10
3.3. Methodik der Modellrechnung.....	12
3.4. Methodik der Bewertung der klimaökologischen Nutzungsstrukturen	18
3.5. Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung	25
4. Ergebnisse der Modellrechnung	26
4.1. Das bodennahe Lufttemperaturfeld	26
4.2. Kaltluftproduktionsrate und Kaltluftentstehungsgebiete	30
4.3. Das nächtliche Strömungsfeld	32
4.4. Kaltluftvolumenstrom	34
5. Klimafunktionskarte	36
5.1. Grünflächen und Freiräume.....	37
5.2. Siedlungsräume.....	40
5.3. Luftaustausch	43
6. Planungskarte Stadtklima	47
6.1. Grünflächen und Freiräume.....	47
6.2. Siedlungsräume.....	53
6.3. Luftaustausch	55
6.4. Kleinräumige Maßnahmen zur Verringerung der Wärmebelastung	55
7. Zusammenfassung	57
Literatur	59
Glossar	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Klimadiagramm Bremen-Flugwetterwarte (Zeitraum 1991–2010)

Abb. 2.2: Maximale Lufttemperaturen in °C an der Station Bremen-Flughafen

Abb. 2.3: Windrichtungsverteilung an der Station Bremen-Flughafen

Abb. 2.4: Prinzipskizze Flurwinde

Abb. 3.1: Eingangsdaten für die Modellrechnung

Abb. 3.2: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 125 m x 125 m) bei einem digitalen Geländehöhenmodell

Abb. 3.3: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

Abb. 3.4: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

Abb. 3.5: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Bewertungsschemas für z-transformierte Parameter.

Abb. 3.7: Prinzipskizze einer Kaltluftleitbahn

Abb. 4.1: Bodennahe Temperaturen in °C für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Abb. 4.2: Temperaturverteilung in der Innenstadt.

Abb. 4.3: Qualitative Einstufung der Kaltluftproduktionsrate im Untersuchungsgebiet Bremen

Abb. 4.4: Strömungsgeschwindigkeit in m/s und Strömungsrichtung (Pfeildarstellung) zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Abb. 5.1: Legende der Klimafunktionskarte und Ausschnitt: Bremen-Nord.

Abb. 5.2: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte: Bereich Industriehäfen, Überseestadt.

Abb. 5.3: Durchströmte Siedlungsbereiche: Bremen Oberneuland.

Abb. 5.4: Bilanz der Bioklimatischen Belastungssituation der Siedlungsflächen im Stadtgebiet von Bremen

Abb. 5.5: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte: Bremen Zentrum

Abb. 6.1: Legende der Planungshinweiskarte und Kartenausschnitt: Bremen Innenstadt

Abb. 6.2: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte, östliches Stadtgebiet

1. Aufgabenstellung

Die Freie Hansestadt Bremen stellt derzeit das Landschaftsprogramm für das Stadtgebiet Bremen neu auf. Vor diesem Hintergrund soll eine aktuelle, gesamtstädtische Klimaanalyse erarbeitet werden, aus der Handlungsleitfäden für zukünftige Planungen abgeleitet werden können. Die GEO-NET Umweltconsulting GmbH wurde von der Freien Hansestadt Bremen beauftragt, eine gesamtstädtische klimaökologische- und lufthygienische Analyse auf Basis von Modellierungen zu erarbeiten. Die Modellierungen werden in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover – anerkannt beratender Meteorologe) durchgeführt.

2. Die klimatische Situation von Bremen

Die Stadt Bremen liegt zentral in der norddeutschen Tiefebene im naturräumlichen Bereich der Wesermarschen. Das Klima in der norddeutschen Tiefebene wird primär durch ihre die Lage im Bereich der Westwinddrift bestimmt, mit der häufig Luftmassen aus dem atlantischen Raum das Wetter bestimmen. Da Topographie von untergeordneter Bedeutung ist, bestimmt weiterhin die Distanz zur Nordsee lokale Klimaunterschiede. Die Stadt liegt somit in einem maritim geprägten Bereich, mit allgemein vergleichsweise kühlen Sommern und milden Wintern. Gelegentlich setzt sich aber auch kontinentaler Einfluss mit länger anhaltenden Hochdruckphasen durch. Dann kann es im Sommer bei schwachen östlichen oder südöstlichen Winden zu höheren Temperaturen und trockenem sommerlichen Wetter kommen. Im Winter sind solche kontinental geprägten Wetterlagen durchweg mit Kälteperioden verbunden. Nach der Klimaklassifikation von Köppen-Geiger zählt das nördliche Niedersachsen einschließlich Bremen insgesamt zum warm gemäßigten Regenklima, bei dem die mittlere Lufttemperatur des wärmsten Monats unter 22 °C und die des kältesten Monats über –3 °C bleibt (Cfb-Klima). Abbildung 2.1 zeigt für die Station Bremen-Flughafen des Deutschen Wetterdienstes durchschnittliche Monatsmittelwerte von Niederschlag (in mm) und Lufttemperatur (in °C) für den Zeitraum 1991 bis 2010, die einen charakteristischen Verlauf für diese Klimazone aufweisen.

Die Station Bremen-Flughafen liegt am südlichen Stadtrand Bremens. Der Messstandort nimmt im thermischen Verhalten eine Zwischenstellung zwischen dem inneren Stadtgebiet und der ländlichen Umgebung ein. Langzeitige Messungen haben gezeigt, dass das Stadtgebiet im Mittel etwa 1 K (Kelvin¹) wärmer ist als die ländliche Umgebung (DWD, 1983). Dabei ist die Temperaturdifferenz im Sommer aufgrund des unterschiedlichen Rückstrahlungs- und Absorptionsverhaltens der städtischen Bebauung im Vergleich zu den umgebenen Freiflächen höher. Diese Unterschiede zeigen sich besonders deutlich in den Abendstunden, in denen die wärmespeichernde Bausubstanz des Stadtgebietes die Lufttemperaturen weniger stark absinken lässt. In solchen Situationen wurden Temperaturdifferenzen von 5 Kelvin und mehr registriert.

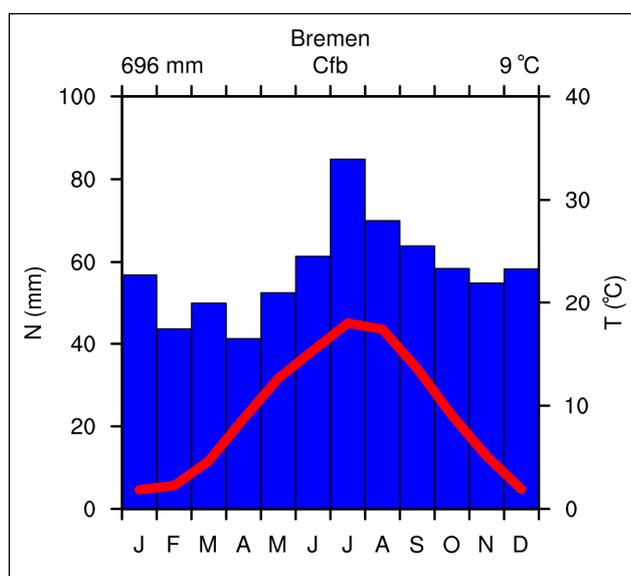


Abb. 2.1: Klimadiagramm Bremen-Flugwetterwarte (Zeitraum 1991–2010). Monatsmittelwerte der Niederschlagsmengen (N) in mm (*blaue Balken*) und der Lufttemperatur (T) in °C (*rote Kurve*). (Datengrundlage: Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes, www.dwd.de)

¹ S. Glossar

Vom Deutschen Wetterdienst wurden am 18. und 19. August 2012 insgesamt drei Profilmessfahrten durch das Stadtgebiet von Bremen durchgeführt, die deutlich die kleinräumige Variabilität der Temperatur innerhalb unterschiedlicher Ortsteile aufzeigen (DWD, 2013). Die Fahrten wurden jeweils entlang der gleichen Routen durchgeführt. Durch eine Messfahrt am Nachmittag wurden in etwa die Tagesmaxima, mit der Fahrt am frühen Morgen die Tagesminima erfasst. Die Fahrt während der Abendstunden verdeutlicht die unterschiedlichen Abkühlungsraten der Ortsteile. Für die nachmittägliche Route wurde eine maximale Temperaturdifferenz von 4,4 K, mit Werten zwischen 26,9 °C und 31,2 °C ermittelt. Die niedrigsten Temperaturen traten dabei im Bereich des Bürgerparks / Findorffallee auf, hohe Temperaturen wurden vor allem in dicht bebauten innerstädtischen Bereichen gemessen. Bis zur abendlichen Messfahrt wachsen die Temperaturunterschiede nochmals an und erreichen eine Differenz von bis zu 5,5 K. Die Fahrt am frühen Morgen fand bei Temperaturen zwischen 17,6 °C und 21,8 °C statt und weist da mit einer Temperaturdifferenz von 4,2 K auf. Auf die Ergebnisse der morgendlichen Messfahrt wird an späterer Stelle noch eingegangen werden.

Das langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt an der Station Bremen-Flughafen 9 °C. In den letzten 20 Jahren wurde in 18 Jahren Temperaturmaxima von 30 °C und höher registriert. Die höchsten Temperaturen wurde im Sommer 1992 mit 37,6 °C erreicht (s. Abb. 2.2).

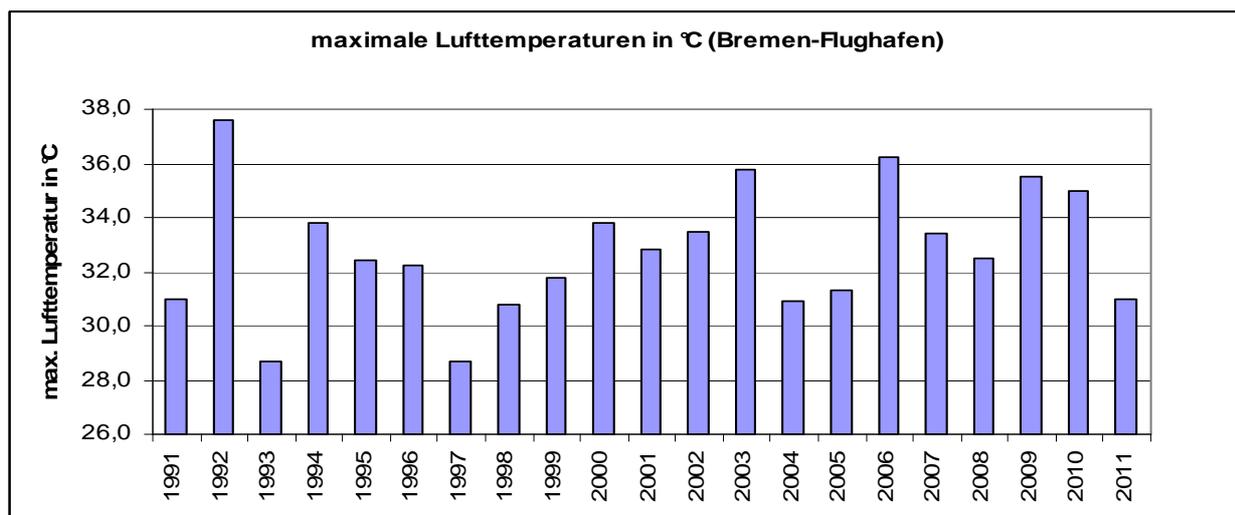


Abb. 2.2: Maximale Lufttemperaturen in °C an der Station Bremen-Flughafen.

Die jährliche Niederschlagssumme beträgt im Durchschnitt etwa 700 mm, wobei innerhalb des Stadtgebietes deutliche Inhomogenitäten zu beobachten sind. Unterschiede in den langjährigen Jahresmitteln können dabei durchaus 80 mm betragen. Der Hauptanteil der Niederschläge fällt im Sommer, wenn durch stärkere Einstrahlung Schauer und Gewitter auftreten. Im Mittel fällt an etwa 200 Tagen im Jahr Niederschlag. Im Winterhalbjahr fallen durchschnittlich in 750 Stunden Niederschläge, während im Sommerhalbjahr durchschnittlich nur 480 Stunden mit Niederschlag registriert wurde (DWD, 1983). Die größten Niederschlagssummen treten dagegen in der Regel in den Sommermonaten auf. Im Sommer überwiegen die kurzen aber intensiven Schauerniederschläge, während im Winterhalbjahr häufiger lang anhaltende, mit einem Frontdurchgang verbundene Niederschläge auftreten, die weniger intensiv sind. In den letzten 20 Jahren wurden an der Station Bremen-Flughafen 4 Starkregenereignisse registriert, an denen an einem Tag mehr als 75% der monatlichen Niederschlagssumme gemessen wurden.

Abbildung 2.3 zeigt die Windrichtungsverteilung an der Station Bremen Flughafen, die neben dem für die Klimazone allgemein charakteristischem Windmaximum aus südwestlichen Richtungen, ein zweites Maximum für Anströmungen aus Südost aufweist. Die Windgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 4,1 m/s. Sie liegt damit auf einem für viele deutsche Städte vergleichsweise hohen Niveau, das grundsätzlich gute Voraussetzungen für eine ausreichende Durchlüftung des Stadtgebietes während zyklonal geprägter Wetterlagen² vorgibt. Typische Westwindlagen sind in Bremen nicht mit bioklimatischen Belastungen verbunden, in der Regel ist während dieser Wetterlagen auch die lufthygienische Situation günstiger.

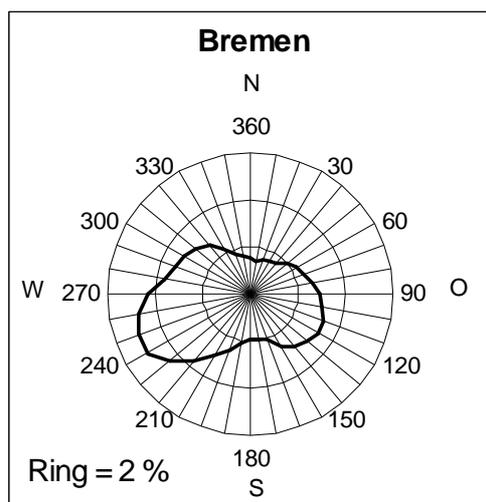


Abb. 2.3: Windrichtungsverteilung an der Station Bremen-Flughafen. (Ein Ring entspricht der Häufigkeit des Auftretens einer Windrichtung in 2 % der Zeit.)

In dem Ballungsraum Bremen entstehen durch anthropogene Einflüsse spezielle Stadtklimate, die sich unter anderem durch Wärmeinseleffekte auszeichnen, die im Sommer, wie bereits beschrieben, zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führen, die durchaus Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und der Gesundheit der Bewohner zur Folge haben können.

Solche Wettersituationen entstehen bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung geprägt. Diese Wetterlagen werden als autochthone (eigenbürtige) Wetterlagen bezeichnet (s. Glossar). Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen von warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge dessen treten sogenannte Flurwinde als Ausgleichsströmungen auf, die bodennah zu einem Zuströmen kühlerer Luft aus dem Umland führen. Solche Strömungen sind in der Regel radial auf einen überwärmten Bereich ausgerichtet und fließen bevorzugt über gering bebaute Flächen in die Stadt ein (Abb. 2.4). Die neutralen bis labilen Temperaturschichtungen, die tagsüber während sommerlicher Hochdrucklagen vorliegen, bewirken, dass den Flurwinden häufig eine geringe Höhenströmung überlagert ist. Das Aufsteigen von Warmluftblasen verursacht zusätzlich eine Böigkeit der bodennah nachströmenden Luft, so dass die Ausgleichsströmungen insgesamt weniger sensibel auf Strömungshindernisse reagieren.

² s. Glossar

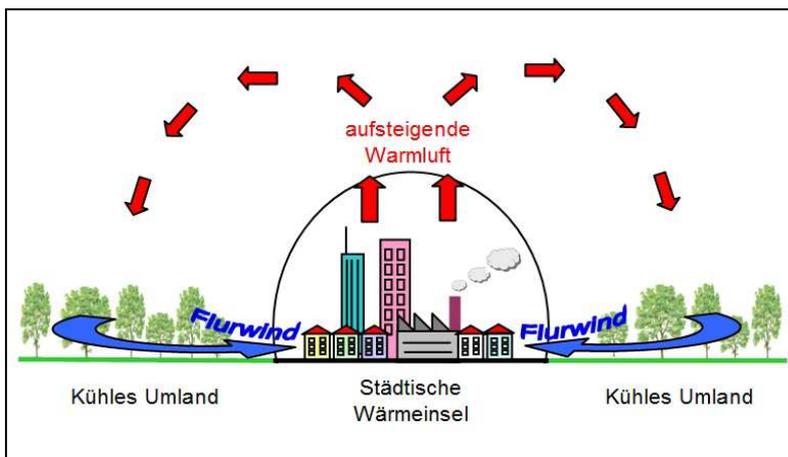


Abb. 2.4: Prinzipskizze Flurwinde, Tagsituation.

In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen dagegen durch eine stabile Temperaturschichtung der unteren Luftschichten gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld. Durch lokal unterschiedliche Abkühlungsraten entstehen Temperatur- und damit Dichteunterschiede, die zu Ausgleichsströmungen führen. Während der nächtlichen Abkühlung fließt dann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen Freiflächen in das wärmere Stadtgebiet ein. Da der Zustrom bodennah, mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, kann dieser Luftaustausch nur entlang von Flächen ohne blockierende Strömungshindernisse, auf sogenannten Leitbahnen erfolgen. Da die nächtlichen Ausgleichsströmungen auf Grund ihrer insgesamt geringeren Dynamik leicht durch Hindernisse und Rauigkeiten abgeschwächt werden können, werden für eine Analyse der wichtigen Leit- und Ventilationsbahnen die nächtlichen Ausgleichsströmungen analysiert.

Der Erhalt von Leitbahnen sowie der wichtigen Kaltluft produzierenden Flächen ist damit ein wesentlicher Bestandteil zur Schaffung eines günstigen Stadtklimas und somit eine wichtige Aufgabe der räumlichen Planung. Während der Sommermonate treten diese Wettersituationen in Bremen in etwa 27 % der Zeit auf.

Austauscharme Wetterlagen können weiterhin vor allem im Winter mit überdurchschnittlich hohen Schadstoffkonzentrationen verbunden sein, wenn es zur Ausbildung von Inversionen und einem Ansammeln von freigesetzten Schadstoffen, zum Beispiel aus Hausbrand oder Verkehr, in der bodennahen Luftschicht kommt. Für eine Minderung von Belastungssituation ist es auch hier wichtig, eine gute Durchlüftung des Stadtgebietes zu gewährleisten.

Im Rahmen der durch Modellsimulationen unterstützten Klimaanalyse sollen die bioklimatischen Belastungen einzelner Bereiche der Stadt bestimmt sowie für das Stadtklima wichtige Kaltluftproduktionsflächen und Kaltluftleitbahnen analysiert werden. Über diese, für die nächtliche Belastungssituation wichtigen Leitbahnen, erfolgt auch tagsüber eine Einströmen kühlere Umgebungsluft in überwärmte Stadtbereiche. Gleichzeitig können größere innerstädtische Grün- oder Parkflächen (> 1 ha) mit eigener Kaltluftproduktion zu einer bioklimatischen Entlastung der angrenzenden Siedlungsflächen beitragen. Kleinere Grünflächen ohne nennenswerte Kaltluftproduktion sind als beschattete Bereiche vor allem tagsüber für die Aufenthaltsqualität im Freien während sommerlicher Hitzeperioden relevant.

3 Methodik und Datengrundlagen der Stadtklimaanalyse

3.1. Einleitung

Das Schutzgut Klima/Luft ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und Bestandteil der Abwägung bei der Bauleitplanung und Umweltprüfung. Aber auch vor dem Hintergrund eines Klimawandels stehen insbesondere die Auswirkungen auf Wohlbefinden und Gesundheit der Menschen im Vordergrund, welche unter dem Begriff Bioklima zusammengefasst werden. Von einer Zunahme der sommerlichen Wärmebelastung sind besonders empfindliche Bevölkerungsgruppen wie kranke und alte Menschen, Schwangere sowie Menschen, die durch schwere körperliche Arbeit besondere physische Belastungen erfahren, betroffen.

Die höchsten bioklimatischen Belastungen treten dort auf, wo und sich der Effekt der „Städtischen Wärmeinsel“ deutlich 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, eine besondere Bedeutung zu.

Grundlage für die Beurteilung der stadtklimatischen Situation ist die modellgestützte Analyse des klimatischen Ist-Zustandes. Im Vordergrund stehen dabei sommerliche austauscharme Hochdruckwetterlagen. Diese Wetterlagen stellen in unseren Breiten die ungünstigsten Situationen für eine bioklimatische Belastung da und gehen häufig auch mit lufthygienischen Belastungen in den Siedlungsräumen einher. Im Winterhalbjahr führen austauscharme Hochdruckwetterlagen vor allem zu lufthygienischen Belastungssituationen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird eine hochsommerliche Strahlungswetternacht analysiert.

Die modellgestützte Analyse bietet gegenüber Temperaturmessfahrten oder einer Thermalscannerbefliegung den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Des Weiteren ermöglichen numerische Simulationen auch eine Prognose zukünftiger Entwicklungen.

Analyse der stadtklimatischen Zusammenhänge

Das Ergebnis ist eine aktuelle, komplexe und hochauflösende Karte der klima- und immissionsökologischen³Funktionen (**Klimafunktionskarte**). Als Grundlage für die Bewertung dienen die berechneten meteorologischen Parameter der Modellsimulationen. Im Hinblick auf die verkehrsbedingten Luftbelastung wird ein flächendeckendes Immissionsfeld für eine windschwache Wettersituation modelliert. Das Immissionsfeld für den vornehmlich durch Verkehr freigesetzten Schadstoff Stickstoffdioxid (NO₂) findet als Leitparameter zur Analyse von lufthygienischen Belastungsbereichen 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. Darüber hinaus können in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form einer **Planungshinweiskarte** dargestellt werden. 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 sollten. Weiterhin werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung und/oder lufthygienischer Belastung identifiziert.

Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt fundierte Aussagen für den Maßstabsbereich 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.

³ s. Glossar

3.2 Eingangsdaten

Bei numerischen Simulationen müssen zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten zur Verfügung stehen (Abb. 3.1). Diese müssen zum einen die Landschaft charakterisieren für welche die lokalklimatische Studie durchgeführt werden soll und zum anderen auch die größerskalierten meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren.

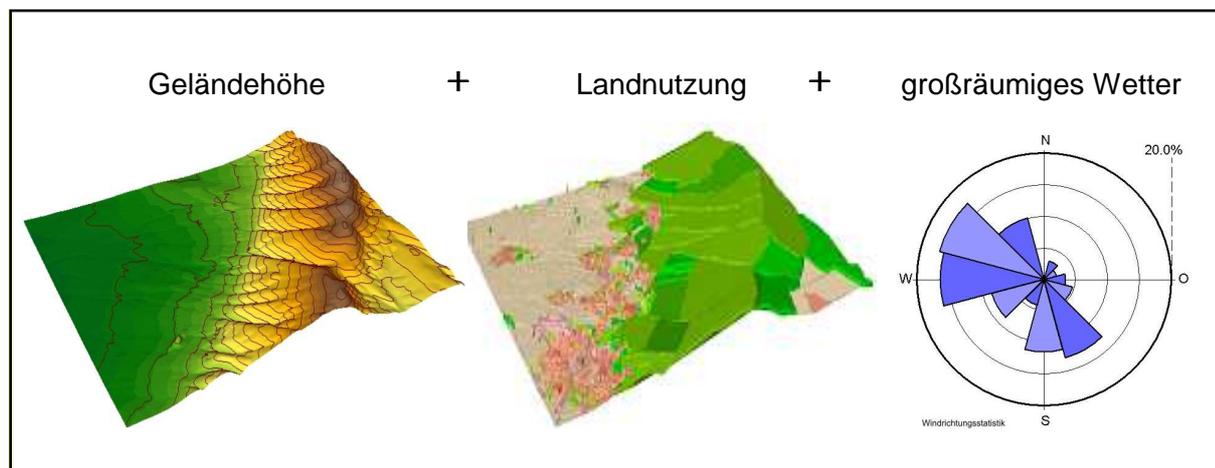


Abb. 3.1: Eingangsdaten für die Modellrechnung

Alle Eingangsdaten müssen jeweils als repräsentativer Wert für eine Rasterzelle bereitgestellt bzw. definiert werden:

- 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,...
- Wetter-/Klimadaten (z.B. großräumige Anströmungsrichtung und –Geschwindigkeit, Luftmassencharakteristiken wie Temperatur und Feuchte).

Landnutzung und Geländehöhe

Für die Aufbereitung der *Landnutzung* wurden verschiedene Ausgangsdaten wie ATKIS (Basis DLM, Bereitstellung durch GeoInformation Bremen 2012) und eine Biotoptypenkartierung mit Stand von 2011 (SUBV) zurückgegriffen. Die Flächeninformationen wurden anhand von Luftbildern aus den Jahren 2009 und 2011 überprüft (Bereitstellung durch GeoInformation Bremen, 2012). Die Analyse der Nutzungskategorien im Untersuchungsgebiet und deren Aggregation für die Modellrechnung zu 14 Nutzungsklassen ermöglicht die Abgrenzung von Gebieten ähnlicher struktureller Ausstattung und somit ähnlicher Oberflächeneigenschaften. Zahlreiche der vielen klimatologisch relevanten Parameter lassen sich über die Charakteristik von Flächeneinheiten hinsichtlich des Grades ihrer Oberflächenversiegelung und ihrer strukturellen Höhe herleiten. Für die Einordnung dieser Einflussgrößen werden nach Nutzungsklassen spezifizierte Literaturdaten (u.a. MOSIMANN et al. 1999) verwendet, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen aus meh-

renen Städten beruhen. Um sowohl den speziellen Anforderungen der Modellanalyse, als auch der Herleitung der klimaökologischen Haupteinheiten gerecht werden zu können, wird bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein vereinfachter, 14-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet. Auf diese Weise kann über die Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut werden. Tabelle 3.1 zeigt die typischen Strukturhöhen und Versiegelungsgrade der jeweiligen Nutzungskategorien. Für die hier vorliegende Untersuchung wurden die Informationen zur Strukturhöhe der Bebauung und der mittleren Gebäudedichte den Daten aus der Laserscannerbefliegung aus dem Jahr 2011 entnommen. Die Daten wurden 2012 durch GeoInformation Bremen bereitgestellt.

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

Tab. 3.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung mit Kennwerten zur Strukturhöhe und zum Versiegelungsgrad der einzelnen Nutzungsklassen

Informationen zu den Geländehöhen wurden in Form eines digitalen Geländemodells (DGM5) durch Geoinformation Bremen 2012 bereit gestellt. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Datenquellen wird somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut. Für die Modellrechnung zum Kaltlufthaushalt, auf dessen Grundlage die Klimafunktions- und Planungshinweiskarte beruht, wird eine einheitliche Rasterauflösung von 50 m x 50 m verwendet.

Großräumige Wetterlage

Die hier durchgeführte Modellanalyse orientiert sich in ihrer meteorologischen Ausgangssituation an einer Temperaturmessfahrt, die im August 2012 in den frühen Morgenstunden vom Deutschen Wetterdienst im Stadtgebiet von Bremen durchgeführt wurde. Während des messzeitraumes lag Norddeutschland unter dem Einfluss sehr warmer Luftmassen. Am Tag vor der nächtlichen Messfahrt wurde ein Maximum der Lufttemperatur von 30 °C erreicht. Um die Ergebnisse der Modellsimulation mit den Registrierungen der Temperaturprofilmessung vergleichen zu können wurden in der Simulation ebenfalls hohe Luft- und damit korrespondierende Oberflächentemperaturen als Anfangsbedingungen vorgegeben. Mit dem Modell wurden dann die nächtliche Ausstrahlung und die damit verbundene Abkühlung simuliert. Die Ergebnisauswertungen erfolgten für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens.

3.3 Methodik der Modellrechnung

3.3.1 Das mesoskalige Klimamodell 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 Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet. Beispiele für solche Phänomene in der Mesoskala sind der Einfluss orographischer Hindernisse auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde und das Phänomen der urbanen Wärmeinsel oder, als mikroskaliges Phänomen, Düseneffekte in Straßen.

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 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 extrem schwierig macht, mit Hilfe 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 (1988) wurden gerade in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

Grundlagen mesoskaliger Modelle

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 bieten den Vorteil, dass sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen können, weitere meteorologische Größen berechnen, die nicht gemessen wurden und Wind- und Temperaturfelder in ihrer 3-dimensionalen Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus die Möglichkeit, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert werden können und auf diese Art und Weise 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 Bewegungsgleichungen), 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. 3.2).

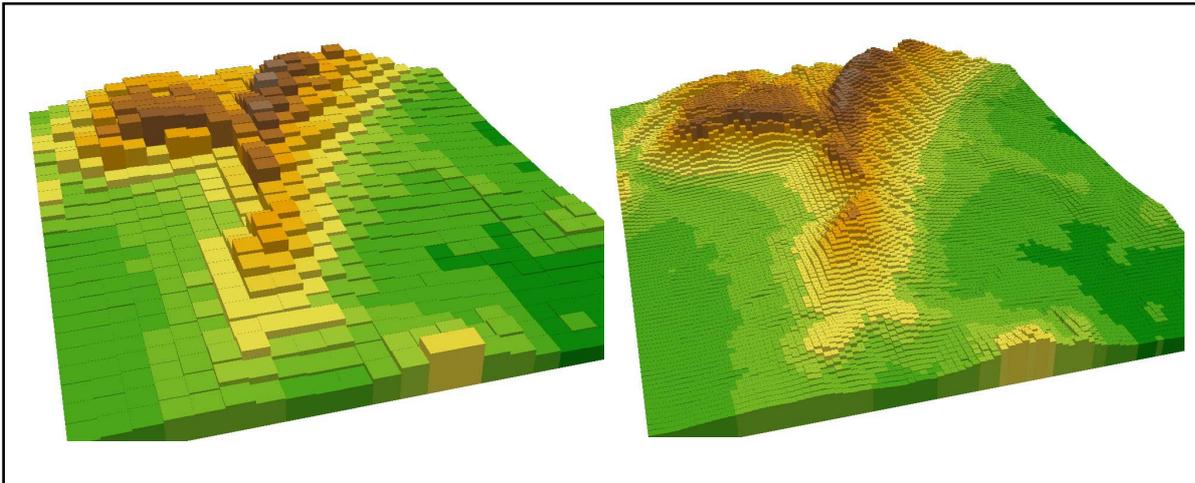


Abb. 3.2: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 125 m x 125 m) bei einem digitalen Geländehöhenmodell

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. Die für die Modellierung mit FITNAH hier verwendete horizontale Maschenweite Δx beträgt 50 m. Bei allen Modellrechnungen ist die vertikale Gitterweite nicht äquidistant und in Bodennähe sind die Rechenflächen besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht 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 vertikale 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 mittlere 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 den Maßstabsbereich von 1:20 000 bis 1:100 000 ab. Dies korrespondiert mit der Planungsebene Flächennutzungsplan bzw. Regionalplan. Sind diese Strukturen von ihrer räumlichen Ausprägung her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden). Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben die berechnet werden sollen, so müssen diese in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung).

Die beiden wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametri-

siert 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. 3.3). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

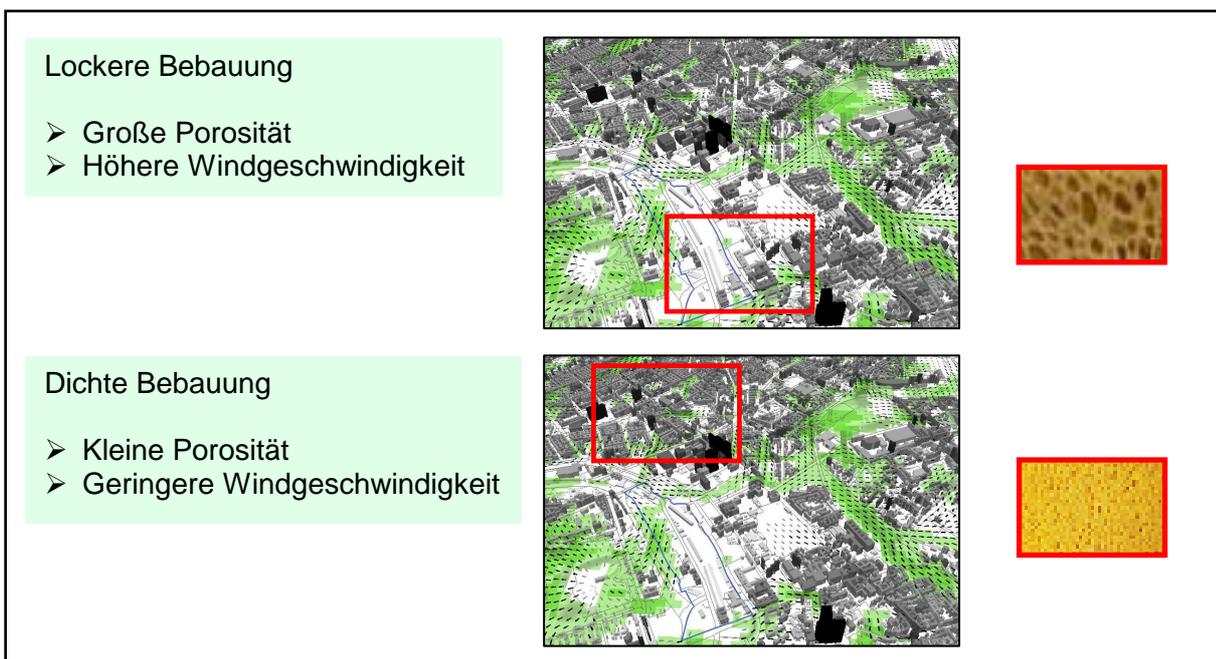


Abb. 3.3: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

Eine Strömung ist nur noch in den offenen Poren möglich, was zu einer deutlichen Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit führt. Die Temperatur wird durch die gebäudespezifischen Parameter wie Gebäudehöhe, Überbauungsgrad oder anthropogen Abwärme bestimmt und modifiziert damit das Temperaturfeld der bodennahen Atmosphäre bis in die mittlere Höhe der Bebauung (Grundlagen und Beschreibung: Groß, 1989).

Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind so klein, dass sie in der Mesoskala 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. 3.4). 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).

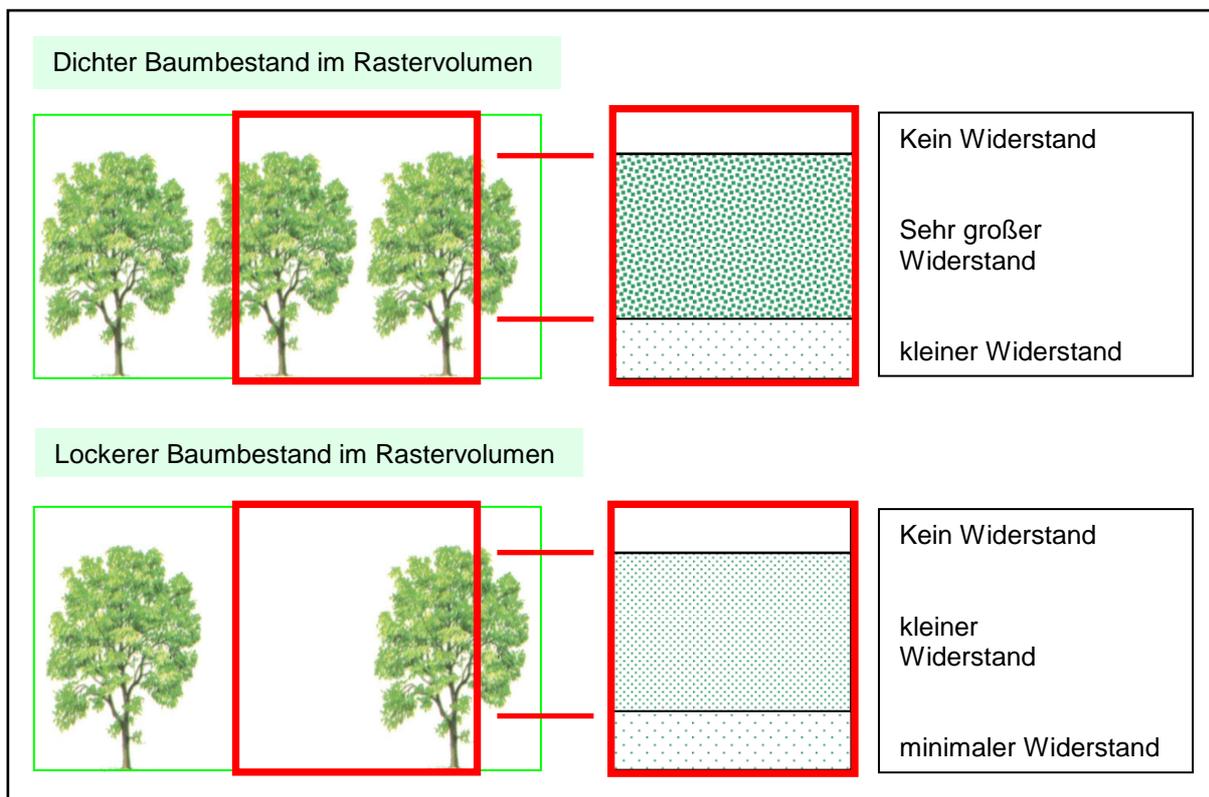


Abb. 3.4: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

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

In Abb. 3.5 sind der simulierte tageszeitliche Verlauf (Tagesgang) der Lufttemperatur in Bodennähe sowie Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald schematisch dargestellt.

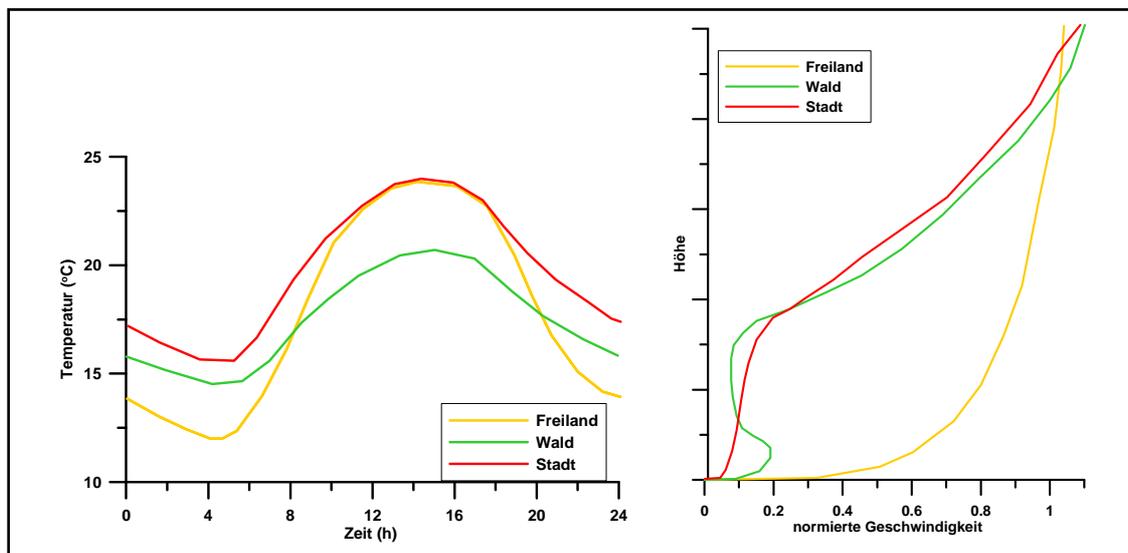


Abb. 3.5: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Der Tagesgang der Lufttemperatur zeigt, 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 der beispielsweise mit Gras oder Getreide bestandenen Freifläche führt der Mangel an Verschattung zu einem hohen Temperaturniveau, während hier nachts die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Bei der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich. Das für eine Fläche ohne größere Strömungshindernisse typische vertikale Windprofil kann sich erst oberhalb der mittleren Höhe der Nutzungsstruktur ausbilden.

3.3.2 Meteorologische Rahmenbedingungen für die Modellberechnung Kaltlufthaushalt

Während autochthoner Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Landschaft besonders gut ausprägen. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden Höhenwind gekennzeichnet. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen werden die großräumigen meteorologischen Rahmenbedingungen wie folgt festgelegt:

- Bedeckungsgrad 0/8 (wolkenlos)
- kein überlagernder Höhenwind
- relative Feuchte der Luftmasse 50%

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen vor allem nachts einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Treten diese Wetterlagen im Sommerhalbjahr auf, können sich bei gleichzeitiger hoher Ein- und Ausstrahlung somit lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Charakteristisch für sommerliche Hochdruckwetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen während der Nachtstunden, die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

3.4 Methodik der Bewertung der klimaökologischen Nutzungsstrukturen

Um Aussagen über die Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen untereinander abgrenzbar sein. Die Kaltluftlieferung von Grünflächen kann durchaus sehr unterschiedlich ausgeprägt sein und innerhalb von Siedlungsflächen kann die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren. Um diese Heterogenität in der **Klimafunktions-** bzw. **Planungshinweiskarte** darstellen zu können, werden den Flächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Windgeschwindigkeit oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Die den Flächen zugewiesenen Klimaparameter werden als Flächenmittelwerte aus den Ergebnissen der Klimamodellierung gebildet, die in einem 50 m Raster vorliegen.

Die qualitative Bewertung der einzelnen Klimaparameter erfolgt dann in Relation zum mittleren Wertenniveau der Klimaparameter im Untersuchungsgebiet. Dieses Vorgehen erfolgt in Anlehnung an die VDI Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008b), in der vorgeschlagen wird, für eine Bewertung der Klimaparameter die Abweichungen der Einzelwerte von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsgebiet als Bewertungsmaßstab heranzuziehen. Daraus ergibt sich ein standardisiertes Verfahren mit dem Klimaanalysen verschiedener Städte untereinander vergleichbar werden:

Hierfür werden dimensionslose Abweichungen eines Wertes vom Gebietsmittel mit Hilfe der sogenannten „z-Transformation“ berechnet. Die Abweichung eines Einzelwertes vom Gebietsmittel dieses Wertes wird dabei mit der Standardabweichung des Datenkollektivs normiert:

$$z = (Z - \mu) / \text{Sigma} \quad , \text{ mit}$$

- z: standardisierter Wert der Variablen Z (z.B. Kaltluftvolumenstrom)
- Z: Ausgangswert der Variablen (z.B.: Kaltluftvolumenstrom)
- μ : arithmetisches Mittel der Variablen
- Sigma: Standardabweichung

Eine Klassifizierung in Kategorien wie „Hoch“ und „Niedrig“ oder „Günstig“ und „Ungünstig“ erfolgt dann in standardisierter Form anhand der positiven oder negativen Abweichung der Variablen vom Gebietsmittel. Als Klassengrenze für eine weitere Unterteilung in beispielsweise „sehr hoch“–„hoch“ oder „günstig“–„sehr günstig“ wird eine Abweichung vom Gebietsmittel herangezogen, die über die Standardabweichung hinausgeht. Die Klassengrenzen der weiteren Unterteilung liegen damit bei z-transformierten Werten von 1 bzw. -1. Die folgende Abbildung verdeutlicht schematisch das Vorgehen bei der Bewertung der so normierten Daten.

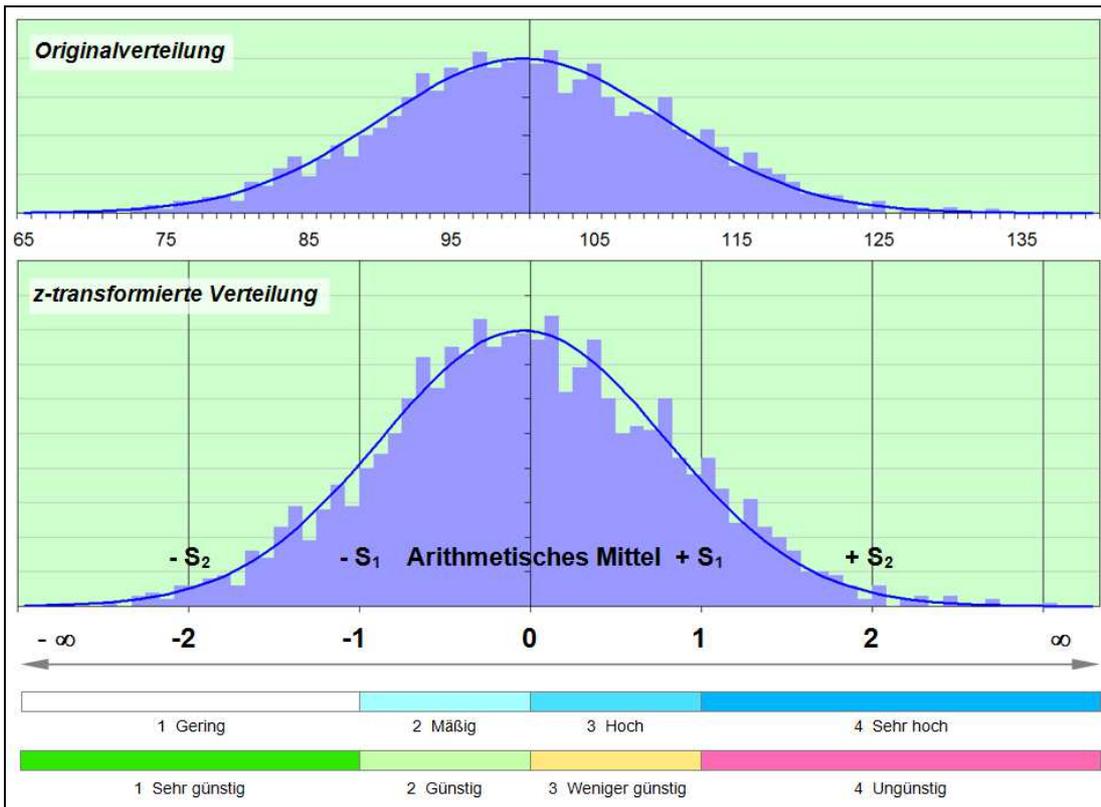


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Bewertungsschemas für z-transformierte Parameter. Ein Wert von 1 entspricht der Standardabweichung (S_1) vom Gebietsmittel.

Die Abweichungen vom Gebietsmittel werden für die Bewertung der Parameter Kaltluftvolumenstrom, Kaltluftproduktionsrate sowie bioklimatische Belastung betrachtet, die die wesentliche Grundlage für die Beurteilung der lokalklimatischen Situation liefern.

3.4.1 Grün- und Freiflächen

In der Klimafunktionskarte werden Grün- und Freiflächen unabhängig von ihrer räumlichen Lage lediglich hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Bewertungskriterium für ihre lokalklimatische Bedeutung wird der Volumenstrom als Maß für den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen herangezogen. Die folgende Tabelle zeigt das durchschnittliche Wertenniveau in den 4 Bewertungsklassen.

Bewertung	normierter Wert	Kaltluftvolumenstrom Ø in m ³ /s
sehr gering	< -1	80
gering	-1 bis 0	230
mittel	>0 bis 1	400
hoch	> 1	650

Tab. 3.2: Bewertung der Kaltluftlieferung in der Klimafunktionskarte.

Während in der Klimafunktionskarte die Kaltluftlieferung von Grün- und Freiflächen charakterisiert wird, steht in der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung einer möglichen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Vordergrund. Daraus ergibt sich eine abweichende Vorgehensweise bei der Bewertung dieser Areale. Neben dem Kaltluftvolumenstrom wird ebenso die Lage der Grünflächen zu bioklimatisch belastetem Siedlungsraum und ihre Kaltluftproduktionsrate betrachtet. Die planerische Bewertung der Grünflächen ergibt sich somit als Resultat aus der bioklimatischen Analyse des Siedlungsraumes und der Grünflächeneigenschaften. Das in der Planungshinweiskarte angewendete Bewertungsschema baut damit auf den in der Klimafunktionskarte dargestellten Analyseergebnissen auf und wird deshalb erst an späterer Stelle detailliert beschrieben (s. Kap. 3.4.4).

3.4.2 Bioklima in den Siedlungsflächen

Zur Beurteilung des Bioklimas in den Siedlungsräumen wird der Einfluss der verschiedenen meteorologischen Parameter auf das Wohlbefinden des Menschen betrachtet. Eine große Rolle spielen hierbei Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit, da diese Parameter den Wärmehaushalt des Menschen direkt beeinflussen. Zur Beurteilung des thermischen Wirkungskomplexes wird in dieser Untersuchung der *Bewertungsindex PMV⁴* (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die Wärmebelastung verwendet, der auf einer Auswertung dieser Parameter basiert. Der sogenannte „PMV-Wert“ basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und gibt den Grad der „Behaglichkeit“ als mittlere subjektive Einschätzung einer größeren Anzahl von Menschen in Wertestufen wider. Mit steigendem PMV erhöht sich die bioklimatische Belastung aufgrund der als Diskomfort empfundenen thermischen Beanspruchung des Körpers.

⁴ Predicted Mean Vote (FANGER 1972), für eine ausführliche Beschreibung siehe VDI 3785 Blatt 1 (VDI 2008)

Für die Berechnung des PMV-Wertes müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck und Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein. Diese meteorologischen Parameter variieren innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charakterisierung der Wettersituation, kann die Ausprägung des nächtlichen PMV mit Hilfe des Modells FITNAH abgeschätzt und entsprechend der speziellen Anliegen der Untersuchung angepasst werden.

Der nächtlichen Wärmebelastung, wie sie in der Klimafunktions- bzw. Planungshinweiskarte dargestellt wird, liegt das Wertenniveau in der zweiten Nachthälfte um 4 Uhr zugrunde. Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Es handelt sich um den PMV-Wert für eine typische Sommernacht mit geringem Luftaustausch und einer durch wolkenlosen Himmel gegebenen ungehinderten langwelligen Ausstrahlung. Dabei wirken lokal auftretende Kaltluftströmungen modifizierend auf die räumliche Ausprägung des PMV. Es handelt sich somit um eine Einzelsituation

Die Klassifizierung der bioklimatischen Situation erfolgt in vier qualitativen Bewertungskategorien. Die Basis hierfür bilden, wie bereits beschrieben, die lokalen z-transformierten PMV Werte und deren Abweichungen von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum (s. auch Abb. 3.6). Bei der Bewertungsklasse 4 "ungünstig" liegt eine überdurchschnittliche Wärmebelastung mit einem Z-Wert von mehr als 1 vor. Eine gewisse bioklimatische Belastung ist auch noch bei der Bewertungsklasse 3 „Weniger günstig“ gegeben. Günstige Verhältnisse liegen hingegen bei den Klassen 2 und 1 vor und können aus bioklimatischer Sicht als positiv beurteilt werden. Die Bioklimatische Situation ist häufig mit charakteristischen Bebauungstypen verknüpft. In der folgenden Tabelle 3.3 sind den jeweiligen Klassen charakteristische Bebauungstypen zugeordnet.

Bioklimatische Situation qualitative Einstufung	PMV Wert z-transformiert	charakteristische Bebauungstypen
1: sehr günstig	>1	Dörflich geprägte Siedlungstypen
2: günstig	>0 bis 1	Einzel- und Reihenhausbebauung
3: weniger günstig	-1 bis 0	Block- und Blockrandbebauung
4: ungünstig	< -1	Verdichteter Siedlungsraum

Tab. 3.3: Klassifizierung der bioklimatischen Situation und dafür typische Siedlungsstrukturen.

Es kann festgehalten werden, dass die bioklimatische Situation zwar im Wesentlichen mit Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad verknüpft ist, kleinräumig aber doch durch den Einfluss von Grünflächen und lokalem Einwirken von Kaltluft deutlich variieren kann.

3.4.3 Kaltluftleitbahnen

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete („Ausgleichsräume“) und Belastungsbereiche („Wirkungsräume“) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Als geeignete Oberflächenstrukturen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen innerhalb von Siedlungsräumen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, breite Straßenräume und Flussläufe. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgt manuell und orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der Modellsimulation. Die Leitbahnen werden sowohl in der Klimafunktionskarte als auch der Planungshinweiskarte dargestellt. Durch Luftschadstoffe vorbelastete Leitbahnen werden mit einer gesonderten Signatur gekennzeichnet.

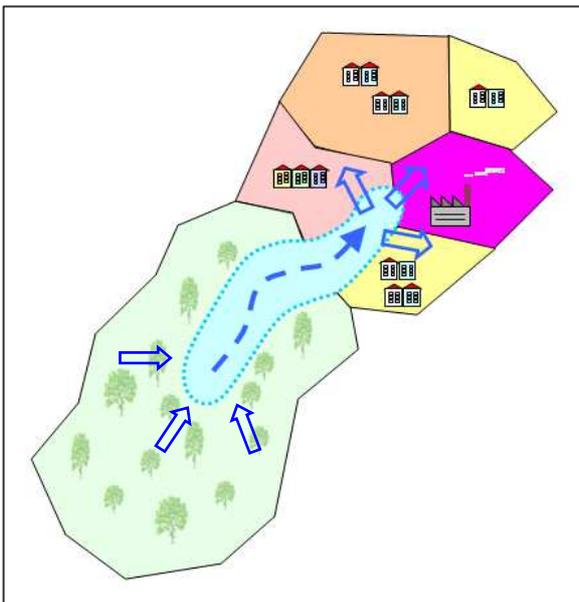


Abb. 3.7: Prinzipskizze einer Kaltluftleitbahn.

Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Aufgrund der höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese Beschleunigung weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Ausgleichsströmungen, die sich allein aufgrund des Temperatur- und Dichteunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus stadtklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Aufgrund der Reliefsituation im Stadtgebiet Bremen spielen Kaltluftabflüsse nur in den nördlich der Lesum gelegenen Ortsteilen eine Rolle.

3.4.4 Planerische Bewertung von Grünflächen und Siedlungsräumen

Grün- und Freiflächen

Die planungsrelevante Bewertung der Grün- und Freiflächen basiert auf einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Diese Flächen werden im Weiteren verkürzt als Grünflächen bezeichnet, unabhängig von ihrer jeweiligen genauen Nutzung. Sie zeichnen sich typischerweise durch einen geringen Versiegelungsgrad (etwa <25 %) aus. Neben Park- und Gartenanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen und Wälder.

Kaltluft, die während einer windschwachen Strahlungsnacht innerhalb der Grünflächen und Freiräume entsteht, kann nur dann von stadtklimatischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Da eine Einzeluntersuchung der jeweiligen Wirkungsbezüge zwischen einzelnen Freiflächen und Siedlungsräumen im vorliegenden Maßstabbereich nicht möglich ist, wird zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen ein teilautomatisiertes Verfahren angewendet, das auf einer Auswertungen der wesentlichen Ergebnisse der Klimanalyse basiert. Das Vorgehen für die Beurteilung der stadtklimatischen Bedeutung der Grünflächen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung:

1. Ermittlung von *Leitbahnen*
Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgt manuell und orientiert sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der Modellsimulation.
2. Grünflächen im direkten Umfeld von *bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen*
Diesen Grünflächen kommt grundsätzlich eine sehr hohe Bedeutung zu. Sie sind geeignet, unabhängig von ihrem Kaltluftlieferungs- oder -produktionsvermögen ausgleichend auf das meist dicht bebaute Umfeld zu wirken. Tagsüber können solche Grünflächen bioklimatische Erholungsräume darstellen.

Hohe bioklimatische Bedeutung

3. Grünflächen, die an „*bioklimatisch weniger günstige*“ *Siedlungsräume* angrenzen
Wie unter Punkt 2 erfolgt die Einstufung auch dieser Flächen unabhängig von der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter.

Bereiche mit relevanter Topographie (Bremen-Nord):

4. Grünflächen mit räumlich begrenzten relevanten Kaltluftabflüssen:
Abfließen von Kaltluft mit sehr hohen Volumenströmen in Richtung weniger günstiger Siedlungen.

periphere Bereiche der Stadt ohne relevante Topographie (Bremen südlich der Lesum):

5. Grünflächen mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom (>1)
Diese Flächen dienen der Sicherung des Zustroms von Kaltluft.
6. Grünflächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion (>1) **und** hohem Kaltluftvolumenstrom ($>0,5$)
Diese Flächen dienen der Anbindung von wichtigen Kaltluftentstehungsgebieten.

Mittlere bioklimatische Bedeutung

7. Stadtnahe Waldflächen
Soweit diese Waldflächen unter den Punkten 1-6 noch nicht erfasst wurden, wird ihnen pauschal, unabhängig von der Ausprägung der Klimaparameter, eine *mittlere bioklimatische Bedeutung* zugesprochen. Wald kommt generell eine bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum, vor allem an heißen Sommertagen, zu.

Bereiche mit relevanter Topographie (Bremen-Nord):

8. Grünflächen, über die großflächig bioklimatisch relevante Hangabwinde in Richtung Wirkungsraum transportiert werden

periphere Bereiche der Stadt ohne relevante Topographie (Bremen südlich der Lesum):

9. Stadtnahe Grünflächen (Distanz bis ca. 700 m zur Bebauung) mit flächenhaftem Einströmen von Kaltluft.
Flächen die unter den Punkten 1 – 8 noch nicht erfasst wurden aber einen hohen Kaltluftvolumenstrom (>0) aufweisen.
10. Stadtnahe Grünflächen (Distanz bis ca. 700 m zur Bebauung) mit hoher Kaltluftproduktion.
Flächen die unter den Punkten 1 – 8 noch nicht erfasst wurden aber eine hohe Kaltluftproduktion (>0) aufweisen.

Grünflächen, die keinem der oben genannten Kriterien entsprechen, wird eine **geringe bioklimatische Bedeutung** zugeordnet.

Die nach diesem Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Grünflächen basiert damit zum einem auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsräumen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d.h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermaßen aussagekräftig sind. So kann eine Grünfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Freiräume im direkten Umfeld von Siedlungsbereichen mit ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen generell eine hohe bioklimatische Bedeutung zugesprochen. In der Literatur wird die Flächenmindestgröße zur Ausbildung von Strukturwinden mit etwa einem Hektar beziffert (SCHERER 2007).

Eine in ihrer bioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Grünfläche verfügt somit über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch stark belasteten Wirkungsraum oder wirkt als Kaltluftleitbahn bzw. Luftaustauschbereich. Eine als „Hoch“ eingestufte Grünfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch belasteten Wirkungsraum oder weist ein überdurchschnittliches Kaltluftliefervermögen auf und ist gleichzeitig als Ausgleichsraum oder Kaltluftquellgebiet einzustufen. Diese Grünflächen sollten in ihrer

derzeitigen Form erhalten bleiben oder durch Minimierung bereits vorhandener Versiegelung in Ihrer Funktion optimiert werden.

Siedlungsräume mit stadtklimatischer Bedeutung

Neben Grünflächen können auch gering bebaute und/oder stark durchgrünte Siedlungsräume eine bioklimatische Bedeutung für angrenzende bioklimatisch ungünstige Siedlungen haben. Siedlungsbereiche denen eine stadtklimatische Bedeutung zugewiesen werden kann weisen selbst meist eine günstige oder sehr günstige bioklimatische Situation auf und sind weiterhin durch vergleichsweise hohe Kaltluftvolumenströme gekennzeichnet.

Bei einer Bewertung spielt auch hier vor allem die Lage in direkter Nachbarschaft zu ungünstigen Siedlungsräumen und/oder ein Angrenzen an Leitbahnen oder an Grünflächen mit sehr hohen Volumenströmen eine Rolle. Auch ohne relevante Kaltluftvolumenströme kommt durchgrünten Siedlungsbereichen eine Ausgleichswirkung zu, wenn sie direkt an bioklimatisch ungünstige Bereiche angrenzen. Nicht weiter verdichtet werden sollten ebenfalls Siedlungsbereiche, die Kaltluft liefernde Grünflächen mit ungünstigem Siedlungsraum verbinden, so dass auch diesen Bereichen eine stadtklimarelevante Funktion zugewiesen wird.

In der Planungshinweiskarte werden die so ermittelten Siedlungsräume durch eine horizontale schwarze Schraffur gekennzeichnet. Weiterhin gibt es Siedlungsbereich in denen sogar sehr hohe Kaltluftvolumenströme (>1) ermittelt wurden. Diese sehr kleinräumigen Siedlungsbereiche verbinden auf engem Raum ungünstige Siedlungsbereiche mit Grünflächen mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom und fungieren damit ähnlich einer Leitbahn innerhalb des Siedlungsbereiches. Diese Bereiche werden in der Planungshinweiskarte zusätzlich ausgewiesen.

3.5 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung

Die im Rahmen der vorliegenden Klimaanalyse durchgeführte lufthygienische Untersuchung für eine austauscharme Wetterlage wurde ebenfalls mit dem Modell FITNAH durchgeführt. Sie soll dazu dienen, Kaltluftleitbahnbereiche mit überdurchschnittlicher lufthygienischer Belastung auszuweisen. Als Indikator für die Belastung der Luft diene dabei die Ausbreitung eines fiktiven Schadstoffs im dreidimensionalen Strömungsfeld der Kaltluftmodellierung. Die Ausgangswerte hierfür lieferten die Berechnungen der Emissionsmengen von Stickstoffoxiden (NO_x) im Hauptstraßennetz (Bezugsjahr 2010). Die Verkehrszahlen für das Prognosejahr 2010 wurden durch die Freie Hansestadt Bremen (Senator für Umwelt, Bau und Verkehr, Abteilung Verkehr) bereitgestellt. Die auf Grundlage des Handbuchs Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes HBEFA3.1 (UBA, 2010) berechneten Emissionen wurden in das Geodatenbankumfeld eingebracht, entsprechend der Eingangsdaten für die Windfeldsimulation in ein Raster mit einer Zellengröße von 50 m überführt und anschließend mit dem FITNAH-Strömungsfeld verdriftet.

4. Ergebnisse der Modellrechnung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den meteorologischen Parametern Lufttemperatur in 2 m Höhe, Kaltluftproduktion, nächtliches Strömungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine windschwache hochsommerliche Hochdrucklage zugrunde gelegt, da sich stadtklimatische Effekte vor allem während solcher windschwacher Strahlungswetterlagen⁵ im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Diese Wetterlagen stellen in unseren Breiten die kritischsten Situationen für eine bioklimatische Belastung dar.

4.1 Das bodennahe Lufttemperaturfeld

Ausschlaggebend für die räumliche Temperaturverteilung während Strahlungswetterlagen sind vor allem die landnutzungsabhängigen thermischen Boden- und Oberflächeneigenschaften.

Für unversiegelte Flächen spielt dabei die Wärmeleitfähigkeit des Bodens eine große Rolle, die deutlich mit dem Bodentyp und der Bodenfeuchte variieren kann. Je größer beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist, umso tiefer kann Wärme in das entsprechende Material eindringen, dort gespeichert werden und ebenso von diesem wieder abgegeben werden. Ein vorhandener Bewuchs modifiziert die Erwärmungs- und Abkühlungsraten. Stark ausgeprägt zeigt sich dieser Effekt in Waldgebieten, in denen die Lufttemperatur innerhalb des Stammraumes einen gedämpften Tagesgang zeigt. Strahlungsumsätze erfolgen hier zum einen zwischen Atmosphäre und Kronendach aber ebenso innerhalb des Stammraumes zwischen Kronendach und Boden. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei vergleichsweise hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, schirmt das Kronendach nachts die Ausstrahlung ab, so dass hier, im Vergleich zum Freiland, eher milde Temperaturen auftreten. Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, wobei gerade stadtnahe Wälder auch am Tage Kaltluft zugunsten des direkt angrenzenden Siedlungsraumes erzeugen können.

Die bebauten Stadtgebiete zeigen ein sehr komplexes thermisches Verhalten. Gebäude liefern große Flächen, die sich unter der Sonneneinstrahlung tagsüber erwärmen. Abhängig von Bausubstanz und Gebäudedichte können unterschiedliche Wärmemengen gespeichert und nachts wieder abgegeben werden. Durch die hohe Versiegelung des Bodens sind kühlende Verdunstungsprozesse gegenüber Freiflächen deutlich reduziert. Zusätzlich wird Wärme aus anthropogenen Quellen freigesetzt. Da die Durchlüftung einer Stadt aufgrund der Bebauungsdichte zum Teil deutlich eingeschränkt ist, ist auch die turbulente Wärmeleitung reduziert. Als Folge dieser Prozesse treten innerhalb der Bebauung und vor allem im Vergleich zum Freiland

⁵ s. Glossar

deutliche Temperaturunterschiede auf. Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist abhängig von der Größe der Stadt und der Dichte der Bebauung.

Eine weitere Sonderstellung nehmen Gewässer ein. Die hohe Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Wasser sowie die in Gewässern stattfindenden Durchmischungsvorgänge sorgen dafür, dass die Amplitude der oberflächennahen Wassertemperatur deutlich geringer ist als die der bodennahen Lufttemperatur. Gerade im Hoch- und Spätsommer ist die Oberflächentemperatur des Wassers tagsüber niedriger, aber nachts höher als die bodennahe Lufttemperatur der Umgebung. Größere Gewässer haben damit im Sommer eine dämpfende Funktion auf den Tagesgang der Lufttemperatur ihre Umgebung, da sie tagsüber kühlend wirken, während der Nachtstunden aber die Abkühlung verringern.

Während windschwacher Strahlungswetterlagen ist der Tagesgang der Lufttemperatur direkt an die Strahlungsbilanz des Standortes gekoppelt und zeigt eine ausgeprägte Absenkung der bodennahen Lufttemperatur während der Abend- und Nachtstunden. Die bodennahen Temperaturen erreichen etwa zum Sonnenaufgang ein Minimum. Zu diesem Zeitpunkt zeichnen sich deutliche Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlichen Nutzungsstrukturen ab. Die hier beschriebenen Auswertungen beziehen sich daher auf dieses Zeitfenster.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es bereits, 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.

Ergebnisse der Berechnungen:

Abbildung 4.1 zeigt das für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens berechnete Temperaturfeld im Stadtgebiet von Bremen. Die bodennahen Temperaturen weisen eine Spannweite von 16,5°C bis nahezu 23°C auf. Es wurde somit eine sehr warme hochsommerliche Nachtsituation modelliert. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt bei den hier angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 18,8°C.

Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die Temperaturverteilung zeigt aber auch innerhalb der bebauten Gebiete eine ausgeprägte räumliche Differenzierung, weil Areale wie beispielsweise Einzelhausbebauung, Zentrumsbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Die höchsten Temperaturen treten mit bis zu 22,9°C in der dicht bebauten und nahezu vollständig versiegelten Bremer Altstadt auf. Sehr hohe Temperaturen wurden ebenfalls für einzelne Gewerbegebiete ermittelt, die eine vergleichbare Gebäudedichte mit hohem Versiegelungsgrad aufweisen.

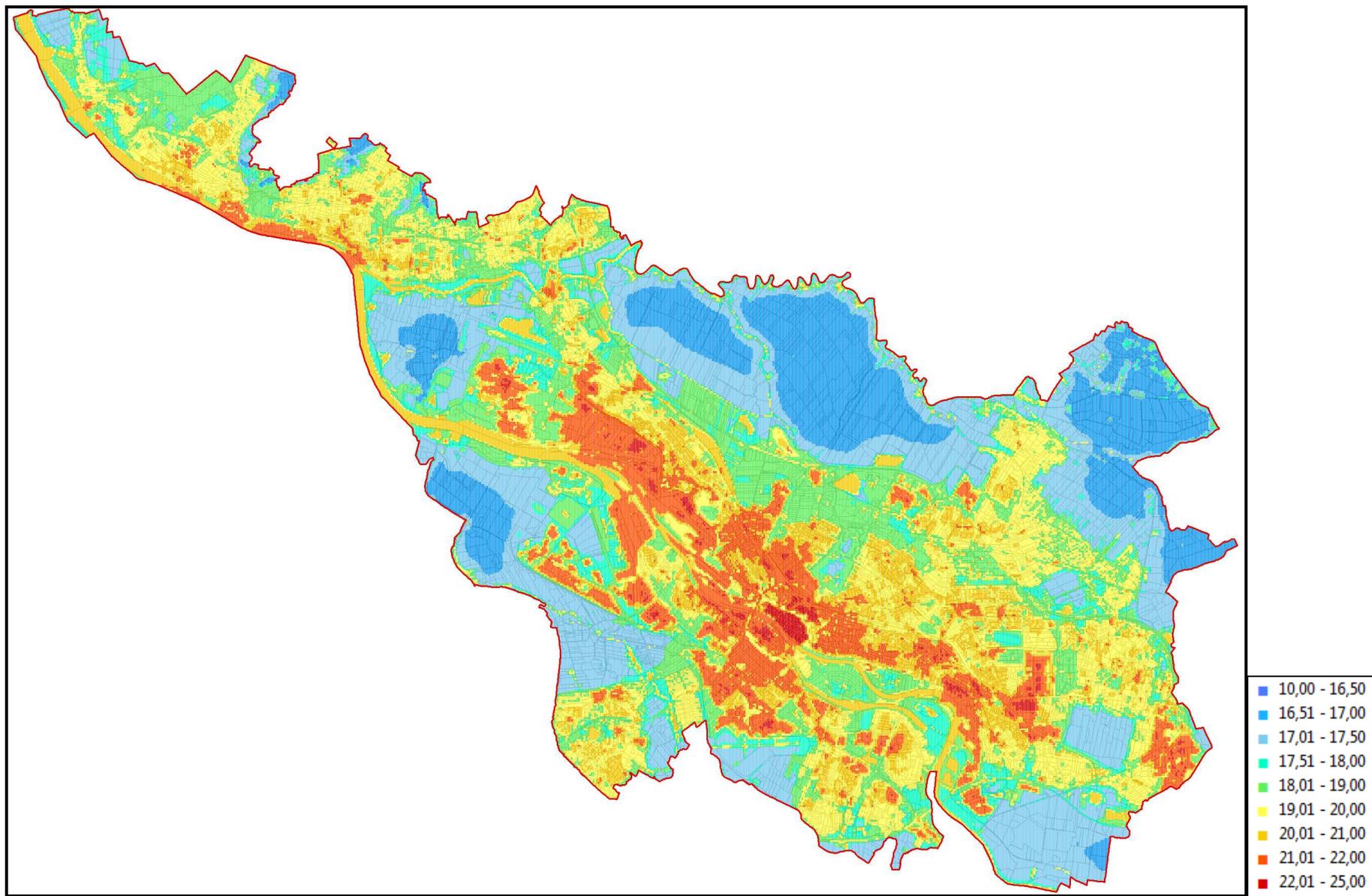


Abb. 4.1: Bodennahe Temperaturen in °C für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens.

Im innenstadtnahen Bereich können bereits auf sehr kurzer Distanz hohe Temperaturdifferenzen auftreten. Hier wurden zwischen Bürgerpark und Altstadt auf einer Distanz von nur 1.500 m Temperaturdifferenzen von etwa 5,5 K ermittelt. Abbildung 4.2 zeigt einen Ausschnitt der Innenstadt. Deutlich treten auch hier die stadtnahen Grünflächen mit geringeren Temperaturen hervor. Hier treten z.B. der Bürgerpark und die Sportanlage Findorff hervor, deren niedrigere Temperaturen sich auch in der angrenzenden Bebauung noch fortsetzen.

Die eingezeichnete schwarze Linie, die vom Kuhgrabensee als Startpunkt durch die Innenstadt verläuft, kennzeichnet die Route entlang der eine Messfahrt des Deutschen Wetterdienstes in den frühen Morgenstunden des 19. August 2012 durchgeführt wurde (DWD 2013). Die registrierten Temperaturwerte entlang der Linie sind farbig dargestellt, wobei die Farbskala identisch mit der Legende des berechneten Temperaturfeldes ist. Während dieser Messnacht war die Temperaturdifferenz zwischen stadtnahen Freiflächen und der Innenstadt mit einer Differenz von etwa 4 K nicht so deutlich ausgeprägt wie in der hier modellierten Situation. Für die Altstadt wurden Temperaturen bis zu 21,3 K gemessen, die niedrigsten Temperaturen traten mit 17,6 K in der Nähe des Kuhgrabensees auf. Hohe Temperaturen mit Werten über 21 °C wurden ebenfalls in dicht bebauten Bereichen der Ortsteile Findorff und Westend registriert.

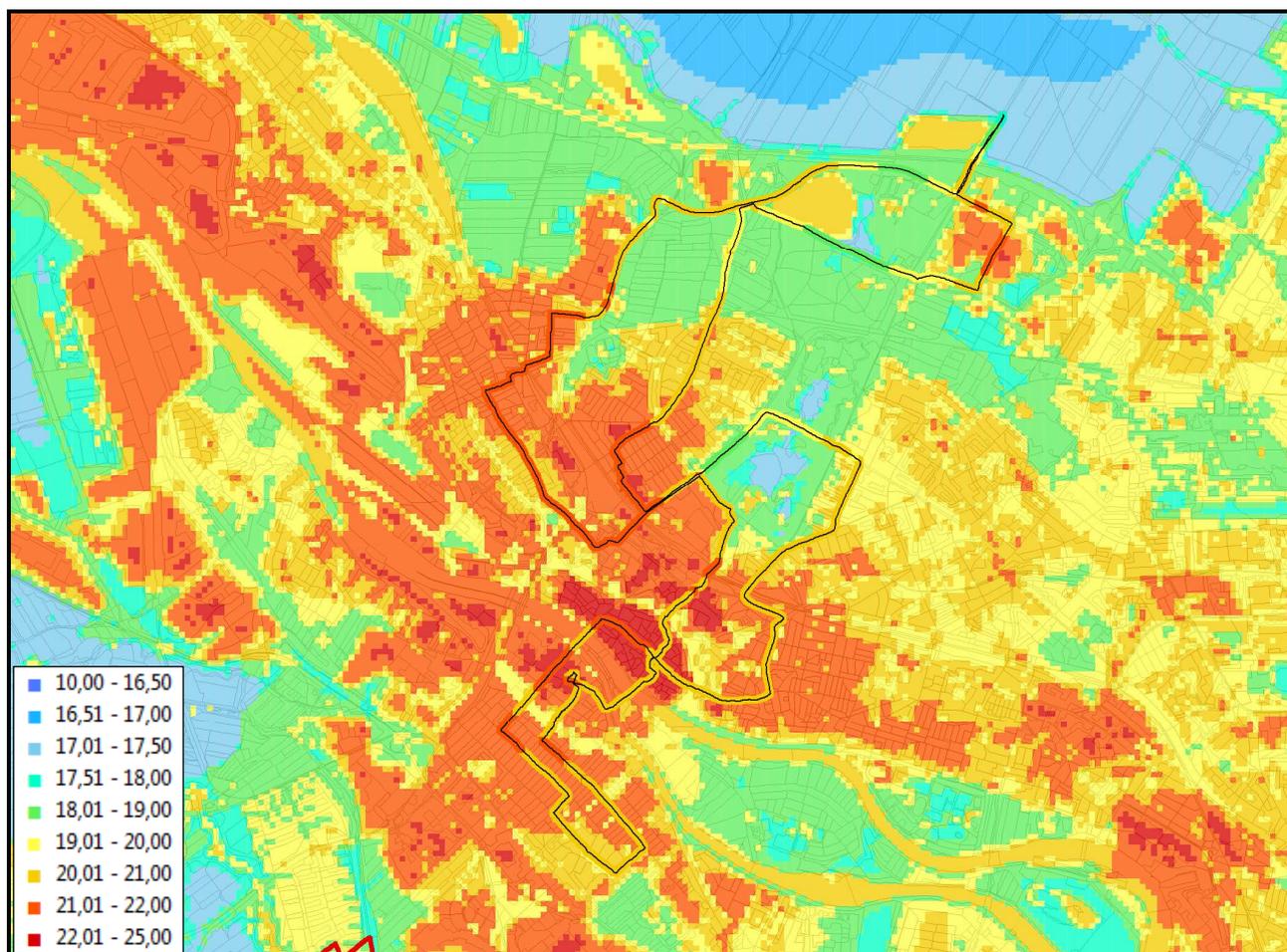


Abb. 4.2: Temperaturverteilung in der Innenstadt. Die Linie kennzeichnet den Verlauf der Temperaturmessroute (Datenquelle DWD, 2013).

4.2 Kaltluftproduktionsrate und Kaltluftentstehungsgebiete

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, führen vor allem die unterschiedlichen Boden- und Oberflächeneigenschaften einzelner Flächen zu unterschiedlich ausgeprägten Tagesgängen der bodennahen Lufttemperatur. Die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschichten weist deshalb deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Nutzung einer Fläche auf. Wie bereits erwähnt hängt die Abkühlungsrate unter anderem deutlich von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Bodens ab. Für die Berechnung der Kaltluftproduktionsraten sind somit Kenntnisse über die thermischen Eigenschaften des Untergrundes von großer Bedeutung. Die in der Literatur zu findenden Werte zu den wichtigsten Bodeneigenschaften decken eine große Bandbreite ab, so dass die Parametrisierung der Wärmeleitung im Boden für Modellsimulationen stets mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Bestimmung der Kaltluftproduktion kann daher mit erheblichen Fehlern behaftet sein, was sowohl für modellhafte Berechnungen als auch für Geländemessungen gilt. In der hier durchgeführten Modellsimulation wurden einheitliche thermische Eigenschaften für den nicht versiegelten Untergrund angenommen. Eine Berücksichtigung unterschiedliche Bodenfeuchtigkeiten und daraus resultierender Abkühlungsraten wurde somit nicht berücksichtigt.

Aus der Abkühlungsrate (Temperaturabnahme pro Zeiteinheit) die sich im Verlaufe der Nacht über eine Fläche beobachten lässt, kann die Kaltluftproduktion der Fläche abgeschätzt werden. Die Kaltluftproduktionsrate beschreibt die Menge an Luft, die sich innerhalb einer Stunde pro Quadratmeter lokal durch Ausstrahlung abgekühlt hat. Gerade über Grün- und Freiflächen zeigt der Tagesgang der Lufttemperatur eine große Amplitude, so dass solche Flächen entsprechend hohe Kaltluftproduktionsraten aufweisen.

Ergebnisse der Berechnungen:

Abbildung 4.3 zeigt die durchschnittliche stündliche Kaltluftproduktionsrate für die hier betrachtete Strahlungsnacht. Eine qualitative Einstufung der Werte erfolgte relativ zum Gebietsmittel der Produktionsrate. Erwartungsgemäß zeigen die landwirtschaftlich genutzten Freiflächen rund um den Siedlungsbereich der Stadt große Kaltluftproduktionsraten. Hier liegen effektive Kaltluftentstehungsgebiete. Im südlichen Teil Bremens weisen die meisten der direkt an die peripheren Siedlungen angrenzenden Freiflächen noch mittlere Kaltluftproduktionsraten auf. Das gleiche gilt für die größeren innerstädtischen Grünflächen und die Weserniederung. Die Abbildung der Kaltluftproduktionsrate verdeutlicht ebenso, dass Kaltluft auch in durchgrüneten Siedlungsbereichen produziert wird. In Relation zum Gebietsmittel ist die Produktionsrate der Siedlungsbereiche aber nur als gering einzustufen. Die folgende Tabelle fasst das Wertenniveau der Kaltluftproduktionsrate in den einzelnen Kategorien zusammen:

Bewertung	Kaltluftproduktionsrate Ø in m ³ /m ² und Stunde
sehr gering	3
gering	7
mittel	12
hoch	15

Tab.4.1: Werteausprägung der durchschnittlichen stündlichen Kaltluftproduktionsrate.

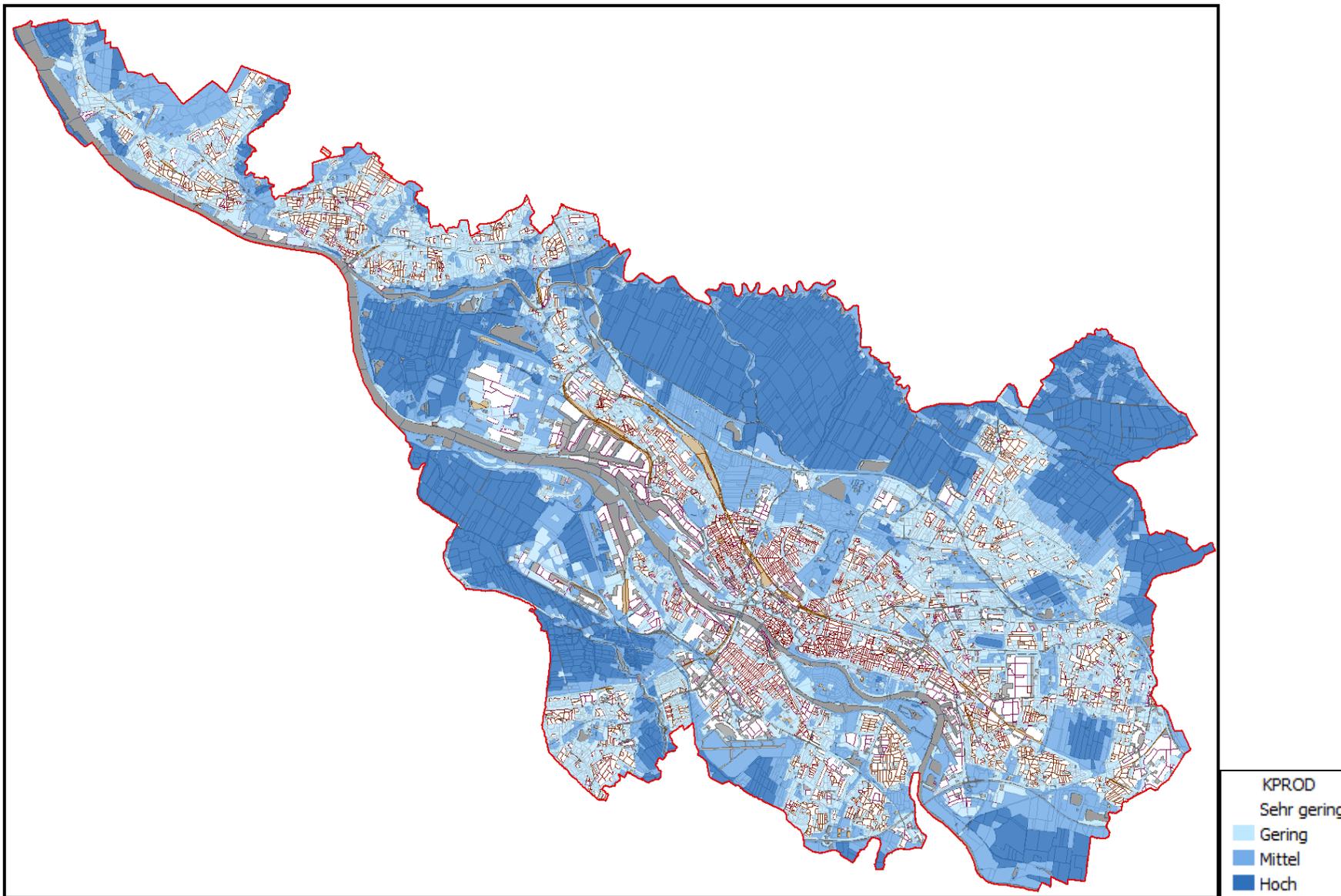


Abb. 4.3: Qualitative Einstufung der Kaltluftproduktionsrate im Untersuchungsgebiet Bremen.

4.3 Das nächtliche Strömungsfeld

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen unterschiedlichen nächtlichen Abkühlungsraten der einzelnen Flächen verursachen Temperatur- und Dichteunterschiede, die zu lokalen Ausgleichsströmungen führen.

Die auf stadtnahen Flächen entstandene Kaltluft setzt sich aufgrund ihrer höheren Dichte in Richtung der wärmeren Siedlungsräume in Bewegung. Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch den Temperatur- und damit verbundenen Dichteunterschied bestimmt sowie durch die Rauigkeit des überströmten Geländes beeinflusst. Die sich ausbildenden Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungen, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Für den südlichen Bereich Bremens bestimmen solche Flurwinde das nächtliche Strömungsfeld während windschwacher Hochdrucklagen.

An den geneigten Flächen im Norden Bremens fließt abgekühlte und damit schwerere Luft hangabwärts in Richtung Weser und Lesum. Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird vornehmlich durch die Temperaturdifferenz, den Strömungswiderstand der überströmten Flächen und die Hangneigung des Geländes bestimmt. Solche orographisch bedingten Kaltluftabflüsse erreichen durchweg höhere Strömungsgeschwindigkeiten als rein thermisch angetriebene Ausgleichsströmungen in ebenem Gelände.

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung einer der wichtigsten Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes. Da sich die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet haben, wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen.

Abb. 4.4 vermittelt einen Eindruck von dem für den Zeitpunkt 4:00 Uhr ausgewerteten Strömungsfeld das sich während einer sommerlichen, austauscharmen Strahlungswetternacht ausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt, wobei die Pfeile für eine übersichtlichere Darstellung in niedriger Auflösung abgebildet sind. Die unterlegten Farben stellen die Windgeschwindigkeit flächenhaft dar. Abgebildet sind Gitterzellen mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens 0,1 m/s.

Windgeschwindigkeiten mit Werten von mehr als 0,5 m/s treten vor allem im Norden von Bremen im Bereich der hangabfließenden Kaltluft auf. Aber auch im südlichen Teil von Bremen führen deutliche Temperaturunterschiede zwischen Freiflächen und warmen Siedlungsräumen regional zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten, vor allem wenn die Strömung über Flächen mit geringer Oberflächenrauigkeit erfolgt. Sehr hohe Geschwindigkeiten mit Werten bis zu 0,8 m/s wurden beispielsweise über der Weser, innerhalb der in Richtung Industriehäfen strömenden Kaltluft, ermittelt. Die in der Karte dunkelblau dargestellten Flächen kennzeichnen Bereich, in denen vergleichsweise hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten.

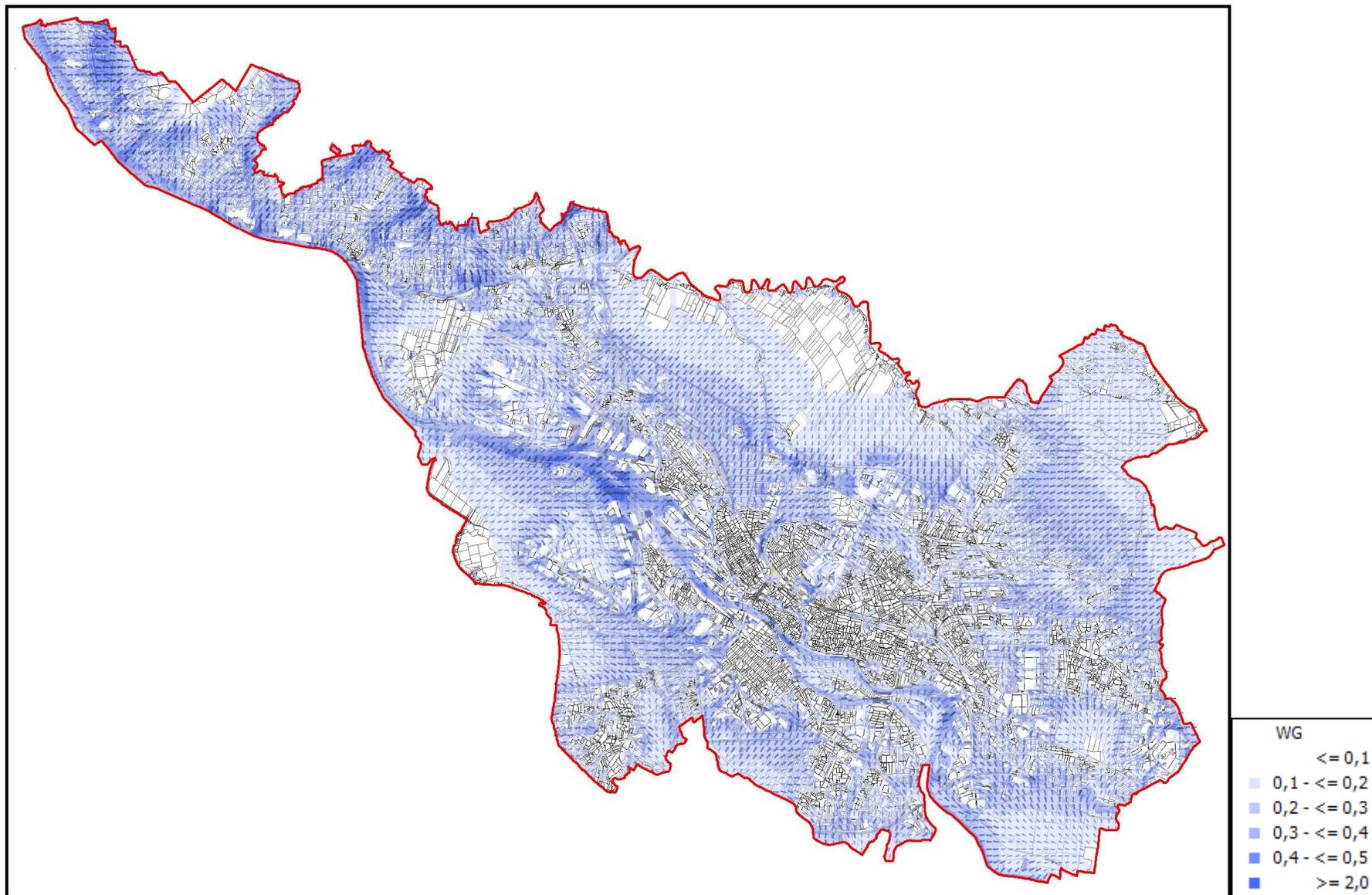


Abb. 4.4: Strömungsgeschwindigkeit in m/s und Strömungsrichtung (Pfeildarstellung) zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens.

Im Norden von Bremen sind hohe Geschwindigkeiten vor allem in einzelnen Taleinschnitten und gering bebauten Hangbereichen zu erwarten. Im Süden von Bremen reichen vereinzelt Bereiche mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten über vorwiegend unbebauten Flächen weit in das Stadtgebiet hinein. Hier wird sehr effektiv Kaltluft in wärmere Stadtbereiche transportiert. Die Berechnungen zeigen auch, dass Strömungsgeschwindigkeiten bis 0,2 m/s zum Teil noch in Distanzen von 2 bis 2,5 km von der Bebauung entfernt auftreten können. Diese Geschwindigkeiten werden in Abbildung 4.4 durch den zweithellsten Blauton dargestellt. Die Zonen mit Geschwindigkeiten von mindestens 0,2 m/s umschließen die periphere Bebauung im südlich Teil Bremens und reichen bis weit in die landwirtschaftlich genutzten Flächen hinein, die zuvor als effektive Kaltluftproduktionsgebiete analysiert wurden.

Mit den sich ausbildenden Ausgleichsströmungen erfolgt also ein Transport der auf diesen Flächen entstandenen Kaltluft in das Stadtgebiet. Als Bewertungsmaßstab für die Menge an Kaltluft, die mit der bislang nur bodennah dargestellten Ausgleichsströmung transportiert wird, wird der Kaltluftvolumenstrom betrachtet, der im nächsten Kapitel näher erläutert wird.

4.4 Kaltluftvolumenstrom

Den lokalen, durch Dichteunterschiede angetriebenen Ausgleichsströmungen kommen während windschwacher Nächte eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und auch Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Die potenzielle Ausgleichsleistung der Kaltluftströmung kann aber nicht allein aus der bodennahen Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet werden, da sie zu einem wesentlichen Teil von der Mächtigkeit der Kaltluftschicht und damit von der tatsächlich transportierten Masse an Kaltluft abhängig ist. Als quantitativer Parameter für die Ausgleichsleistung von Flächen wird daher der sogenannte Kaltluftvolumenstrom betrachtet, der das transportierte Volumen an Kaltluft durch eine definierte vertikale Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung angibt. Dabei wird das transportierte Luftvolumen über die absolute Höhe der Kaltluftschicht aufsummiert (integriert). Die horizontale Breite der Fläche entspricht bei den hier durchgeführten Auswertungen der Gitterweite des Strömungsmodells (hier 50 m). Der Kaltluftvolumenstrom ist damit ein Maß für die Menge an Kaltluft die aus einer Gitterzelle des Modells ausströmt. Als Mittelwert für eine Grünfläche ist der Kaltluftvolumenstrom damit ein Maß für die Kaltluftlieferung dieser Fläche.

Die Klassifizierung des Volumenstroms orientiert sich dabei am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Untersuchungsgebietes. Die qualitative Bewertung dieses Klimaparameters, der sich im vorliegenden Fall auf die Breite einer 50 m breiten Gitterzelle bezieht, zeigt Tab. 3.2 in Kapitel 3.4.1.

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten der Kaltluft hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab.

Gebäude, Mauern, Straßendämme oder Lärmschutzwände wirken als Strömungshindernisse und können luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Mächtigere Kaltluftschichten, die sich häufig erst im Laufe einer

Nacht ausbilden, über- oder umströmen Hindernisse. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Bebauungsdichte und –höhe aber auch der anthropogenen Wärmezufuhr ab. Auch natürliche Hindernisse wie zum Beispiel dichte Baum- oder Strauchbestände wirken bremsend. Ebenso tragen natürliche Wärmequellen wie z.B. Wasseroberflächen zu einer Erwärmung der Kaltluftschicht bei und beeinflussen so die Ausgleichsströmungen.

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des Strömungsfeldes einher, weshalb an dieser Stelle auf eine gesonderte Ergebnisbeschreibung verzichtet wird. Der Kaltluftvolumenstrom ist in der Klimafunktionskarte dargestellt, da er für die Bewertung der bioklimatischen Funktion der Grün- und Freiflächen von Bedeutung ist.

5. Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte fasst als erstes Teilergebnis dieser Untersuchung die klimaökologisch relevanten Strukturen zusammen, die für das Stadtgebiet von Bremen auf Grundlage der vorangegangenen Modellsimulationen ermittelt wurden. Die Karte ist dem Anhang des Berichtes zu entnehmen.

Ziel der in der Klimafunktionskarte dargestellten Analyse ist 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, kann ein Kaltlufttransport vom Ausgleichs- zum Wirkungsraum über gering bebaute Freiflächen erfolgen. Erfolgen diese Luftaustauschprozesse in deutlicher Ausprägung über Freiflächen mit begrenztem Querschnitt, werden solche Flächen als **Leitbahnen** bezeichnet. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein schematisches Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des **Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges** im Stadtgebiet von Bremen. Neben einer Abgrenzung der Funktionsräume, ist die qualitative Bewertung der einzelnen klimatischen Funktionsräume eine Kernaussage der Klimafunktionskarte:

- Einteilung der Grünflächen und Freiräume (Ausgleichsräume) entsprechend ihres Kaltluftliefervermögens
- Klassifizierung der Siedlungsräume (Wirkungsräume) entsprechend ihre bioklimatischen Belastung
- Bewertung lokaler und regionale Luftaustauschströmungen

Die Klimafunktionskarte bildet dabei den planungsrelevanten Ist-Zustand der Klimasituation ab. Sie konzentriert sich auf die Darstellung derjenigen Elemente und Bereiche, die sich mit landschaftsplanerischen Maßnahmen beeinflussen lassen (Maßnahmen zum Schutz, zur Sicherung und zur Entwicklung der Schutzgüter Klima und Luft). Die Klimafunktionskarte liefert somit eine Basis, anhand der klimatische Beeinträchtigungen abgeschätzt werden können, die sich aus Nutzungsänderungen ergeben könnten. Darüber hinaus stellt sie die Grundlage für ein räumliches Handlungskonzept für den Bereich Klima/Luft in der Landschaftsplanung bereit.

Der Aufbau der Karte folgt dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, wobei in den folgenden Unterkapiteln auf die Inhalte näher eingegangen wird.

5.1 Grünflächen und Freiräume

Vegetationsgeprägte Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion stellen klima- und immissionsökologische Ausgleichsräume dar und können über Hang- und Flurwinde die Wärmebelastung in Siedlungsflächen verringern. Solche Flächen mit hoher Kaltluftproduktion sind für Siedlungsgebiete entsprechend nur dann von Relevanz, wenn ein Transport der Kaltluft zu den Siedlungsbereichen erfolgen kann. Ein Maß für den Transport von Kaltluft ist der Kaltluftvolumenstrom.

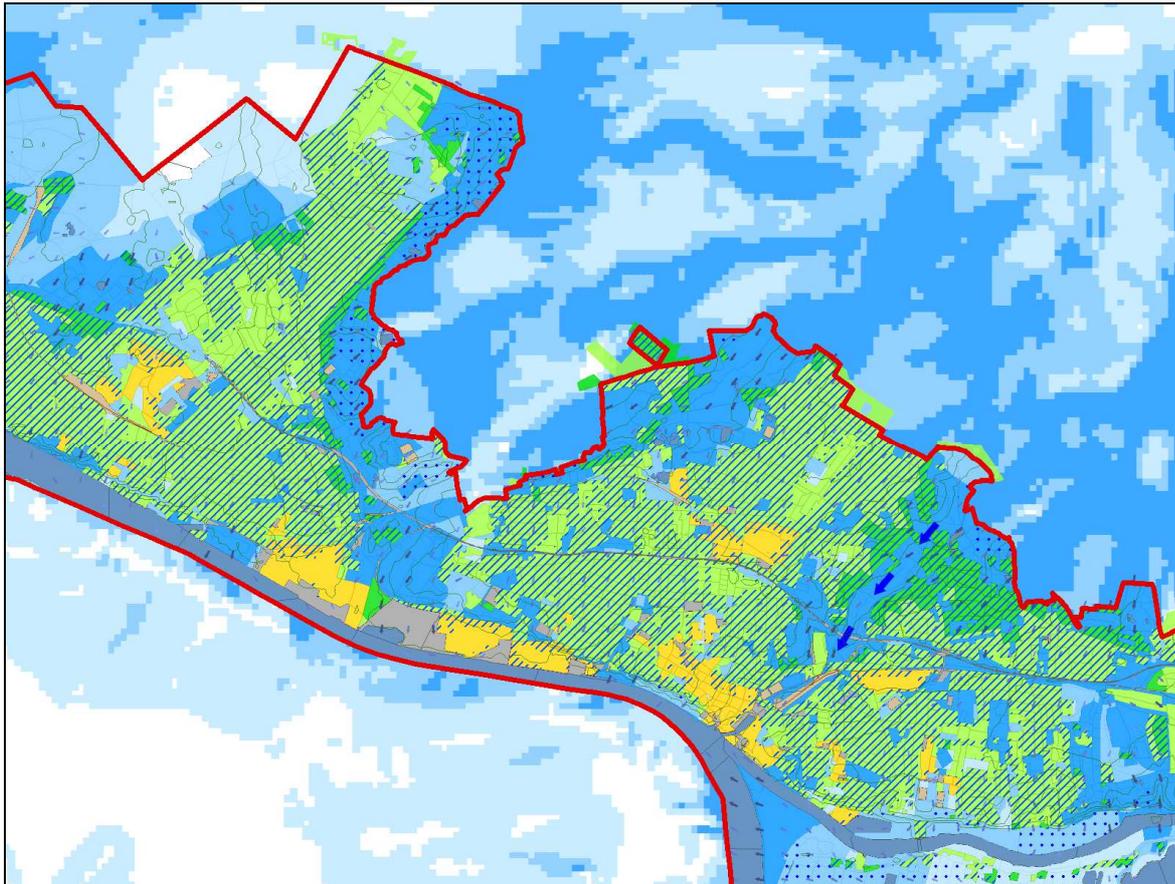
In der Klimafunktionskarte werden Grün- und Freiflächen zunächst unabhängig zu ihrer räumlichen Lage und Kaltluftproduktion lediglich hinsichtlich ihres Liefervermögens von Kaltluft charakterisiert. Als Bewertungskriterium wird der Volumenstrom als Maß für den Zustrom von Kaltluft aus benachbarten Flächen heran gezogen. Die Bewertung der Grünflächen erfolgt auf Grundlage einer qualitativen Einordnung der Kaltluftvolumenströme in 4 Klassen (s. Kap. 3.4.1).

In dem orographisch geprägten nördlichen Teil Bremens dominieren Flächen mit hoher Kaltluftlieferung. Hier kommt es an den zu Weser und Lesum abfallenden Hangbereichen zu einem großflächigen Abfließen von Kaltluft (s. Abb. 5.1). Die Siedlungsbereiche des südlichen, ebenen Teils von Bremen werden nahezu vollständig von vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben, die eine sehr hohe Kaltluftproduktion aufweisen. Diese Flächen sind in der Klimafunktionskarte zusätzlich durch blaue Punkte gekennzeichnet. Grünflächen mit hohen und mittleren Volumenströmen bilden einen Randbereich rund um die Siedlungsflächen der südlichen Ortsteile. Diese Grünflächen, die selbst auch Kaltluft produzieren, stellen zusätzlich ein wichtiges Verbindungsglied zwischen den weiter außerhalb liegenden Kaltluftentstehungsgebieten und den wärmeren Siedlungsräumen dar.

Große Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion liegen beispielsweise nördlich der Autobahn 27. Die Grünflächen zwischen Autobahn und städtischer Bebauung weisen nahezu durchgängig hohe und mittlere Kaltluftvolumenströme auf. Über diese Areale fließt die auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen produzierte Kaltluft in Richtung der dicht bebauten Ortsteile. Auch südwestlich der Weser liegen landwirtschaftliche Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion. Über siedlungsnahen Freiflächen und die Weser erfolgt auch hier mit hohen Volumenströmen ein Transport von Kaltluft in Richtung der Gewerbegebiete am Industriehafen.

Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen beispielhaft die entsprechenden Ausschnitte aus der Klimafunktionskarte. Zusätzlich zum Kaltluftvolumenstrom sind in den Abbildungen auch kleine Strömungspfeile dargestellt, die nochmals die Richtung und Geschwindigkeit der Kaltluftströmung verdeutlichen. Für eine übersichtlichere Darstellung wurden die für das 50 m x 50 m Raster berechneten Strömungsgeschwindigkeiten auf 200 m x 200 m große Rasterzellen gemittelt. Jeder Rasterzelle wird bei entsprechender Strömungsgeschwindigkeit ein Pfeil zugeordnet.

Die unter Abbildung 5.1 dargestellte Legende ist für alle weiteren Ausschnitte der Klimafunktionskarte gültig.



Grün- und Freiflächen

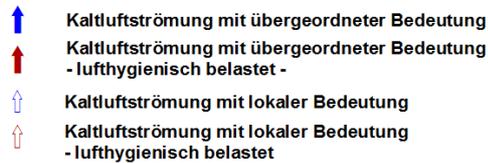
Kaltluftvolumenstrom



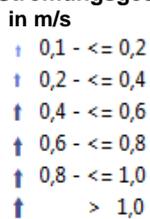
Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion



Luftaustausch



Strömungsgeschwindigkeiten



Siedlungsräume

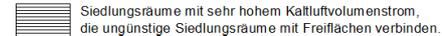
bioklimatische Situation



Siedlungsflächen im Einwirkungsbereich der Kaltluftströmung



Siedlungsflächen mit relevantem Luftaustausch



weitere Nutzungsstrukturen

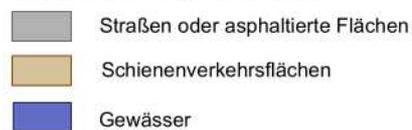


Abb. 5.1: Legende der Klimafunktionskarte und Ausschnitt: Bremen-Nord.

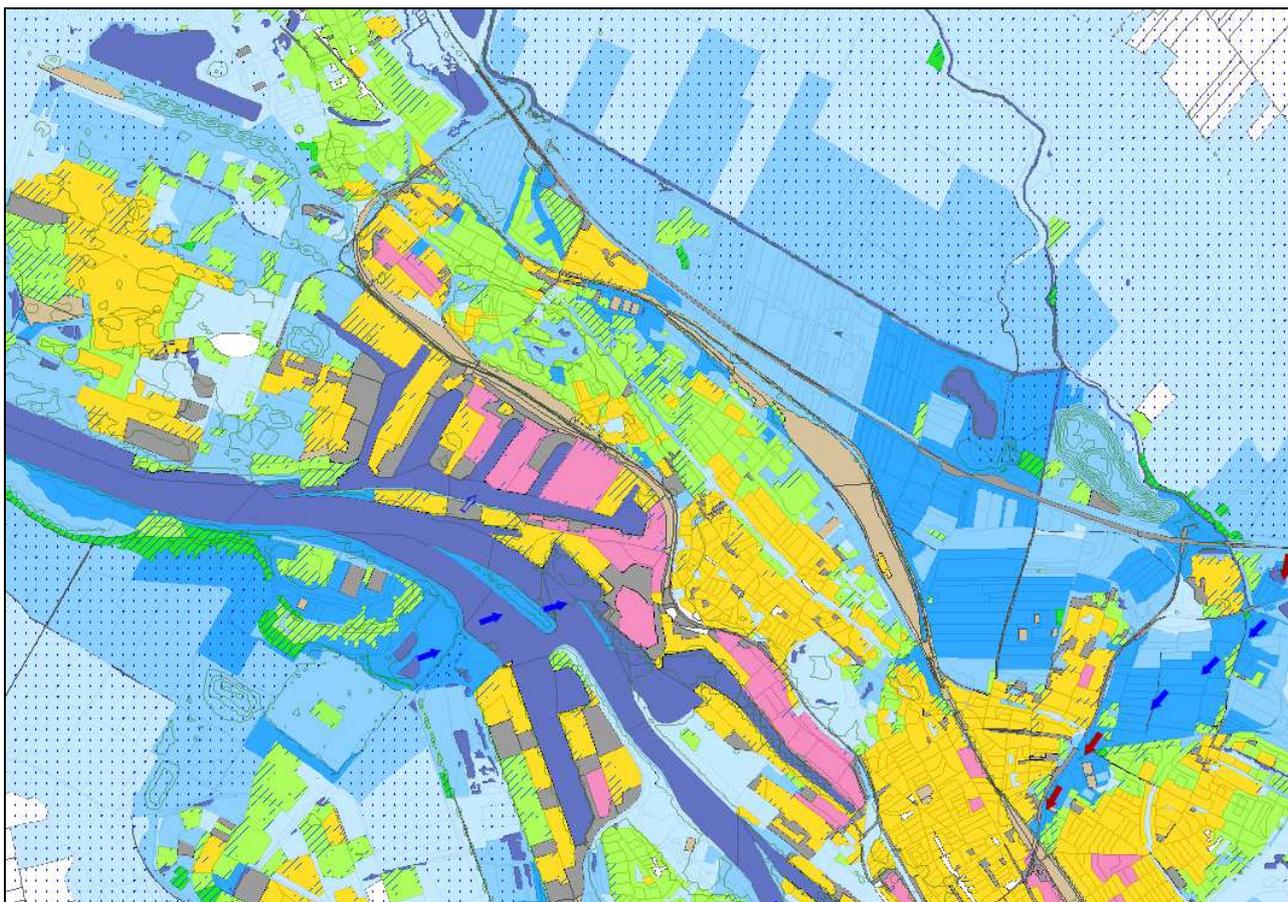


Abb. 5.2: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte: Bereich Industriehäfen, Überseestadt.
(Legende s. Abb. 5.1)

Auch die Ausgleichsleistung von Grünflächen, die eine geringe Kaltluftlieferung aufweisen, ist häufig noch klimaökologisch relevant, was insbesondere Grünflächen in stadtnahen Bereichen betrifft. Diese Areale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den jeweiligen klimatischen Einwirkungsbereich eine Ausgleichsströmung vergrößern.

Kleinere städtische Parkareale, Friedhöfe und Brachen sind aufgrund ihrer isolierten Lage in der Bebauung häufig durch eine sehr geringe Kaltluftlieferung charakterisiert. Wegen ihrer geringen Größe bilden sie zudem in der Regel keine eigene Kaltluftströmung aus. Die Flächenmindestgröße zur Ausbildung nächtlicher Strukturwinde wird in der Literatur mit etwa einem Hektar beziffert (SCHERER 2007). Die kleinen Flächen können somit nur eine untergeordnete Ausgleichsleistung für umliegende Siedlungsgebiete erbringen. Dennoch sind sie bioklimatisch durchaus von hoher Bedeutung und wirken als „Klimaoasen“ wenn sie in klimatisch ungünstigen Siedlungsbereichen liegen. Während sommerlicher Hochdrucklagen mit intensiver Einstrahlung und Wärmebelastung erfüllen auch diese kleinen innerstädtischen Grünflächen tagsüber eine wichtige Funktion als bioklimatische Erholungsräume. Dies gilt insbesondere dann, wenn sie durch Schattenbereiche, z.B. durch lichten Baumbestand und Wasserflächen ein vielfältiges Mosaik unterschiedlicher Mikroklimata aufweisen. Solche kleinen, öffentlich zugänglichen Grünflächen, die im Innerstädtischen Bereich als Klimaoasen fungieren können, sind beispielsweise der Brommyplatz und der Körnerwall in der östlichen Vorstadt, der Emmaplatz in Schwachhausen oder auch der Jan-Reiners Grünzug in Findorff und der Grünzug West.

5.2 Siedlungsräume

Die Klassifizierung der bioklimatischen Situation der Siedlungsräume erfolgt in vier qualitativen Bewertungskategorien auf Basis des PMV-Wertes als Maß für die Wärmebelastung in einer Sommernacht. In Relation zum Gebietsmittel werden daraus die Siedlungsflächen in bioklimatisch ungünstige und bioklimatisch günstige Bereiche untergliedert (s. Kap. 3.4.2). Tabelle 5.1 zeigt die mittlere Lufttemperatur und die mittlere Windgeschwindigkeit, die als wesentliche Klimaparameter die nächtliche Belastungssituation in den Siedlungsräumen charakterisieren:

Bioklimatische Situation	Anteil an der Siedlungsfläche	Temperatur Ø in °C	Windgeschwindigkeit in m/s
sehr günstig	6 %	17,4	0,20 (0 - 0,9)
günstig	60 %	19,4	0,17 (0 - 0,9)
weniger günstig	29 %	21,0	0,08 (0 - 0,4)
ungünstig	5 %	21,9	0,03 (0 - 0,2)

Tab. 5.1: Bioklimatische Situation in den Siedlungsräumen: Mittleres Temperaturniveau in 2 m Höhe und nächtliche Durchlüftungssituation.

Bioklimatisch günstige Siedlungen sind häufig durch eine relativ geringe bauliche Dichte, eine moderate Flächenversiegelung und durchgrünte Bereiche gekennzeichnet. Solche Bebauungsstrukturen sind typisch für Einzel- und Reihenhausbereiche. Liegen solche Siedlungen im Einwirkungsbereich von Kaltluftströmungen erfahren sie zusätzlich eine Entlastung der thermischen Situation. Aufgrund ihres für Siedlungsräume niedrigen Strömungswiderstandes kann Kaltluft weit in locker bebaute Bereiche eindringen. Kaltlufteinwirkungsbereiche sind in der Klimafunktionskarte durch eine diagonale blaue Schraffur gekennzeichnet. Insgesamt werden in Bremen etwa 36 % des Siedlungsraumes durchlüftet.

Die Eindringtiefe in die Bebauung ist bei hangabfließender Kaltluft mit Bezug zu großräumigen Kaltluftentstehungsflächen am intensivsten. So werden die locker bebauten Siedlungsflächen der Ortsteile im Norden von Bremen nahezu vollständig von Kaltluft durchströmt. Dementsprechend ist die bioklimatische Situation hier vorwiegend günstig. Abbildung 5.1 zeigt die günstige Durchlüftungssituation der Siedlungsflächen im Norden von Bremen.

Auch ohne orographischen Einfluss werden einzelne periphere Ortsteile mit lockerer Bebauung, wie beispielsweise Oberneuland, vollständig durchströmt. Abbildung 5.3 verdeutlicht die günstige Durchlüftungssituation in diesem Ortsteil. Die Eindringtiefe beträgt hier etwa 1.500 m. Liegen innerhalb der bebauten Flächen einzelne Grünflächen, kann die Kaltluftströmung sogar bis zu 2.000 m in die Siedlungsbereiche eindringen. An diesem Beispiel zeigt sich noch einmal der positive Einfluss auch kleinerer innerstädtischer Grünflächen die hier als „Trittsteine“ die Durchlüftungssituation günstig beeinflussen. Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt im südlichen, ebenen Teil von Bremen abhängig von der Bebauungsstruktur zwischen 100 m und etwa 1.500 m.

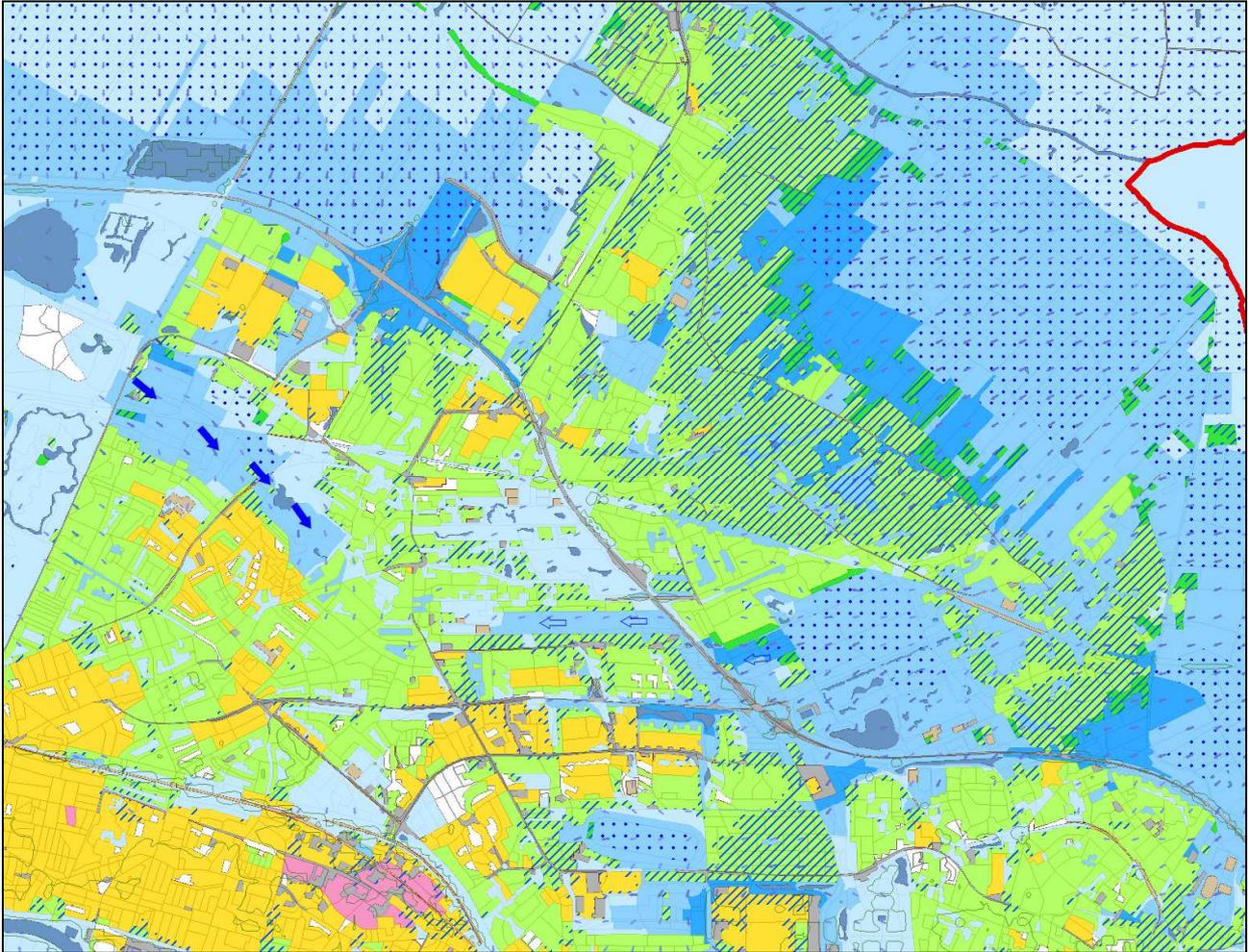


Abb. 5.3: Durchströmte Siedlungsbereiche: Bremen Oberneuland.

Bioklimatisch ungünstige Siedlungen weisen dagegen in der Regel eine stark verdichtete Bebauung mit hohem Versiegelungsgrad auf. Diese Bebauungsstrukturen, die typischerweise Stadtkerne mit Zentrums- und Blockbebauung kennzeichnen, bewirken während sommerlicher Hochdrucklagen eine Überwärmung dieser Ortsteile. Aufgrund ihres hohen Bauvolumens und ihrer großen Distanz zu Freiflächen sind sie außerdem für ausgleichende Kaltluftströmungen kaum zugänglich. In der Klimafunktionskarte können diese Siedlungsräume durch eine magenta-farbige Signatur leicht lokalisiert werden. Neben dem Stadtzentrum von Bremen (Ortsteile Mitte, vordere Neustadt und Teile von Woltmershausen) treten auch größere Gewerbe- und Industriareale, wie z.B. die Hafengebiete im Bremer Weste, die Airport-Stadt, das Mercedes-Werk und das Gewerbegebiet am Bremer Kreuz mit einer recht hohen Belastung hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur mit sehr hohem Versiegelungsgrad aufweisen.

Gebiete, in denen block- und zeilenartige Bauweisen vorherrschen, ordnen sich in ihren bioklimatischen Eigenschaften zwischen den Bebauungsextremen ein und weisen, je nach ihrer Lage zu Gunst oder Ungunstbereichen, variable Bedingungen in mittleren Belastungsbereichen auf.

Die in der Klimafunktionskarte dargestellte Verteilung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsräume spiegelt damit zum einen die einzelnen Bebauungstypen im Stadtgebiet mit ihren unterschiedlichen Verdichtungen wider, verdeutlicht aber ebenso die räumlichen Lage der Ortsteile relativ zu den Kaltluft liefernden Freiflächen und den positiven Einfluss nächtlicher Ausgleichsströmungen.

Tabelle 5.2 bilanziert die bioklimatische Situation im Siedlungsraum für die einzelnen Bebauungstypen. Abbildung 5.4 zeigt die Bilanz der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen im Stadtgebiet von Bremen.

bioklimatische Situation	Bebauungstyp und Anteil an der Siedlungsfläche				
	Zentrumsbebauung 1%	Blockbebauung 6%	Gewerbe 26%	Zeilenbebauung 15%	Reihen- und Einzelhaus 53%
sehr günstig	0 %	0 %	1 %	0 %	10 %
günstig	0 %	4 %	22 %	60 %	86 %
weniger günstig	20 %	92 %	62 %	39 %	4 %
ungünstig	80 %	4 %	15 %	0 %	0 %

Tab. 5.2: Bilanz der unterschiedlichen Siedlungstypen im Untersuchungsgebiet.

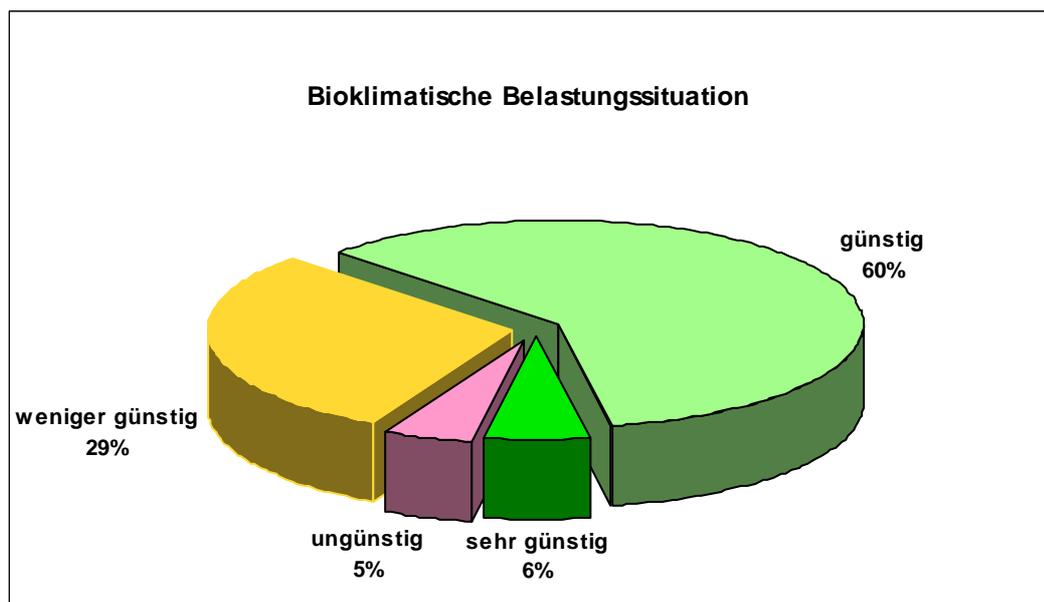


Abb. 5.4: Bilanz der Bioklimatischen Belastungssituation der Siedlungsflächen im Stadtgebiet von Bremen.

5.3 Luftaustausch

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Generell eignen sich für den Transport von Kaltluft Bereiche mit geringem Überbauungsgrad, einem hohen Grünflächenanteil und möglichst linearer Ausrichtung auf Wirkungsräume. Grundsätzlich kommen hierfür Tal- und Niederungsbereiche, größere Freiräume aber auch ausgedehnte Gleisareale und Wasserflächen als geeignete Strukturen in Frage. Erfolgt die Kaltluftströmung nicht flächig auf wärmere Ortsteile zu, sondern innerhalb räumlich begrenzter Bereiche spricht man von Kaltluftleitbahnen. Da Leitbahnen selbst auch Kaltluft produzieren können, lassen sich Grünflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf von Flächen abgrenzen über die lediglich ein Transport erfolgt. Insbesondere im innerstädtischen Bereich sind solche Flächen, wenn es sinnvoll erschien, ebenfalls als Luftaustauschbereiche ausgewiesen worden.

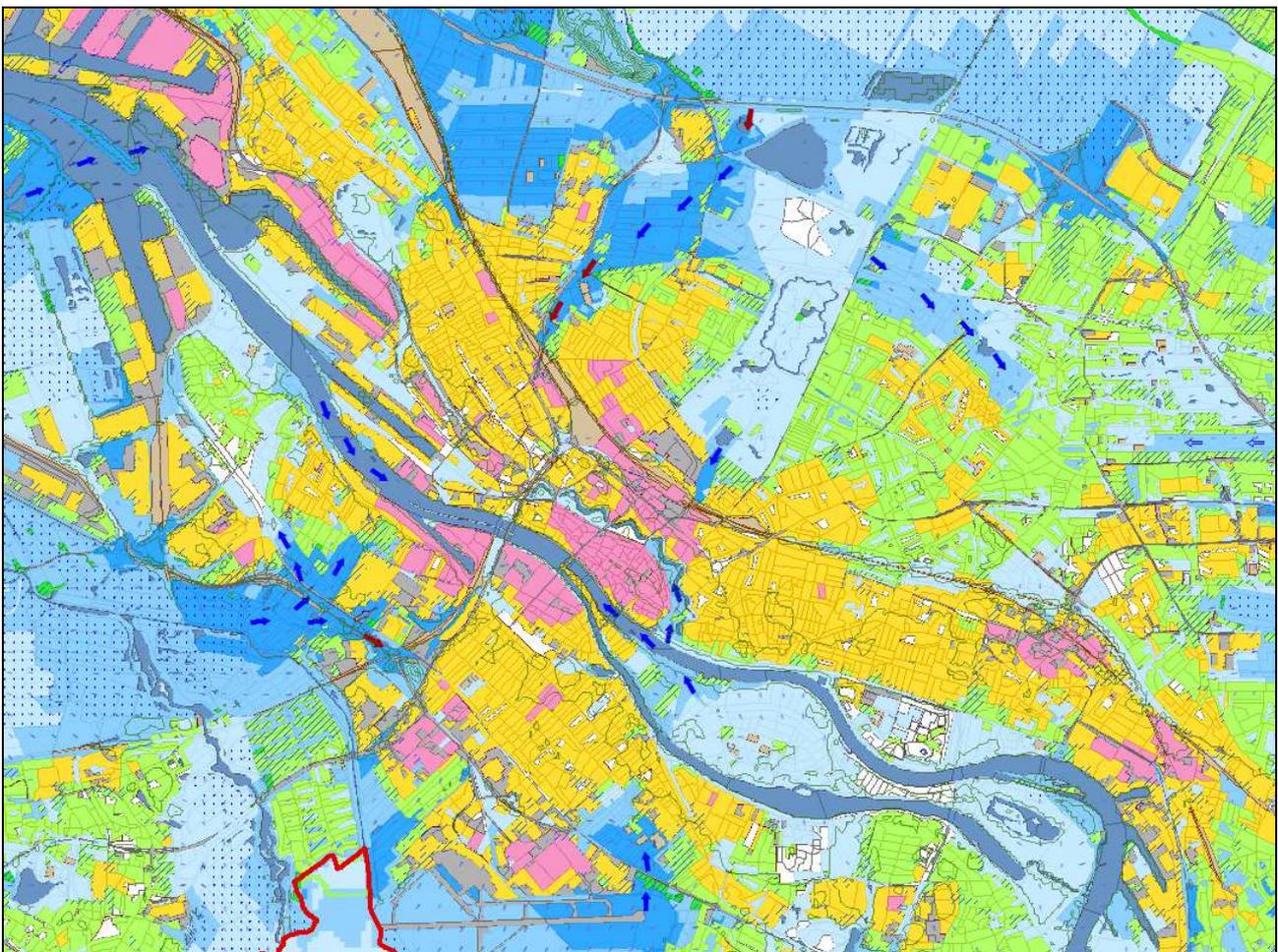


Abb. 5.5: Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte: Bremen Zentrum.

In Klimafunktions- und Planungskarte werden zwei Hierarchiestufen von Leitbahnen unterschieden: Als „übergeordnete Luftaustauschbereiche“ werden Luftaustauschsysteme gekennzeichnet, deren Wirkung über die direkt angrenzenden Siedlungsflächen hinausgeht und größere Kaltluftmassen über weitere Strecken in die Siedlungsräume transportiert. „Lokale Luftaustauschbereiche“ sind hingegen solche eher geringer Reichweiten, die Entlastungen in direkt angrenzenden Siedlungen erzielen und damit nur „lokal“ für angrenzende Bereiche von Bedeutung sind. Wurden im Rahmen der Ausbreitungsrechnung für verkehrsbedingte Luftschadstoffe der hier analysierte austauscharme Wetterlage für einzelne Kaltluftleitbahnbereiche überdurchschnittliche lufthygienischer Belastung ermittelt, werden die, den Verlauf der Leitbahnen kennzeichnenden Pfeile rot dargestellt. Im Rahmen dieses Berichtes ist es nicht möglich alle im Rahmen der Klimamodellierung analysierten Luftaustauschprozesse detailliert zu beschreiben. Die ausgewiesenen Leitbahnbereiche werden im Folgenden beispielhaft beschrieben.

Abbildung 5.5 zeigt einen Ausschnitt der Klimafunktionskarte, der im Wesentlichen das Stadtzentrum und die für diesen Bereich wichtigen Leitbahnen zeigt:

Im Bereich des Stadtzentrums ist die Weser, als nicht Kaltluft produzierende Fläche, ein wichtiger Luftaustauschbereich. Die Oberflächentemperatur der Weser ist im Hoch- und Spätsommer durchweg wärmer als die nachts in das Stadtgebiet einfließende Kaltluft. Aufgrund der sehr niedrigen Rauigkeit der Wasseroberfläche erfolgt trotzdem ein Transport von Kaltluft über die Wasseroberfläche in Richtung Innenstadt. Die Modellsimulationen zeigen, dass Kaltluft sowohl von Nordwesten, Weser aufwärts, als auch von Südosten, Weser abwärts, in Richtung der warmen Innenstadtbereiche fließt. Der Verlauf der Weser erfüllt in diesen Bereichen eine Funktion als Leitbahn. An warmen Sommertagen ist die Temperatur der Wasseroberfläche tagsüber durchweg niedriger als die Lufttemperatur. Auch im Tagesverlauf kommt es zu Ausgleichsströmungen zwischen der kühleren Umgebung und der sich schnell erwärmenden Innenstadt. Hier fungiert die Weser ebenfalls als Leitbahn für Flurwinde aus angrenzenden Freiflächen. Sehr häufig ist eine Höhenströmung überlagert, die im Laufe des Tages das bodennahe Windfeld beeinflusst. Der vergleichsweise schmale Flussverlauf mit seinem geringen Strömungswiderstand kann dann zu einer Kanalisierung der Strömung und damit verbunden relativ hohen Windgeschwindigkeiten führen. An warmen Sommertagen mit solchen Wetterlagen bietet die Flussnähe dann angenehme Kühle.

Aus nördlicher Richtung fließt Kaltluft aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen vorwiegend großflächig auf die Siedlungsbereiche zu. Nach Überquerung der A27 bildet sich zwischen Stadtwaldsee und der Müllverbrennungsanlage eine Leitbahn aus, die bis in den Bereich Regensburger Straße und Westend reicht und sich positiv auf die Durchlüftungssituation der angrenzenden Siedlungsbereiche auswirkt. Bei Findorff wurden für den Bereich der Bezirkssportanlage relativ hohe verkehrsbedingte Luftschadstoffbelastungen durch Emissionen der als Autobahnzubringer fungierenden B6 ermittelt. Der hier verlaufende Abschnitt der Kaltluftleitbahn wird als lufthygienisch belastet ausgewiesen. Auch bei der Überströmung der A27 werden Luftschadstoffe mit der Kaltluftströmung verdriftet. Da der Verlauf der Autobahn nicht durch Bebauung begrenzt wird, ist die Durchlüftungssituation hier allerdings allgemein günstiger, was sich positiv auf eine Verdünnung der freigesetzten Schadstoffe auswirkt. Hier treten vor allem in direkter Fahrbahnnähe hohe Immissionskonzentrationen auf. Der südlich der A27 gelegene kleine Wald wirkt sich zusätzlich günstig für eine Abschirmung der Verkehrsemissionen aus. Da nördlich der Autobahn große Kaltluft produzierende Flächen liegen

wird das kleine Waldstück im Laufe der Nacht überströmt. Die ausgewiesene Leitbahn kann für einen Großteil ihres Verlaufes als nicht relevant belastet eingestuft werden.

Der Bürgerpark erfüllt für die innerstädtische bioklimatische Situation eine sehr wichtige Funktion. Neben seiner eigenen Kaltluftproduktion erfolgt hier ein weiterer großflächiger Transport von Kaltluft weit in innenstadtnahe Bereiche. Am südlichen Bereich des Bürgerparks bildet sich ein kurzer Abschnitt mit hoher Kaltluftlieferung in Richtung Stadtzentrum aus. Eine weitere Leitbahn zweigt vom Bürgerpark nach Osten ab und verläuft über die Kleingartenflächen südlich des Ortsteils Lehe und den Friedhof Riensberg bis in den Ortsteil Riensberg.

Aus süd- und südwestlichen Richtungen fließt ebenfalls zunächst großflächig Kaltluft in Richtung der Siedlungsbereiche. Zwischen einzelnen Siedlungsräumen bilden sich im Wesentlichen zwei Leitbahnbereiche in Richtung der Ortsteile Huckelriede und Woltmershausen aus (s. Abb. 5.5). Hier erfolgt ein Transport mit hohen Volumenströmen, so dass die Kaltluft in der zweiten Nachthälfte auch die quer zu den Leitbahnen verlaufenden Bundesstraße 75 bzw. Autobahn A280, die in Einschnitten liegen oder auch auf Dämmen verlaufen, überströmt. Auch hier bleiben relevante Schadstoffkonzentrationen im Wesentlichen auf den Nahbereich der Fahrbahnen beschränkt, so dass die quer zum Fahrbahnbereich verlaufenden Teilbereiche der Leitbahn insgesamt als nicht wesentlich belastet eingestuft werden. Zu einem Ansammeln von Schadstoffkonzentrationen kommt es dagegen für den parallel zur Fahrbahn verlaufenden Teilabschnitt der Leitbahn, der in Richtung der Anschlussstelle Bremen-Neustadt weist. Aufgrund der hier relativ dicht an die Fahrbahnen heranrückenden Bebauung treten hier höhere Immissionskonzentrationen auf als an den gut durchlüfteten Abschnitten mit vergleichbaren Verkehrsbelastungen. Ebenso werden mit der hier nach Norden abzweigenden Leitbahn lokaler Bedeutung Luftschadstoffe verdriftet. Diese Leitbahnabschnitte wurden somit als lufthygienisch belastet ausgewiesen.

Eine weitere Leitbahn von übergeordneter Bedeutung zeichnet sich über der Weser in Richtung Industriehäfen und Überseestadt ab. Abbildung 5.2 zeigt diesen Ausschnitt in höherer Auflösung. Bei den im Bremer Raum sehr häufig auftretenden Westwindlagen kommt dem hier als Kaltluftleitbahn hervortretenden Bereich eine wichtige Bedeutung als Ventilationsbahn zu. Gut durchlüftete Bereiche weisen neben einer günstigen bioklimatischen Situation generell auch günstigere lufthygienische Bedingungen auf, da Schadstoffe besser verdünnt und weitertransportiert werden können.

In dem orographisch geprägten nördlichen Teil Bremens kommt es an den zu Weser und Lesum abfallenden Hangbereichen zu einem großflächigen Abfließen von Kaltluft (s. Abb. 5.1). In diesem insgesamt gut durchlüfteten Teil Bremens zeichnet sich im Ortsteil Schönebeck innerhalb der abfließenden Kaltluft eine Leitbahn ab (Tal der Schönebecker Aue).

Ein Beispiel für eine Leitbahn mit lokaler Bedeutung zeigt Abbildung 5.3. Über den Golfplatz Vahr kann die von Osten her einfließende Kaltluft weiter in den Siedlungsbereich vordringen. Die Kaltluftlieferung erfolgt hier in weitestgehend bioklimatisch günstige Siedlungen, die aber lokal von dem Kaltlufttransport profitieren.

Über die, für die nächtliche Belastungssituation wichtigen Leitbahnen, erfolgt auch tagsüber ein Einströmen kühlerer Umgebungsluft in überwärmte Stadtbereiche. Leitbahnbereiche fungieren generell auch als so-

nannte Ventilationsbahnen⁶. Sie können ebenso während zyklonal geprägter Wetterlagen zu einer guten Durchlüftung der Stadt beitragen und wirken sich damit auch positiv auf die Immissionssituation, vor allem für bodennah freigesetzte Schadstoffe aus.

Kaltluft kann in Einzelfällen nicht nur über Grün-, Freiflächen und Flussläufe, sondern auch über Siedlungsbereiche mit geringer Baudichte, niedrigen Bauhöhen und/oder einem hohen Grünanteil weitergeleitet werden. Im Untersuchungsgebiet wurden zwei Siedlungsbereich mit sehr hohen Kaltluftvolumenströmen ermittelt. Diese sehr kleinräumigen Siedlungen stellen auf engem Raum eine Verbindung zwischen bioklimatisch ungünstigem Siedlungsraum und Grünflächen mit sehr hohen Kaltluftvolumenströmen her und fungieren damit ähnlich einer Leitbahn innerhalb des Siedlungsbereiches. Diese Siedlungen sind in der Klimafunktionskarte zusätzlich durch eine horizontale Schraffur ausgewiesen. Ein schmaler Siedlungsbereich mit sehr hohen Kaltluftvolumenströmen verbindet das Mercedes Benz Werk mit der Osterholzer Feldmark. Ein weiterer Siedlungsbereich liegt zwischen den nördlich des Flughafens gelegenen Gewerbeflächen und stellt eine Verbindung zu den westlich gelegenen Kleingartenflächen her. Von dem hier stattfindenden Kaltlufttransport profitieren vor allem die nahe gelegenen Gewerbeflächen der Airport-Stadt.

⁶s. Glossar

6. Planungshinweiskarte Stadtklima

Die Planungshinweiskarte Stadtklima stellt eine integrierende Bewertung der in der Klimafunktionskarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Fragestellungen dar. Aus ihr lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur stadtklimatischen Situation ableiten oder auch Auswirkungen von Nutzungsänderungen bewerten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele

- 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. Die Planungsempfehlungen beziehen sich in erster Linie auf die Luftaustauschprozesse während windschwacher Strahlungswetterlagen und betreffen damit das bebaute Stadtgebiet als Wirkraum und die daran angrenzenden Freiflächen, die durch Kaltlufttransport und -produktion als Ausgleichsräume von Bedeutung sind. Die Planungshinweiskarte ist im Anhang zu diesem Bericht zu finden.

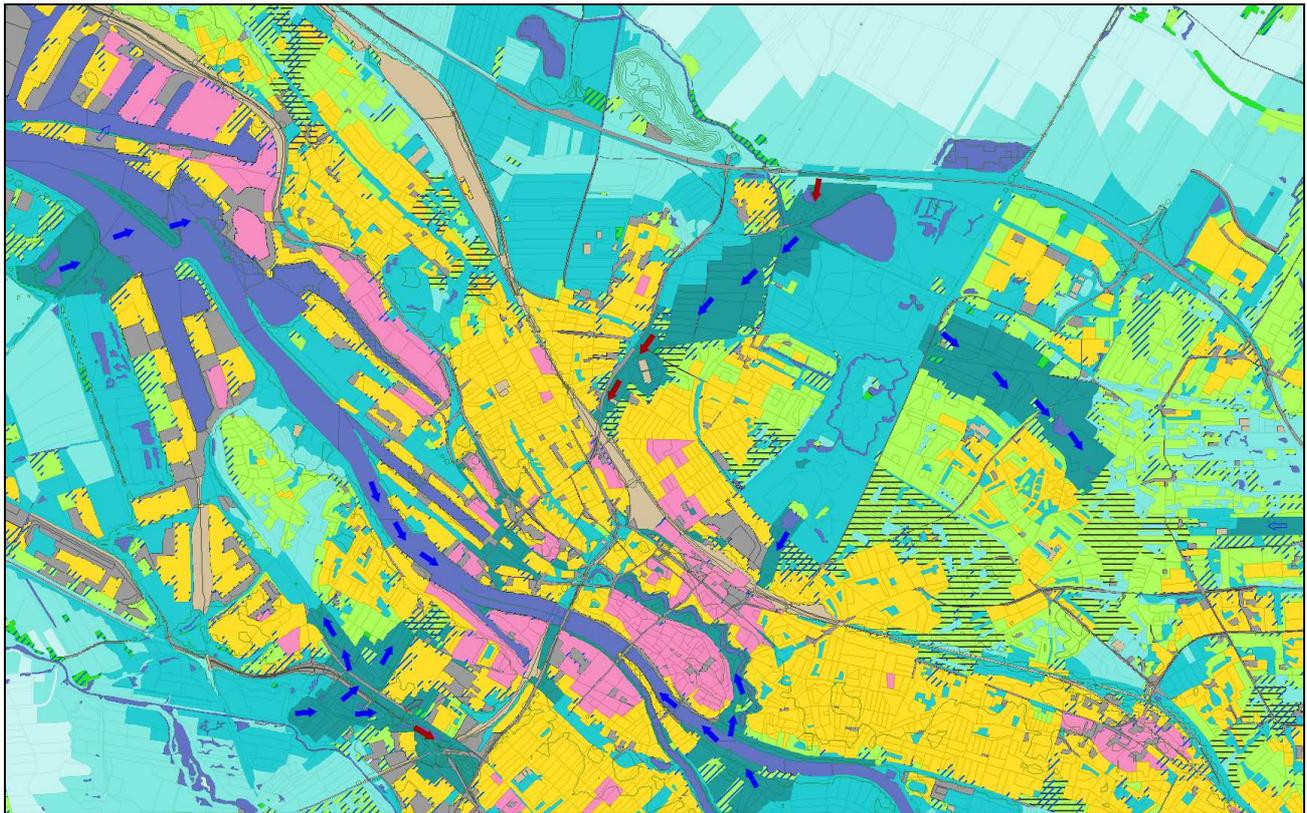
6.1 Grünflächen und Freiräume

Innerstädtische und siedlungsnaher Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. In der Planungshinweiskarte tritt daher der Kaltluftvolumenstrom oder die Kaltluftproduktivität einer Grünfläche als qualifizierender Parameter bei der Bewertung mehr in den Hintergrund. Für die planerische Einordnung ist vielmehr die Frage entscheidend, welche Ausgleichsleistung eine Grünfläche für vornehmlich bioklimatisch ungünstige Siedlungsbereiche erbringen kann (s. auch Kap. 3.4.4)

Grünflächen mit hoher und sehr hoher bioklimatischer Bedeutung

Grünflächen mit einer hohen oder sogar sehr hohen bioklimatischen Bedeutung sind demzufolge hauptsächlich in direkter Siedlungsnähe vorzufinden. Diese Grünflächen verfügen entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch belasteten Wirkungsraum oder weisen einen überdurchschnittlichen Kaltluftvolumenstrom auf und sind gleichzeitig als Ausgleichsraum oder wichtiges Kaltluftquellgebiet einzustufen.

Aus der Kategorie dieser wichtigen Grünareale bekommen Flächen, die als Kaltluftleitbahn fungieren oder als innerstädtische Grünflächen direkt an bioklimatisch ungünstige Siedlungsräume angrenzen, eine sehr hohe stadtklimatische Bedeutung zugewiesen.



Ausgleichsräume

Grün- und Freiflächen

- geringe bioklimatische Bedeutung**
Freiflächen mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete. Geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung.
- mittlere bioklimatische Bedeutung**
Freiflächen mit mittlerem Einfluss auf Siedlungsgebiete. Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßvolle Bebauung, die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, ist möglich.
- hohe bioklimatische Bedeutung**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Luftaustausch mit der Umgebung erhalten. Bei Eingriffen Baukörperstellung beachten sowie Bauhöhen möglichst gering halten.
- sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen, Emissionen reduzieren.
- Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion**

Luftaustausch

Kaltluftleitbahnen

- übergeordnete Leitbahn**
lufthygienisch belastet / unbelastet
Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen. Transport größerer Kaltluftmassen über durchweg weitere Strecken. Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Bauhöhe möglichst gering halten, Neubauten längs zur Luftleitbahn ausrichten, Randbebauung oder dichte Baumbepflanzungen möglichst vermeiden. Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.
- lokale Leitbahn**
lufthygienisch belastet / unbelastet
Lokaler Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten oder übergeordneten Leitbahnbereichen und angrenzenden Siedlungsräumen. Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Bauhöhe möglichst gering halten, Neubauten längs zur Luftleitbahn ausrichten, Randbebauung möglichst vermeiden. Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.

Wirkungsräume

Siedlungsflächen

- sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung. Sehr günstiges Bioklima erhalten. Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Baukörperstellung beachten, Bauhöhen möglichst gering halten.
- günstige bioklimatische Situation**
Siedlungsstruktur mit geringer bioklimatischer Belastung und günstigen Bedingungen. Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Baukörperstellung beachten, Bauhöhen möglichst gering halten.
- weniger günstige bioklimatische Situation**
Siedlungsräume mit mäßiger bioklimatischer Belastung. Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Möglichst keine weitere Verdichtung, Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils, Erhalt aller Freiflächen, Entsiegelung und ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen.
- ungünstige bioklimatische Situation**
Siedlungsräume mit hoher bioklimatischer Belastung. Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine weitere Verdichtung, Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils, Erhalt aller Freiflächen, Entsiegelung und ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen.
- Einwirkungsbereich der Kaltluftströmung innerhalb der Bebauung**
- Siedlungsflächen mit klimarelevanter Funktion**
Bebaute Gebiete mit Kaltlufttransport in Richtung ungünstiger Siedlungsbereiche oder mit günstiger Wirkung für angrenzende belastete Siedlungsräume. Möglichst keine weitere relevante Verdichtung.
- Siedlungsräume mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom, die ungünstige Siedlungsräume mit Freiflächen verbinden.**
Keine Verdichtung und Vermeiden von Austauschbarrieren.

weitere Nutzungsstrukturen

- Straßen oder asphaltierte Flächen
- Schienenverkehrsflächen
- Gewässer

Höhenlinie 5 m

Abb. 6.1: Legende der Planungshinweiskarte und Kartenausschnitt: Bremen Innenstadt.

Abbildung 6.1 zeigt die Legende der Planungshinweiskarte und beispielhaft einen innerstädtischen Ausschnitt der Karte. Die Legende ist auch für die im Weiteren dargestellten Ausschnitte der Planungskarte gültig.

Grünflächen mit hoher und sehr hoher Bedeutung grenzen hier direkt an weniger günstige Siedlungsbereiche an. Sie stellen eine direkte Verbindung zwischen den Flächen mit überdurchschnittlich hoher Kaltluftproduktion (gekennzeichnet durch blaue Punkte) und den vielfach stadtklimatisch weniger günstigen bis ungünstigen, dicht bebauten Innenstadtbereichen. Große Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion liegen beispielsweise nördlich der A27. Die Grünflächen zwischen Autobahn und städtischer Bebauung weisen nahezu durchgängig sehr hohe Kaltluftvolumenströme auf. Über diese Areale fließt die auf den vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen produzierte Kaltluft in Richtung der dicht bebauten Ortsteile. Eine hohe stadtklimatische Bedeutung kommt an dieser Stelle dem Bürgerpark zu, der einen Transport von Kaltluft bis in den innerstädtischen Bereich ermöglicht. Bereiche die sich hier durch besonders hohe Strömungsgeschwindigkeiten und damit verbundenen Kaltluftvolumenströmen auszeichnen, sind durch große blaue Pfeile als Kaltluftleitbahnen gekennzeichnet. Den dazugehörigen Grünflächen wird die höchste stadtklimatische Priorität zugeordnet. Eine sehr hohe stadtklimatische Bedeutung kommt ebenfalls den Wallanlagen der Altstadt zu, die nahezu vollständig von ungünstigem Siedlungsraum umgeben werden.

In den nördlich der Lesum gelegenen Ortsteilen von Bremen grenzen Grünflächen mit hoher bioklimatische Bedeutung entweder an bioklimatisch ungünstige Siedlungsbereiche an oder kennzeichnen vegetationsgeprägte Hangflächen mit relevanten Kaltluftabflüssen. Da die Durchlüftung der nördlichen Ortsteile generell günstiger ist, wurden hier keine bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräume ermittelt. Grünflächen mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung finden sich hier ausschließlich im Leitbahnbereich der Schönebecker Aue.

Grünflächen mit mittlerer bioklimatischer Bedeutung

Eine mittlere bioklimatische Bedeutung haben Grünflächen die entweder über einen hohen Kaltluftvolumenstrom oder aber eine hohe Kaltluftproduktion aufweisen. Grünflächen mit mittlerer klimaökologischer Bedeutung grenzen häufig an Flächen mit sehr hohen Volumenströmen an und bilden damit ein Verbindungsglied zu weiter entfernt liegenden Freiflächen. Unter diese Kategorie fallen auch die bereits beispielhaft angesprochenen landwirtschaftlich genutzten Flächen nördlich der A27. Diese Flächen weisen zum Teil noch hohe (über dem Mittelwert des Untersuchungsgebietes liegende) Volumenströme auf und binden damit die großflächigen, weiter nördlich gelegenen Kaltluftproduktionsgebiete an die Stadt an.

Eine mittlere stadtklimatische Bedeutung kommt auch Grünflächen zu, die von vorwiegend klimatisch günstigen Siedlungsbereichen eingeschlossen werden. Die folgende Abbildung zeigt als Beispiel hierfür einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für das östliche Stadtgebiet. Die Galopprennbahn, der Osterholzer Friedhof und die Osterholzer Feldmark sind solche von Siedlungsbereichen umgebene Grünflächen. Alle drei Areale weisen eine hohe bis sehr hohe Kaltluftproduktion auf. Die Kaltluftvolumenströme sind allerdings gering, da der Transport der Kaltluft radial in die umgebenden Siedlungsbereiche erfolgt. Diese Flächen sind damit für die angrenzende Bebauung wichtige Kaltluftlieferflächen, hier erfolgt aber kein übergeordneter Transport von Kaltluft.



Abb. 6.2: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte, östliches Stadtgebiet. (Legende s. Abb. 6.1)

Weiterhin werden auch stadtnahe Wald- und Forstgebiete, wie z.B der Stadtwald, pauschal in diese Klasse eingeordnet. Wald kommt generell eine von der Stärke des nächtlichen Kaltluftliefervermögens unabhängige bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum zu.

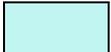
Allen übrigen Grünflächen und Freiräumen wird eine **geringe stadtklimatische Bedeutung** zugewiesen. Hierbei handelt es sich meist um siedlungserne Flächen ohne nennenswerten Einfluss auf belastete Siedlungsbereiche.

Aus der Einordnung der stadtklimatischen Relevanz der Grünflächen resultieren unterschiedliche Hinweise für planerische Maßnahmen, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind. Die Auflistung der Hinweise erfolgt in etwa anhand ihrer Relevanz soweit dies für allgemein gültige Maßnahmen möglich ist.

Generell sollten Grünflächen mit stadtklimatischer Bedeutung erhalten und möglichst in ihrer Funktion als Kaltluft liefernde Flächen gestärkt werden. Zur Optimierung ihrer Funktionen trägt eine Minimierung der Versiegelung und eine Vermeidung größerer Strömungshindernisse bei.

In Hinblick auf die Tagsituation können großkronige, schattenspendende Bäume Erholungszonen bilden. In diesem Zusammenhang kommt auch sehr kleinen Schatten spendenden Grünarealen mit geringer stadtklimatischer Relevanz eine Bedeutung als „Klimaoasen“ zu. Abgesehen von reinen Waldflächen, denen generell eine hohe bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum zukommt, sollten Grünflächen eher einen lockeren gut durchströmbaren Baumbestand aufweisen.

Grünflächen, die auf Grund ihrer Größe von mindestens etwa einem Hektar eine Ausgleichswirkung für angrenzende Siedlungsbereiche haben, sollten im Übergangsbereich zur Bebauung weitestgehend von dichten Gehölzen freigehalten werden, die einen Luftaustausch behindern könnten.

Bioklimatische Bedeutung	Kriterium	Beurteilung der Empfindlichkeit	Hinweise zu Maßnahmen
Sehr hohe Bedeutung 	Leitbahnen: Hoher Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen.	Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungsquerschnitt sichern (> 300 m) • Aufweitung oder Beseitigung baulicher und sonstiger Strömungshindernisse • Abriegelnde Randbebauung oder dichte Baumbepflanzung vermeiden • Angrenzende bauliche Folgenutzungen längs zur Leitbahn ausrichten • Erhalt des Grünflächenanteils und Minimierung der Versiegelung • Vermeidung oder Verringerung von Luftschadstoffemissionen
	Grünflächen mit direktem Bezug zu bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen.	Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt des Grünflächenanteils und Minimierung der Versiegelung • Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen • Grünflächen vernetzen • Baumbestand optimieren (nur lockerer Baumbestand mit durchströmbarem Stammraum) • Immissionsschutzpflanzungen entlang von Hauptverkehrsstraßen
Hohe Bedeutung 	Hoher Luftaustausch in Richtung belasteter Siedlungsräume (Anbindung von Kaltluftquellgebieten)	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt des Grünflächenanteils • Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber Leitbahnen • Grünflächen vernetzen • Vermeidung oder Verringerung von Luftschadstoffemissionen • Bei baulichen Eingriffen Gebäudeausrichtung beachten sowie Bauhöhen möglichst gering halten
	Grünflächen mit direktem Bezug zu bioklimatisch weniger günstigen Siedlungsräumen	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt des Grünflächenanteils • Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen • Grünflächen vernetzen • Baumbestand optimieren (nur lockerer Baumbestand mit durchströmbarem Stammraum) • Immissionsschutzpflanzungen entlang von Hauptverkehrsstraßen
Mittlere Bedeutung 	Stadtnahe Grünflächen mit hohem Kaltluftvolumenstrom oder hoher Kaltluftproduktion.	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst erhalt des Grünflächenanteils • Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen • Vermeidung oder Verringerung von Luftschadstoffemissionen • Maßvolle Bebauung möglich, wenn sie den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt • Waldbestand sichern
Geringe Bedeutung 	Freiräume mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete oder unbedeutendem Kaltlufttransport oder geringer Kaltluftproduktion.	Geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderung.	<ul style="list-style-type: none"> • Zersiedlung vermeiden • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren

Tab. 6.1: Allgemeine stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen zu Freiräume und Grünflächen.

6.2 Siedlungsräume

Der Siedlungsraum der Stadt Bremen wird nahezu vollständig von vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben, die eine hohe Kaltluftproduktion aufweisen. Die Ortsteile südlich der Lesum können in ihren Außenbereichen damit vergleichsweise gleichmäßig aus den umgebenden Flächen mit Kaltluft versorgt werden. Durchströmte Siedlungsbereiche sind in Klimafunktions- und Planungshinweiskarte durch eine diagonale blaue Schraffur gekennzeichnet. Inwieweit die Kaltluft während windschwacher Wetterlagen tatsächlich in das Stadtgebiet eindringen kann, hängt vorwiegend von der Bebauungsdichte und –struktur ab. Die bioklimatische Belastungssituation im inneren Stadtgebiet wird somit vornehmlich durch die Bebauungsstruktur geprägt. Während der südliche Teil von Bremen weitestgehend eben ist, liegen die Ortsteile nördlich der Lesum in einer leicht in Richtung der Weser abfallenden Hanglage. Dadurch kommen diese Ortsteile in den Genuss von hangabfließender Kaltluft, die ihren Ursprung in den nordöstlich gelegenen Wald- und Freiflächen hat. Die nördlichen Ortsteile sind von daher bioklimatisch begünstigt. Hier treten keine bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräume auf.

Bioklimatisch günstige Siedlungsräume weisen oftmals gerade wegen ihrer effektiven Durchströmung mit Kaltluft eine geringe Belastung auf. Weiterhin weisen diese Siedlungen häufig einen hohen Grünanteil, beispielsweise durch Gartenflächen auf und verfügen dadurch zusätzlich über kleine, lokal wirksame Ausgleichsflächen.

Bioklimatisch weniger günstige oder sogar ungünstige Siedlungsräume weisen hingegen aufgrund einer hohen Bebauungsdichte und freiflächenfernen Lage einen Durchlüftungsmangel und eine überdurchschnittliche Wärmebelastung auf. Hierbei handelt es sich um „bioklimatische Sanierungsgebiete“ die einer Verbesserung der Durchlüftung und einer Erhöhung des Grünanteils bedürfen. Die Belastungssituation in den Siedlungsräumen wird vor diesem Hintergrund zur wichtigen Grundlage für die Bewertung des Ausgleichspotenzials angrenzender Grünflächen (s. Kap 6.1). Im Umfeld von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen gelegenen Grünflächen kommt daher grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu, da sie geeignet sind, unabhängig von ihrem Kaltluftliefervermögen ausgleichend auf ihren unmittelbaren Nahbereich zu wirken.

In der Planungshinweiskarte werden zusätzlich Siedlungsflächen mit klimarelevanten Funktionen durch eine horizontale schwarze Schraffur ausgewiesen. Die so gekennzeichneten Flächen besitzen aufgrund ihrer Bauungsart und ihrer Lage eine klimatische Bedeutsamkeit für angrenzende Siedlungen. Diese „Gunstwirkungen“ beruhen auf ihrer verhältnismäßig starken nächtlichen Abkühlung oder ihrem relativ windoffenen Charakter – auf Eigenschaften also, die sich aus einem niedrigen Versiegelungsgrad und einer lockeren Bebauung mit meist geringen Gebäudehöhen ergeben. Durchgrünte Siedlungsräume können sich durch ihre niedrigeren Temperaturen positiv auf direkt angrenzende weniger günstige Siedlungskörper auswirken. Andere stadtklimatisch relevante Siedlungsbereiche liegen in Verlängerung von Leitbahnen oder gut durchströmten Bereichen der Stadt und können die Eindringtiefe von Ausgleichsströmungen in das Stadtgebiet verbessern. Innerhalb von Siedlungsflächen mit stadtklimatischer Funktion sollte die vorhandene bauliche Nutzung möglichst wenig verdichtet werden und der Grünflächenanteil erhalten bleiben.

Aus der Einordnung der Siedlungsflächen anhand ihrer bioklimatischen Situation resultieren unterschiedliche Hinweise für planerische Maßnahmen, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind. Die Auflistung der Hinweise erfolgt in etwa anhand ihrer Relevanz soweit dies für allgemein gültige Maßnahmen möglich ist.

Generell sollten weniger günstige Siedlungsflächen nicht weiter verdichtet werden und der Bestand an Grünflächen erhalten bleiben. Eine Entsiegelung von Freiflächen und Innenhöfen sollte gefördert werden, ebenso wie die Schaffung von Schattenbereichen durch Bäume. Fassaden- und Dachbegrünungen können, soweit eine ausreichende Bewässerung gewährleistet ist, tagsüber die Aufheizung der Gebäudeoberflächen vermindern. In Kapitel 6.4 sind Maßnahmen zur Verringerung der Wärmebelastung erläutert.

Bioklimatische Situation	Kriterium	Beurteilung der Empfindlichkeit	Maßnahmen
Sehr günstig und günstig  	<p>Siedlungsraum mit sehr günstigen bzw. günstigen bioklimatischen Bedingungen.</p> <p>Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit hohem Durchgrünungsgrad und meist guter Durchlüftung.</p>	<p>Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.</p> <p>Maßvolles Nachverdichten unter Beibehaltung des offenen Siedlungscharakters</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Günstiges Bioklima erhalten • Klimaaktivität der Fläche für angrenzende Siedlungsräume beachten • Bebauungsränder offenhalten oder öffnen • Bauhöhen gering halten • Baukörperstellung im Hinblick auf Kaltluftströmungen beachten • Grünflächenvernetzung zum Freiland schaffen • Hausbrandemissionen reduzieren
weniger günstig 	<p>Siedlungsstruktur mit weniger günstigen bioklimatischen Bedingungen.</p> <p>Areale mit höherer Bebauungsdichte und/oder unzureichender Durchlüftung.</p>	<p>Hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung vorhandener Durchlüftungswege • Keine weitere Verdichtung • Grünflächen sichern, optimieren und erweitern • Grün- und Freiflächen vernetzen • Versiegelung reduzieren (Richtwert < 60 %) • Entsiegelung und Begrünung der Blockinnenhöfe • Förderung von Dach- und Fassadenbegrünung • Stadtbaumbestand sichern und erweitern • Straßenbaumbestand klima- und immissionsgerecht ergänzen • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren
ungünstig 	<p>Siedlungsstruktur mit ungünstigen bioklimatischen Bedingungen.</p> <p>Sehr hoher Versiegelungs- und Überbauungsgrad mit unzureichender Durchlüftung.</p>	<p>Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung vorhandener Durchlüftungswege • Keine weitere Verdichtung • Grünflächen sichern und optimieren • Förderung kleinräumiger „Klimaoasen“ • Versiegelung reduzieren (Richtwert < 80 %) • Entsiegelung und Begrünung vorhandener Blockinnenhöfe • Förderung von Dach- und Fassadenbegrünung • Stadtbaumbestand sichern und erweitern • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren

Tab. 6.2: Allgemeine stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen zu Siedlungsräumen.

6.3 Luftaustausch

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Im Rahmen der Modellrechnungen sind die in Kapitel 5.3 aufgeführten Leitbahnen und Luftaustauschbereiche analysiert worden. Aus stadtklimatischer Sicht ist eine funktionale Sicherung der zugehörigen Flächen vordringlich.

Grün- und Freiflächen

Tabelle 6.1 (Kap. 6.1) listet die wichtigsten zugehörigen Planungshinweise im Wesentlichen in der Reihenfolge ihrer Relevanz auf: Eine Einengung des Strömungsquerschnittes insbesondere dort, wo dieser bereits weniger als 300 m beträgt, sollte unbedingt vermieden werden. In flächenhaft ausgeprägten Luftaustauschbereichen kann eine Nutzungsintensivierung unter Berücksichtigung des Strömungsgeschehens vertretbar sein. Linear ausgerichtete lokale Leitbahnen benötigen zum Erhalt ihrer Funktion eine mindestens 50 m breite, hindernisarme Durchflussbreite. Abriegelnde Bebauung im Übergangsbereich zwischen Leitbahn und Siedlung ist zu vermeiden. Dies bedeutet, dass in diesen Übergangszonen die Gebäudeausrichtung parallel zur Kaltluftströmung ausgerichtet sein sollte und durch Lücken zwischen einzelnen Gebäuden offene Zonen mit Zugang zur Leitbahn erhalten bleiben. Die Gebäudehöhen sollten möglichst niedrig gehalten werden. In diesem Zusammenhang sind ebenso dichte Baumbepflanzungen zu vermeiden, die ein Eindringen der Kaltluft in die Siedlungsbereiche behindern.

Zur Sicherung ihrer Nebenfunktion als Kaltluftentstehungsgebiete trägt eine Minimierung der Versiegelung innerhalb der Leitbahnen bei. Luftschadstoffemissionen innerhalb der Quell- und Leitbahnflächen sind wenn möglich zu vermeiden oder zu verringern.

Diese Hinweise gelten auch für lokale Kaltluftabflüsse und Flurwinde innerhalb kleinerer Grünflächen. Die stadtnahen Niederungsbereiche der Weser unterstützen als Ventilationsbahn generell die Durchlüftung der Siedlungsflächen bei unterschiedlichsten Wetterlagen und sollten daher ebenfalls möglichst offen gehalten werden.

Siedlungsbereiche

Siedlungsstrukturen, mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom, denen eine Leitbahn ähnliche Funktion innerhalb des Siedlungsraumes zugewiesen wurde, sollten nicht weiter verdichtet werden. Austauschbarrieren sind zu vermeiden.

6.4 Kleinräumige Maßnahmen zur Verringerung der Wärmebelastung

Der bioklimatischen Belastungssituation in den Nachtstunden kommt eine besondere Bedeutung zu, weil ein erholsamer Schlaf nur bei ausgewogenen thermischen Bedingungen möglich ist. Doch auch am Tage können bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen starke thermophysiologische Belastungen auftreten. Hierfür ist, neben dem generell hohen Temperaturniveau, insbesondere die Aufheizung städtischer Oberflächen durch

die Sonneneinstrahlung in Verbindung mit ihrer erhöhten Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit verantwortlich. Maßnahmen zur Reduktion dieser Aufheizung – also im allgemeinen zur Verringerung der Oberflächen- und Lufttemperatur durch verstärkte Beschattung und eine Erhöhung der kühlender Verdunstung durch Pflanzen oder unversiegelte Oberflächen – wirken sich häufig auch positiv auf die lokalen nächtlichen Bedingungen aus.

Auf die Relevanz innerstädtischer Grünflächen für die bioklimatischen Bedingungen am Tage ist bereits in Kapitel 5.1 hingewiesen worden. Die Flächengröße entsprechender bebauungsfreier Bereiche ist im Rahmen dieser Funktion zunächst von untergeordneter Bedeutung. Selbst kleine unversiegelte Plätze, begrünte Höfe (sogenannte „Pocket Parks“) und temporär genutzte Baulücken können sich als kühlere Erholungsräume eignen und die Aufenthaltsqualität im Freien tagsüber deutlich erhöhen. Ab einer Größe von etwa einem Hektar tragen Grünflächen bei günstigen Rahmenbedingungen auch zur nächtlichen Abkühlung der angrenzenden Bebauung bei. Nach Scherer (2007) können hierbei Reichweiten von bis zu 400 Metern beobachtet werden. Um die von den Flächen ausgehenden nächtlichen Flurwinde nicht zu beeinträchtigen, sollte der Übergangsbereich zur Bebauung – falls keine prioritäre Immissionsschutzwirkung gegeben ist – von Grünstrukturen wie dichten Baumgruppen, Gehölzen oder hohen Hecken weitgehend frei gehalten werden.

Zum Erhalt ihrer Funktion am Tage sollten innerstädtische Grünflächen allerdings nicht ausschließlich mit Rasen bewachsen sein, sondern Sträucher und – falls möglich – Gruppen von hochstämmigen, schatten spendenden Bäumen einbeziehen. Da Bäume einen großen Teil der Strahlung bereits im Kronenraum absorbieren, bewirken sie bei starken Einstrahlungsintensitäten eine erhebliche Abkühlung der Oberflächen- und Lufttemperatur. Vor diesem Hintergrund ist eine verstärkte Förderung von großkronigen Bäumen in dicht bebauten Siedlungsbereichen insgesamt wünschenswert. Neben öffentlichen Grünflächen, Parkplätzen und breiteren Straßenräumen betrifft dies auch Flächen, die sich in privater Verantwortung befinden (z. B. Innenhöfe und Vorgärten).

Neben diesen flächenbezogenen Eingriffen können objektbezogene Maßnahmen effektiv dazu beitragen, die Speicherung von Wärmeenergie in der Bausubstanz und damit die nächtliche Energieabgabe an die Atmosphäre oder die Innenräume zu mindern. Insbesondere bei gering gedämmten Wänden und Dächern kann das Innenraumklima in erheblichem Maße von der Oberflächentemperatur des Baukörpers beeinflusst werden. Diese wiederum wird von den Strahlungsbedingungen aber auch von der Lufttemperatur im Nahbereich des Gebäudes mitbestimmt. Die Bepflanzung (und ausreichende Bewässerung) von Dächern und Fassaden gehört daher zu den wirkungsvollsten Maßnahmen, die Energieaufnahme des Baukörpers zu reduzieren. Überdies wirken sie sich auch anderweitig in vielfältiger Form positiv auf ihr Umfeld aus (siehe z. B. DDV 2011). Neben der Dach- und Fassadenbegrünung bietet auch eine Steigerung der Sonnenlichtreflexion durch die Verwendung von hellen Farben und Baumaterialien eine wirkungsvolle Maßnahme zur Senkung der Oberflächen- und Lufttemperatur.

7. Zusammenfassung

Die Freie Hansestadt Bremen stellt derzeit das Landschaftsprogramm für das Stadtgebiet Bremen neu auf. Vor diesem Hintergrund soll eine aktuelle, gesamtstädtische Klimaanalyse erarbeitet werden, aus der Handlungsleitfäden für zukünftige Planungen abgeleitet werden können. Die GEO-NET Umweltconsulting GmbH wurde von der Freien Hansestadt Bremen beauftragt, eine gesamtstädtische klimaökologische- und lufthygienische Analyse auf Basis von Modellrechnungen zu erarbeiten.

Die klimatische Situation in der Hansestadt Bremen ist durch ihre Lage in einem maritim geprägten Bereich, mit vergleichsweise kühlen Sommern und milden Wintern geprägt. Das langjährige Mittel der Lufttemperatur beträgt an der Station Bremen-Flughafen 9 °C. In den letzten 20 Jahren wurden in 18 Jahren sommerliche Temperaturmaxima von 30 °C und höher registriert. Im Sommer 1992 wurden mit einem Maximum von 37,6 °C die höchsten Temperaturen erreicht. Die jährliche Niederschlagssumme beträgt im Durchschnitt etwa 700 mm, wobei innerhalb des Stadtgebietes deutliche Inhomogenitäten zu beobachten sind. In den letzten 20 Jahren wurden an der Station Bremen-Flughafen 4 Starkregenereignisse registriert, an denen an einem Tag mehr als 75% der monatlichen Niederschlagssumme gemessen wurden. Die Windgeschwindigkeit im Bereich Bremen-Flughafen beträgt durchschnittlich 4,1 m/s. Sie liegt damit auf einem für viele deutsche Städte vergleichsweise hohen Niveau, das grundsätzlich gute Voraussetzungen für eine ausreichende Durchlüftung des Stadtgebietes vorgibt. Die für die Region typischen Westwindlagen sind in Bremen nicht mit bioklimatischen Belastungen verbunden. In unseren Breiten führen sommerliche austauscharme Hochdruckwetterlagen zu den ungünstigsten bioklimatischen Situationen.

Grundlage für die Beurteilung der stadtklimatischen Situation ist die Analyse des klimatischen Ist-Zustandes im Stadtgebiet während einer austauscharmen sommerlichen Hochdrucklage. Die Klimafunktionskarte fasst als erstes Teilergebnis dieser Untersuchung die klimaökologisch relevanten Strukturen zusammen, die für das Stadtgebiet von Bremen auf Grundlage von Modellsimulationen ermittelt wurden:

Durch die Zufuhr von frischer und kühlerer Luft können Grün- und Freiflächen klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistungen für städtische Belastungsräume erbringen. Im Rahmen der Klimaanalyse sind bioklimatisch belastete Siedlungsräume einerseits sowie entlastende, Kaltluft produzierende Flächen andererseits ausgewiesen worden. Eine qualitative Bewertung der Klimaparameter erfolgt in Anlehnung an die VDI Richtlinie 3785 Blatt 1 anhand der Abweichungen der Einzelwerte von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsgebiet. Eine Flächenbilanzierung der ermittelten bioklimatischen Belastungsklassen der Siedlungsflächen in Bremen ergibt:

- 5 % der Siedlungsfläche sind als bioklimatisch ungünstig einzuordnen,
- 29 % sind weniger günstig,
- 60 % weisen günstige bioklimatische Bedingungen auf,
- 6 % des Siedlungsraumes können als sehr günstig eingestuft werden.

Das klimatische Ausgleichspotenzial der umgebenden Freiflächen ist insgesamt als hoch anzusehen.

Die Planungshinweiskarte Stadtklima stellt eine integrierende Bewertung der in der Klimafunktionskarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Fragestellungen dar. Aus ihr lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur stadtklimatischen Situation ableiten oder auch Auswirkungen von Nutzungsänderungen bewerten:

Basierend auf den Empfindlichkeiten von Siedlungsbereichen einerseits und Kaltluft produzierenden Freiflächen andererseits lassen sich planungsbezogene Aussagen treffen. Den Bewertungsklassen der Grün- und Siedlungsflächen sind daher Hinweise zugeordnet, die im Falle einer geplanten Nutzungsänderung beachtet werden sollten. Aufgrund ihrer wichtigen lokalklimatischen Funktionen sowie der Rolle im Stadtökosystem insgesamt sollte die Überbauung von Grünflächen grundsätzlich vermieden werden. Sind dennoch konkrete Eingriffe vorgesehen, können auf Basis der Planungshinweise entsprechende zu berücksichtigende Maßnahmen aus der jeweiligen Empfindlichkeit im Plangebiet abgeleitet werden; gleiches gilt für die Siedlungsflächen.

Mit der durchgeführten Analyse der klimaökologischen Funktionen stehen flächendeckend aktuelle Informationen zu dem Schutzgut Klima für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen zur Verfügung. Damit wird eine fundierte stadtklimatische Ersteinschätzung von Planungsvorhaben ermöglicht, die anschließend auch in Detailplanungen von Flächennutzungsänderungen einfließen kann.

Vor dem Hintergrund des stadtplanerischen Ziels der Innenentwicklung für die aktuelle Neuaufstellung des Flächennutzungsplanes, wie auch in Hinblick auf die auch für Bremen zu erwartenden Erhöhung der Wärmebelastung durch den Klimawandel, kommt der Berücksichtigung stadtklimatischer Zusammenhänge bei der zukünftigen Stadtplanung eine besondere Bedeutung zu.

Literatur

- DDV (2011): Dachbegrünung für Kommunen, Nutzen – Fördermöglichkeiten – Praxisbeispiele. Deutscher Dachgärtner Verband e. V. / Hafencity Universität Hamburg / Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz GALK e.V.Eigenverlag, Nürtingen
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2013): Untersuchung zur Entwicklung der Anzahl der Sommertage und der Tropennächte in der freien Hansestadt Bremen von 1972 bis 2100., Hamburg.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2012): Klimadaten- online, www.dwd.de.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (1983): Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland - Bremen, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr.164, Offenbach.
- FANGER, P.O. (1972): Thermal comfort. Analysis and application in environment engineering. – New York, 244 S.
- 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. Zeitschr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- SCHERER, D. (2007): Viele kleine Parks verbessern Stadtklima. Mit Stadtplanung Klima optimieren. In: TASPO Report. Die Grüne Stadt. Oktober 2007.
- UBA (2010): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 3.1/Februar 2010. INFRAS AG, Bern Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt), Berlin.
- VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (2008), Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Beuth Verlag, Berlin.
- VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (1997), Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Beuth Verlag, Berlin.

Glossar

Ausgleichsraum: Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Fläche die an einen Wirkungsraum angrenzt oder mit diesem über eine Leitbahn verbunden ist.

Autochthone Wetterlage: Eigenbürtige Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflussfaktoren bestimmte Wetterlage. Solche Wettersituationen entstehen bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung geprägt. Durch lokale Temperaturunterschiede entstehen Ausgleichsströmungen.

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

Bioklima: Beschreibt die Einflüsse von Wetter und Klima (atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf lebende Organismen und insbesondere den Menschen.

DTV: (Daily traffic value:) Durchschnittliche Anzahl von Kraftfahrzeugen die täglich einen Straßenabschnitt passieren.

Eigenbürtige Wetterlage: s. autochthone Wetterlage

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 in das Zentrum der Überwärmung (meist Innenstadt oder Ortsteilzentrum) ein.

Geostrophischer Wind: Höhenwind

Gunsträume: Klimatisch günstige Siedlungsräume: häufig locker bebaute und durchgrünte Siedlungen mit einem geringen Versiegelungsgrad, hohem Vegetationsanteil und relativ hoher nächtlicher Abkühlungsrate. Diese Areale sind zu einem gewissen Maße selbst Kaltluftproduzenten und unterstützen die Kaltluftströmung benachbarter Freiflächen. Diese Gebiete führen weder zu einer intensiven bioklimatischen Belastung noch zu Beeinträchtigungen des Luftaustausches. Für die Bewertung des Bioklimas werden diese Räume in Anlehnung an die VDI Richtlinie 3785 den Klassen „nicht belastet (sehr günstig)“ oder „gering belastet (günstig)“ zugewiesen (s. auch Kapitel 7.1 Abschnitt Siedlungsräume).

humanbiometeorologische Belastung: Belastung der Gesundheit und des Wohlbefindens des Menschen durch meteorologische Einflüsse.

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. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.
- K, Kelvin:** Abkürzung für die Einheit Kelvin, in der üblicherweise Temperaturdifferenzen angegeben werden. Ein Kelvin entspricht einer Temperaturdifferenz von 1 °C.
- Kaltlufteinzugsgebiet:** Zusammenfassung aller Kaltluft produzierenden Flächen, die einem Kaltluftabfluss oder Flurwind zugeordnet werden können.
- 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 Klimatelementen 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...).
- Komfortinsel:** Vielfältig strukturiert Vegetationsflächen in Wirkungsräumen mit günstigen klimatischen und lufthygienischen Bedingungen (z.B. kleine Parkanlage), s. auch Komfortraum.
- Komfortraum:** Bewachsene Freifläche, z.T. vielfältig strukturiert, mit günstigen bioklimatischen und lufthygienischen Bedingungen, in Nachbarschaft zum Wirkungsraum.
- Leitbahnen:** Mehr oder weniger linear ausgerichtete Freiflächen mit geringer Rauigkeit, die den lokalen bodennahen Luftaustausch (vor allem die Zufuhr von Kaltluft) fördern. Die Eigenschaften einer Leitbahn bestimmen letztlich, in welchem Umfang Ausgleichsleistungen von einem Ausgleichs- zum Wirkungsraum erbracht werden können.
- Lufthygienische Belastung:** Belastung der Luft durch Schadstoffe.
- Orographie:** Die Orographie beschreibt die Höhenstrukturen der natürlichen Erdoberfläche. Über die Orographie wird der Einfluss des Geländes auf das lokale Wettergeschehen berücksichtigt.
- 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.
- Strahlungsnacht:** Wolkenlose windschwache Nacht mit ungehinderter Ausstrahlung, s. auch Strahlungswetterlage.
- Strahlungswetterlage:** Wetterlage mit geringen großräumigen Windströmungen und ungehinderten Ein- und Austrahlungsbedingungen. Für diese Wetterlagen sind eine geringe Bewölkung sowie eine mittlere Windgeschwindigkeit von weniger als 1,5 m/s typisch, die meteorologische Situation in Bodennähe wird dann vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt geprägt.
- Ungunsträume:** Klimatisch belastete Siedlungsräume, die einen Durchlüftungsmangel und eine für die Region überdurchschnittliche Wärmebelastung aufweisen. Hierbei werden Siedlungsräume mit den Bewertungskategorien „mäßig belastet (weniger günstig)“ sowie „belastet (ungünstig)“ unterschieden. Unter Berücksichtigung des Belastungsniveaus ergibt sich für diese Räume eine hohe bzw. sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung.

Ventilationsbahn: Leitbahn, die während austauschstärkerer Wetterbedingungen 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: Städtischer Lebensraum, der gegenüber der Umgebung vor allem abends und nachts eine höhere Lufttemperatur aufweist. Es bilden sich i.d.R. mehrkernige Wärmeinseln in einer Stadt aus. Die Jahresmitteltemperaturen sind in diesen Räumen um 0,5 bis 1,5 Kelvin gegenüber dem Umland erhöht.

Wirkungsraum: Siedlungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete ist und an einen oder mehrere Ausgleichsräume angrenzt oder über Leitbahnen an solche angebunden ist. Die Zufuhr von Kaltluft aus einem Ausgleichsraum kann zu einer Verminderung der Belastung beitragen.

Zyklonale Wetterlage: Durch Tiefdruckgebiete geprägte Wetterlagen, die häufig mit Wind und Niederschlägen einher gehen.

Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen

Klimaökologische Funktionen

Legende:

Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstrom

- Sehr gering
- Gering
- Mittel
- Hoch

Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion



Siedlungsräume

bioklimatische Situation

- Sehr günstig
- Günstig
- Weniger günstig
- Ungünstig

Siedlungsflächen im Einwirkungsbereich der Kaltluftströmung



Siedlungsflächen mit relevantem Luftaustausch

Siedlungsräume mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom, die ungünstige Siedlungsräume mit Freiflächen verbinden.

Luftaustausch

- Kaltluftströmung mit übergeordneter Bedeutung
- Kaltluftströmung mit übergeordneter Bedeutung - lufthygienisch belastet
- Kaltluftströmung mit lokaler Bedeutung
- Kaltluftströmung mit lokaler Bedeutung - lufthygienisch belastet

weitere Nutzungsstrukturen

- Straßen oder asphaltierte Flächen
- Schienerverkehrsflächen
- Gewässer
- Höhenlinie 5 m

Maßstab 1 : 40.000



Auftraggeber:

Der Senator für Umwelt,
Bau, Verkehr und Europa

Freie
Hansestadt
Bremen

Auftragnehmer:

G E O
N E T
Umweltconsulting GmbH

Freie Hansestadt Bremen
Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Ansgaritorstraße 2
28195 Bremen

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5 a
30161 Hannover
Internet: www.geo-net.de

Hannover, Juli 2013

Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen

Planungshinweise Stadtklima

Legende:

Ausgleichsräume

Grün- und Freiflächen

- geringe bioklimatische Bedeutung
Freiflächen mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete. Geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung.
- mittlere bioklimatische Bedeutung
Freiflächen mit mittlerem Einfluss auf Siedlungsgebiete. Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßvolle Bebauung, die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, ist möglich.
- hohe bioklimatische Bedeutung
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Luftaustausch mit der Umgebung erhalten. Bei Eingriffen Baukörperstellung beachten sowie Bauhöhen möglichst gering halten.
- sehr hohe bioklimatische Bedeutung
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen, Emissionen reduzieren.
- Flächen mit sehr hoher Kaltluftproduktion

Wirkungsräume

Siedlungsflächen

- sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung. Sehr günstiges Bioklima erhalten. Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Baukörperstellung beachten, Bauhöhen möglichst gering halten.
- günstige bioklimatische Situation**
Siedlungsstruktur mit geringer bioklimatischer Belastung und günstigen Bedingungen. Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Baukörperstellung beachten, Bauhöhen möglichst gering halten.
- weniger günstige bioklimatische Situation**
Siedlungsräume mit mäßiger bioklimatischer Belastung. Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Möglichst keine weitere Verdichtung, Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils, Erhalt aller Freiflächen, Entseelung und ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen.
- ungünstige bioklimatische Situation**
Siedlungsräume mit hoher bioklimatischer Belastung. Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine weitere Verdichtung, Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils, Erhalt aller Freiflächen, Entseelung und ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen.
- Einwirkungsbereich der Kaltluftströmung innerhalb der Bebauung**
- Siedlungsflächen mit klimarelevanter Funktion**
- Bebaute Gebiete mit Kaltlufttransport in Richtung ungünstiger Siedlungsbereiche oder mit günstiger Wirkung für angrenzende belastete Siedlungsräume. Möglichst keine weitere relevante Verdichtung.**
- Siedlungsräume mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom, die ungünstige Siedlungsräume mit Freiflächen verbinden. Keine Verdichtung und Vermeiden von Austauschbarrieren.**

Luftaustausch

Kaltluftleitbahnen

- übergeordnete Leitbahn**
- lufthygienisch belastet / unbelastet**
Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen. Transport größerer Kaltluftmassen über durchweg weitere Strecken. Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Bauhöhe möglichst gering halten, Neubauten längs zur Leitbahn ausrichten, Randbebauung oder dichte Baumbepflanzungen möglichst vermeiden. Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.
- lokale Leitbahn**
- lufthygienisch belastet / unbelastet**
Lokaler Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten oder übergeordneten Leitbahnbereichen und angrenzenden Siedlungsräumen. Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Bauhöhe möglichst gering halten, Neubauten längs zur Leitbahn ausrichten, Randbebauung möglichst vermeiden. Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.

weitere Nutzungsstrukturen

- Straßen oder asphaltierte Flächen
- Schienenverkehrsflächen
- Gewässer
- Höhenlinie 5 m



Auftraggeber: **Der Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa**
Freie Hansestadt Bremen
Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Ansgaritorstraße 2
28195 Bremen

Auftragnehmer: **GEO-NET**
GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahistraße 5 a
30181 Hannover
Internet: www.geo-net.de

Hannover, Juli 2013

