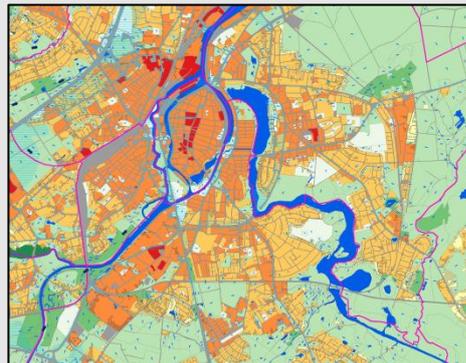
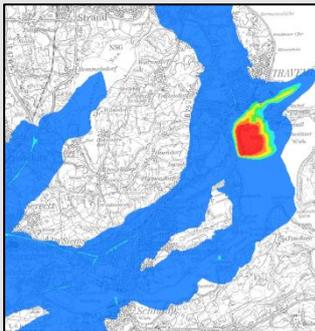
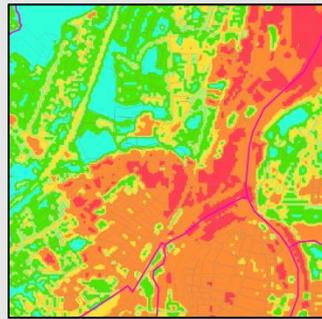
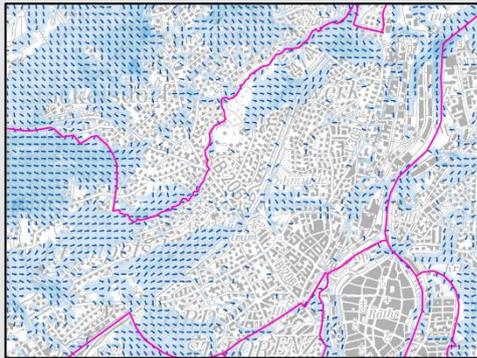


# Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Lübeck

## Phase 2: Klimafunktionskarte



Auftraggeber:

Hansestadt LÜBECK



Bereich Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz; Umweltvorsorge und Stadtklima

Kronsfordter Allee 2-6

23539 Lübeck



**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**

Große Pfahlstraße 5a  
30161 Hannover

Tel. (0511) 3887200  
FAX (0511) 3887201

[www.geo-net.de](http://www.geo-net.de)

In Zusammenarbeit mit: Prof. Dr. G. Groß  
Anerkannt beratender Meteorologe (DMG),  
Öffentlich bestellter Gutachter für Immissionsfragen und  
Kleinklima der IHK Hannover-Hildesheim

Hannover, Oktober 2014

## Inhaltsverzeichnis

	Seite:
<b>1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Die klimatische Situation in Lübeck.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Das Klima heute .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Die Entwicklung des Klimas in Lübeck.....</b>	<b>13</b>
<b>3 Methodik und Datengrundlagen für die Erstellung einer Klimafunktionskarte .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Eingangsdaten.....</b>	<b>17</b>
3.1.1 Geländehöhe .....	17
3.1.2 Nutzungsstruktur.....	19
3.1.3 Straßenverkehr und Schiffsemissionen .....	21
<b>3.2 Methodik der Modellrechnung.....</b>	<b>24</b>
3.2.1 Das mesoskalige Klimamodell FITNAH.....	24
3.2.2 Meteorologische Rahmenbedingungen für die Modellberechnung Kaltlufthaushalt .....	27
3.2.3 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung .....	28
<b>3.3 Methodik der Bewertung der klimaökologischen Nutzungsstrukturen .....</b>	<b>30</b>
3.3.1 Grün- und Freiflächen .....	31
3.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen.....	32
3.3.3 Kaltluftleitbahnen .....	33
<b>4 Ergebnisse der Modellrechnung .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Das bodennahe Lufttemperaturfeld .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Kaltluftproduktionsrate und Kaltluftentstehungsgebiete.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Das nächtliche Strömungsfeld .....</b>	<b>39</b>
<b>4.4 Kaltluftvolumenstrom .....</b>	<b>43</b>
<b>4.5 Lufthygienische Belastung im Untersuchungsgebiet .....</b>	<b>46</b>
<b>5 Klimafunktionskarte .....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Grün- und Freiflächen .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2 Siedlungsräume .....</b>	<b>53</b>
<b>5.3 Luftaustausch.....</b>	<b>57</b>
<b>6 Zusammenfassung Klimafunktionskarte .....</b>	<b>60</b>
<b>Glossar.....</b>	<b>61</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>64</b>

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1:</b> Klimadiagramm Lübeck-Blankensee (Zeitraum 1981-2010).....	6
<b>Abb. 2.2:</b> Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen in Lübeck im Zeitraum 1985 bis 2012 .....	7
<b>Abb. 2.3:</b> Lage der verschiedenen Klimastationen in Lübeck .....	8
<b>Abb. 2.4:</b> Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen in Lübeck an verschiedenen Wetterstationen von 1890 bis 2013 .....	9
<b>Abb. 2.5:</b> Sommertage in Lübeck von 1890 bis 2013 .....	10
<b>Abb. 2.6:</b> Hitzetage in Lübeck von 1890 bis 2013 .....	10
<b>Abb. 2.7:</b> Tropennächte in Lübeck 1890 bis 2013.....	11
<b>Abb. 2.8:</b> Prinzipskizze Flurwinde .....	12
<b>Abb. 2.9:</b> Jahresdurchschnittstemperatur in Lübeck 1890 bis 2010 (Messwerte und Simulation durch WETTREG 2010) .....	13
<b>Abb. 2.10:</b> Jahresdurchschnittstemperatur Lübeck-Travemünde, Betrachtungszeitraum 2014 – 2100 .....	14
<b>Abb. 2.11:</b> Anzahl der Hitzetage pro Jahr in Lübeck-Travemünde, Betrachtungszeitraum 2014 bis 2100 .....	15
<b>Abb. 2.12:</b> Durchschnittliche Anzahl von Hitzewellen pro Jahr Lübeck-Travemünde, Betrachtungszeitraum 2014 – 2100 .....	16
<b>Abb. 3.1:</b> Eingangsdaten für die Modellrechnung .....	17
<b>Abb. 3.2:</b> Geländehöhe im Untersuchungsraum .....	18
<b>Abb. 3.3:</b> Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet.....	20
<b>Abb. 3.4:</b> Verkehrsmengen in der Nacht und Schiffsrouten in Lübeck (Quellen siehe Text).....	22
<b>Abb. 3.5:</b> Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 125 m x 125 m) bei einem digitalen Geländehöhenmodell.....	25
<b>Abb. 3.6:</b> Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit.....	26
<b>Abb. 3.7:</b> Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle .....	27
<b>Abb. 3.8:</b> Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen .....	28
<b>Abb. 3.9:</b> Emissionsdichten von NO <sub>x</sub> in Gramm pro Meter und Stunde.....	29
<b>Abb. 3.10:</b> Schematische Darstellung des Bewertungsschemas für z-transformierte Parameter .....	31
<b>Abb. 3.11:</b> Prinzipskizze einer Kaltluftleitbahn .....	33
<b>Abb. 4.1:</b> Bodennahe Temperaturen in °C für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens im Untersuchungsgebiet Lübeck .....	36
<b>Abb. 4.2:</b> Detail-Ausschnitt: Temperaturverteilung Lübeck-Mitte/-West.....	37
<b>Abb. 4.3:</b> Kaltluftproduktionsrate im Untersuchungsgebiet Lübeck.....	39
<b>Abb. 4.4:</b> Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet Lübeck.....	41
<b>Abb. 4.5:</b> Windgeschwindigkeiten und Strömungsfeld im Vertiefungsraum Lübeck-Mitte/-West .....	42
<b>Abb. 4.6:</b> Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom .....	43
<b>Abb. 4.7:</b> Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens im Untersuchungsgebiet Lübeck .....	45
<b>Abb. 4.8:</b> Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens in Lübeck-Mitte/-West .....	46
<b>Abb. 4.9:</b> Konzentration von NO <sub>x</sub> im Untersuchungsgebiet während einer autochthonen Wetterlage.....	47
<b>Abb. 4.10:</b> Konzentration von PM <sub>10</sub> im Untersuchungsgebiet während einer autochthonen Wetterlage .....	49
<b>Abb. 5.1:</b> Ausschnitt Klimafunktionskarte.....	53

<b>Abb. 5.2:</b> Bioklimatische Situation der Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet und Stadtgebiet von Lübeck .....	54
<b>Abb. 5.3:</b> Ausschnitt der Klimafunktionskarte Lübeck-Mitte .....	55
<b>Abb. 5.4:</b> Bilanz der bioklimatischen Situation der unterschiedlichen Siedlungstypen im Untersuchungsgebiet .....	56
<b>Abb. 5.5:</b> Ausschnitt Klimafunktionskarte Lübeck: Leitbahnen .....	57

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 3.1</b> Nutzungskategorien der Klimamodellierung mit Kennwerten zur Strukturhöhe und zum Versiegelungsgrad der einzelnen Nutzungsklassen.....	21
<b>Tab. 3.2:</b> Bewertung der Kaltluftlieferung in der Klimafunktionskarte .....	31
<b>Tab. 3.3:</b> Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Klimafunktionskarte und dafür typische Siedlungsstrukturen .....	32
<b>Tab. 5.1:</b> Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grün- und Freiflächen im Untersuchungsgebiet und im Stadtgebiet Lübeck.....	51
<b>Tab. 5.2:</b> Leitbahnen in Lübeck.....	58

## 1 Aufgabenstellung

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

Gemäß VDI-RL 3787 Bl. 1 (VDI 2014) ist die Konzeption von Klimaanalysekarten in aufeinander aufbauenden thematischen Schritten durchzuführen. Der erste grundlegende dieser Schritte ist die Klimatopausweisung, das heißt die Einordnung und Abgrenzung von Gebieten mit ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen auf Grundlage von Landnutzungsfachdaten. Der zweite Schritt ist die Erstellung einer Klimafunktionskarte mit Hilfe einer Modellierung des Klimas, um siedlungsklimatische Zusammenhänge und auch das nächtliche Strömungsfeld beurteilen zu können.

Im Auftrag der Hansestadt Lübeck wurden vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine Klimatopkarte und eine Klimafunktionskarte erstellt. Dieser Teil des Berichts behandelt die Phase 2: die Erstellung und Beurteilung der Klimafunktionskarte.

In Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) wurde eine Klimaanalyse unter Einbezug der klimatischen Rahmenbedingungen erstellt, die detailliert Aufschluss über die klimaökologischen Funktionen im Stadtgebiet Lübecks gibt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einhergehen. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grün- und Freiflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.

Auf Basis von Modellsimulationen mit dem Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) kann eine umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Stadtgebiet von Lübeck erstellt werden. Die Untersuchungen haben zum Ziel, die unterschiedlichen Teilflächen der Stadt Lübeck nach ihren klimatischen Funktionen, d.h. ihrer Wirkungen auf andere Räume, abzugrenzen und die klimaökologisch wichtigen Raumstrukturen herauszuarbeiten.

### Analyse der stadtklimatischen Zusammenhänge

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

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

- bioklimatisch belastete Siedlungsräume (*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 Grün- oder Freiflächen (*Kaltluftleitbahnen*) beide miteinander verbinden.

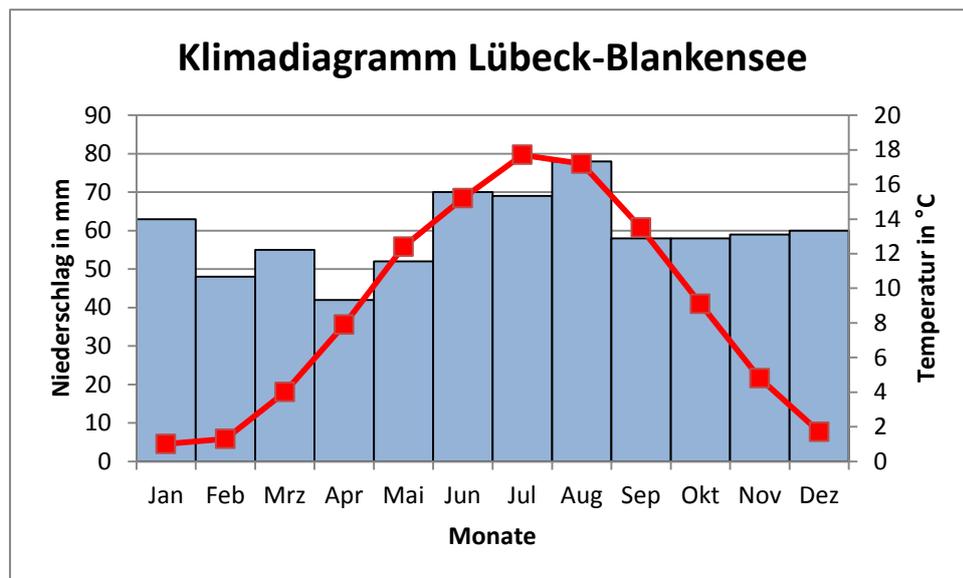
Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges in Form einer Klimafunktionskarte.

.

## 2 Die klimatische Situation in Lübeck

### 2.1 Das Klima heute

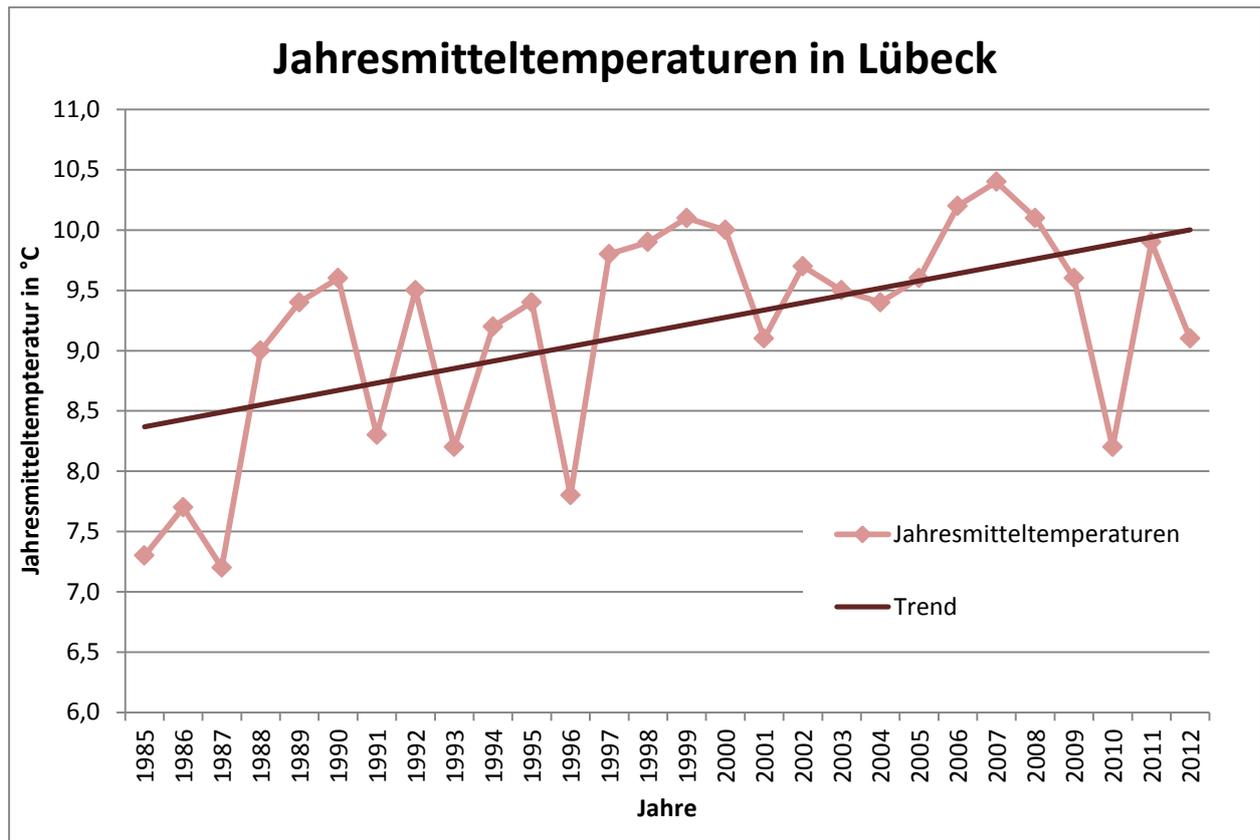
Lübeck ist eine Hansestadt im Südosten Schleswig-Holsteins an der Ostsee gelegen. Das Klima in Lübeck ist vor allem durch die Nähe zum Meer geprägt und weist daher maritime Einflüsse auf. Nach der Klimaklassifikation von Köppen-Geiger zählt Schleswig-Holstein einschließlich Lübeck insgesamt zum warm gemäßigten Regenlima (Cfb-Klima), bei dem die mittlere Lufttemperatur des wärmsten Monats unter 22 °C und die des kältesten Monats über -3 °C bleibt. In Lübeck beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur im langjährigen Mittel (1981-2010) 8,8 °C. Beim Niederschlag ist für den gleichen Zeitraum ein langjähriges Mittel von 712 mm zu verzeichnen. Abb. 2.1 zeigt für die Klimastation Lübeck-Blankensee durchschnittliche Monatsmittelwerte von Niederschlag (in mm) und Lufttemperatur (in °C) für den Zeitraum 1981 bis 2010, die einen charakteristischen Verlauf für diese Klimazone aufweisen. Die Lage der Messstation ist außerhalb des verdichteten Stadtgebiets Lübecks in der Nähe des Flughafens. Das Klimadiagramm repräsentiert daher eher die Klimatypologie des Umlands.



**Abb. 2.1:** Klimadiagramm Lübeck-Blankensee (Zeitraum 1981-2010)

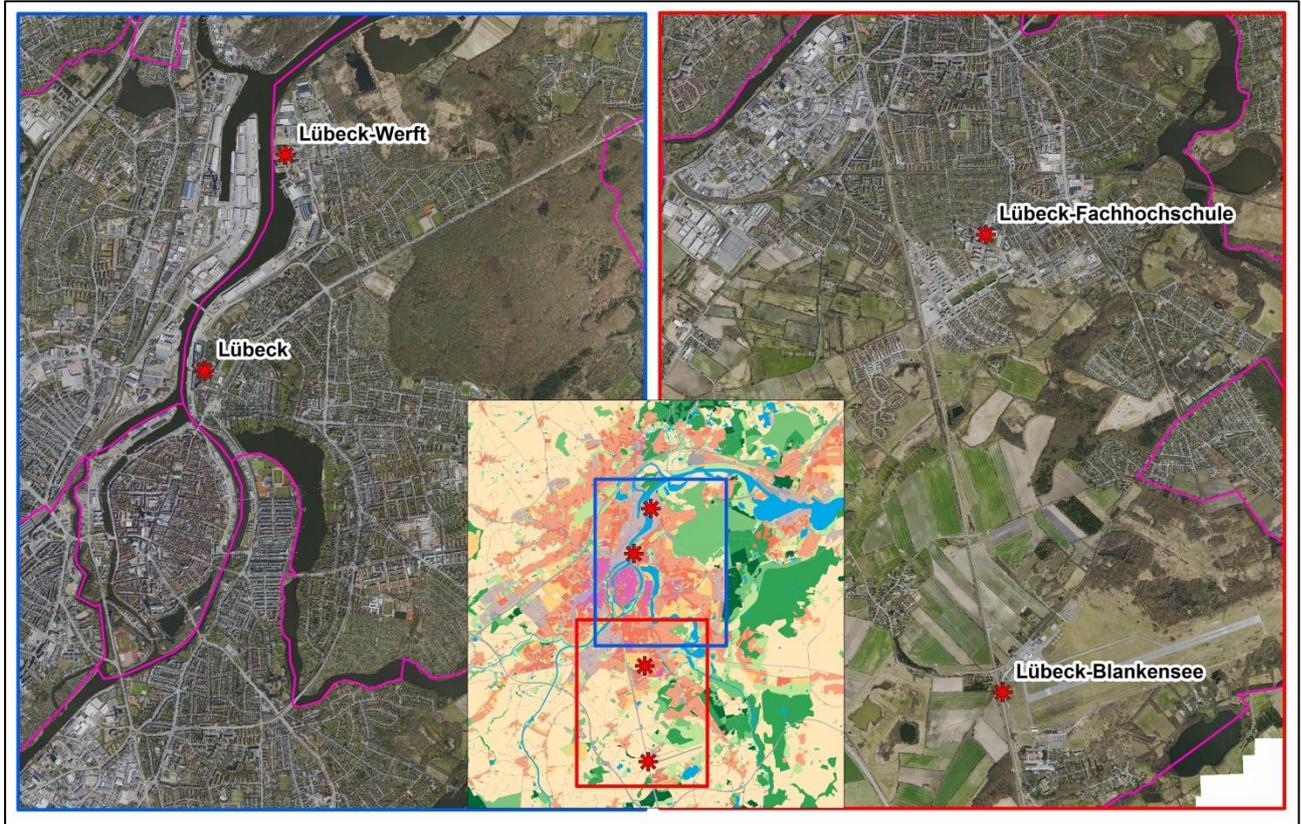
Monatsmittelwerte der Niederschlagsmengen in mm (blaue Balken) und der Lufttemperatur in °C (rote Kurve). (Datengrundlage: DWD, [www.dwd.de](http://www.dwd.de))

Die Fachhochschule Lübeck betreibt auf ihrem Campus eine Wetterstation. Im Internet stehen langjährige Datenreihen zur Verfügung. Abb. 2.2 zeigt die Jahresmitteltemperaturen für den Zeitraum 1985 bis 2012. Dargestellt ist außerdem eine Trendlinie, die verdeutlicht, dass tendenziell ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur in Lübeck beobachtet werden kann. Der Anstiegstrend beträgt 0,06 °C pro Jahr, wobei die höchste Jahresmitteltemperatur mit 10,4 °C im Jahr 2007 gemessen wurde. Die niedrigste ermittelte Jahresmitteltemperatur stammt aus dem Jahr 1987 und beträgt 7,2 °C.



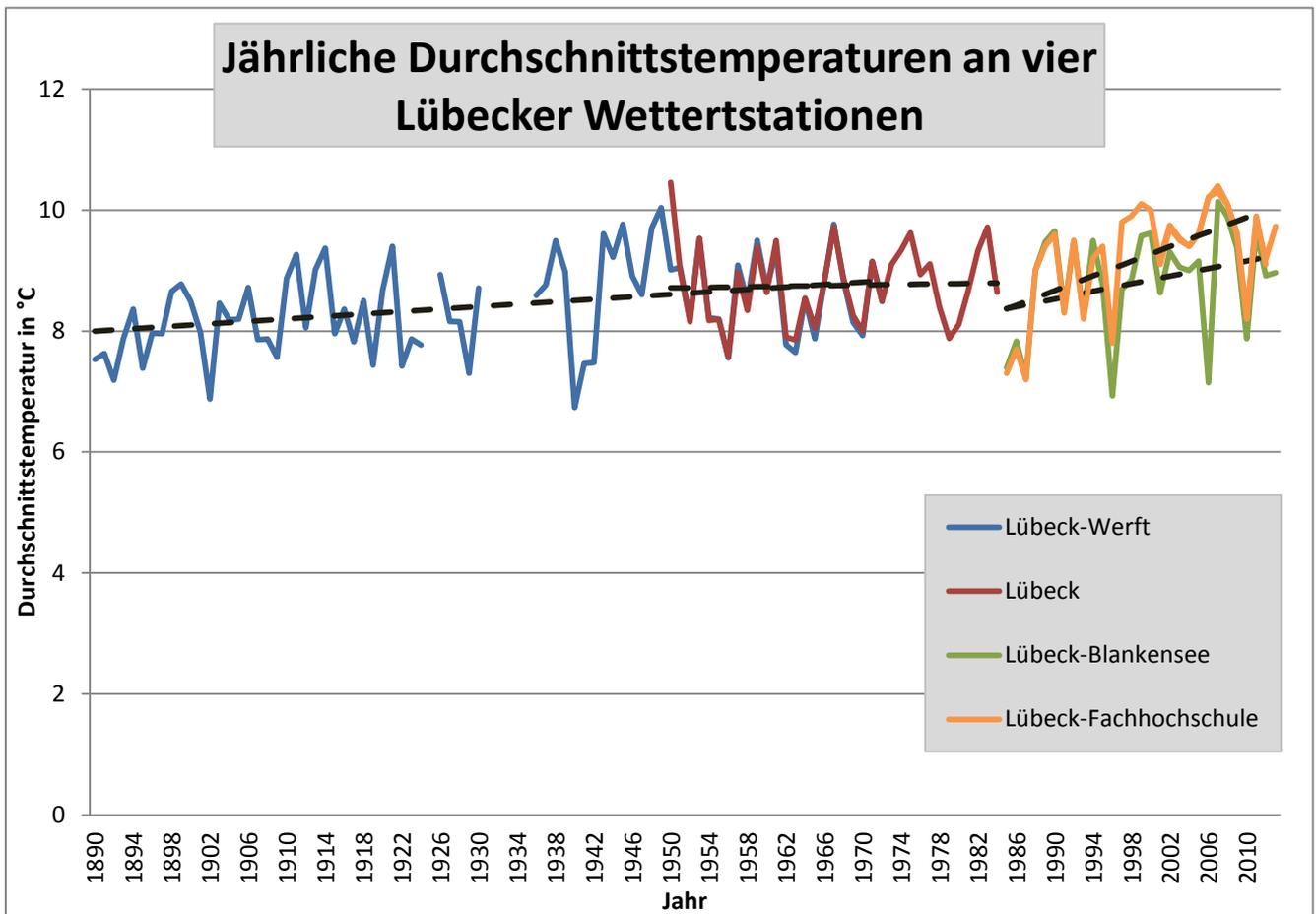
**Abb. 2.2:** Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen in Lübeck im Zeitraum 1985 bis 2012  
 (Datengrundlage: Fachhochschule Lübeck, <http://wetter.fh-luebeck.de/wstats/temdat.htm>)

Der DWD stellt auf seiner Homepage weitere Klimadaten aus Lübeck zur Verfügung. Diese Daten reichen bis ins Jahr 1890 zurück und sind an verschiedenen Orten in Lübeck erhoben worden. Abb. 2.3 zeigt die Lage der verschiedenen Klimastationen im Stadtgebiet. Die älteste der Stationen ist Lübeck-Werft. Sie liegt in direkter Hafennähe und lieferte Wetterdaten von 1890 bis 1972. Ab 1950 bereits gab es eine weitere Wetterstation in Lübeck. Sie lag recht zentral etwas oberhalb der Lübecker Altstadt und war bis 1984 in Benutzung. Seit 1985 ist die Wetterstation Lübeck-Blankensee des Deutschen Wetterdienstes am Lübecker Flughafen im Süden der Stadt in Betrieb. Diese Wetterstation liefert auch aktuell Wetterdaten für Lübeck, auf Grund ihrer Lage im Umland kann sie allerdings nicht das typische Stadtklima einer Großstadt repräsentieren. Darüber hinaus wird eine private Station am Standort der Fachhochschule Lübeck im Stadtteil St. Jürgen betrieben. Diese Daten wurden vom Fachbereich Angewandte Naturwissenschaften der Fachhochschule Lübeck zur Verfügung gestellt.



**Abb. 2.3:** Lage der verschiedenen Klimastationen in Lübeck

In Abb. 2.4 sind die gemessenen Jahresmitteltemperaturen der verschiedenen Stationen in Lübeck für den Zeitraum 1890 bis 2013 dargestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Lage der verschiedenen Standorte und den abweichenden Zeiträumen, in denen gemessen wurde, ist eine direkte Vergleichbarkeit der Werte schwierig. Dennoch kann diese lange Zeitreihe einen Eindruck über die Entwicklung des Klimas in Lübeck vermitteln. Die Trendlinien der einzelnen Zeitreihen zeigen deutlich das seit 1890 die Jahresmitteltemperaturen in Lübeck kontinuierlich ansteigen. Der Anstieg ist insbesondere in den letzten 30 Jahren besonders deutlich zu erkennen. (Standort Lübeck-Blankensee und Lübeck-Fachhochschule). Da diese beiden Stationen Werte für den gleichen Zeitraum liefern sind sie zudem direkt vergleichbar. Allerdings ist die Station Lübeck-Fachhochschule keine offizielle Wetterstation des DWD und daher nicht durch diesen geprüft. Die leicht höheren Werte der Station Fachhochschule können durch die unterschiedliche Lage der beiden Stationen erklärt werden. Da die Wetterstation der Fachhochschule in einem dichter bebauten Gebiet liegt, weist sie insgesamt leicht höhere Werte auf, die auf stadtklimatische Effekte hinweisen.



**Abb. 2.4:** Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen in Lübeck an verschiedenen Wetterstationen von 1890 bis 2013 (Datengrundlage: Lübeck Wert, Lübeck, Lübeck-Blankensee: DWD, [www.dwd.de](http://www.dwd.de); Lübeck Fachhochschule: Fachhochschule Lübeck)

Abb. 2.5 zeigt die Entwicklung von Sommertagen für die Hansestadt Lübeck, welche als Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C definiert sind. Auch hier sind die Daten für verschiedene Zeiträume an mehreren Orten (Abb. 2.3) ermittelt worden.

Auch bei den Sommertagen in Lübeck ist ein steigender Trend zu beobachten. Lediglich die Daten der Fachhochschule zeigen im letzten Zeitraum ein Absinken der Werte. Der Zeitraum der betrachteten Werte ist recht kurz, aber auch in den Daten der Station Blankensee ist ein leichtes Absinken in den letzten Jahren zu erkennen. Es überwiegt allerdings der positive Trend der langfristig steigenden Werte. Unter dem Einfluss des sich bereits jetzt abzeichnenden Klimawandels wird zukünftig ein Ansteigen der Häufigkeit von Sommertagen in Lübeck zu erwarten sein.

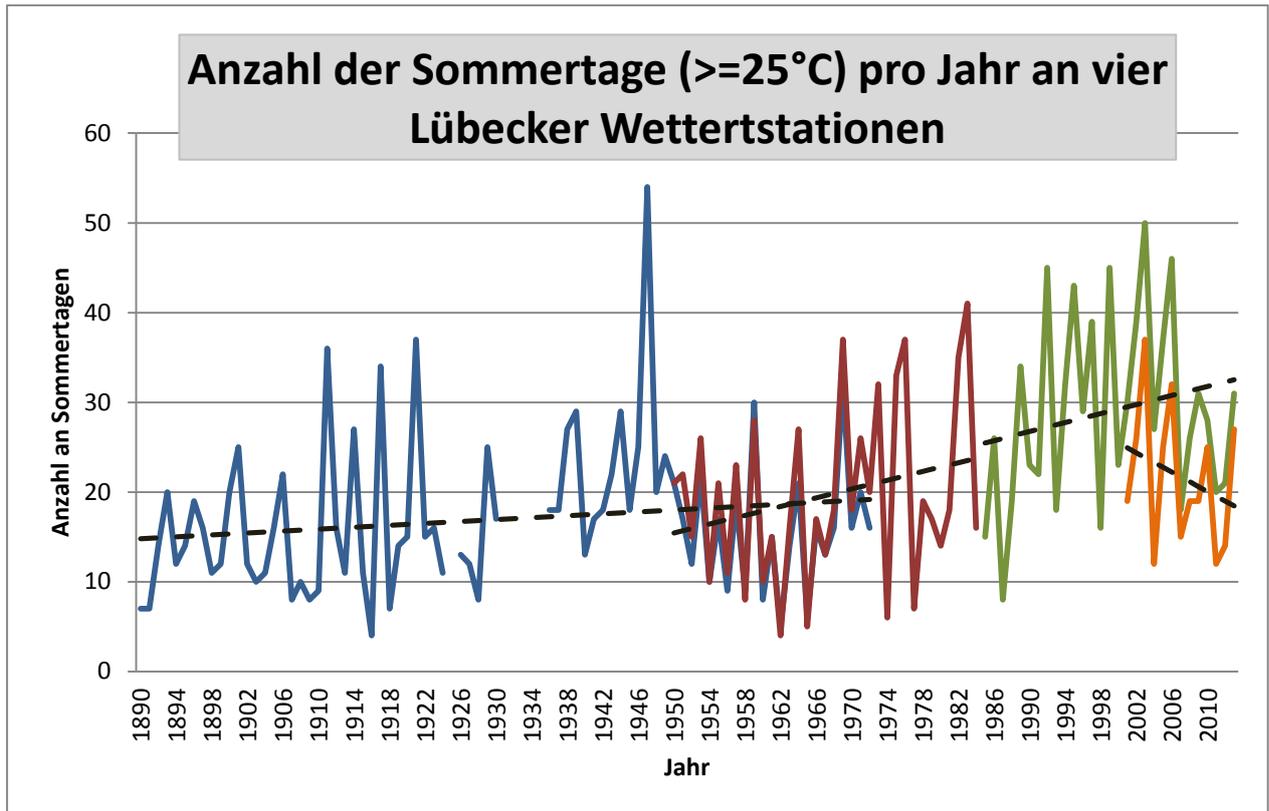


Abb. 2.5: Sommertage in Lübeck von 1890 bis 2013

(Legende: siehe Abb. 2.4. Datengrundlage: Lübeck Wert, Lübeck, Lübeck-Blankensee: DWD, [www.dwd.de](http://www.dwd.de); Lübeck Fachhochschule: Fachhochschule Lübeck)

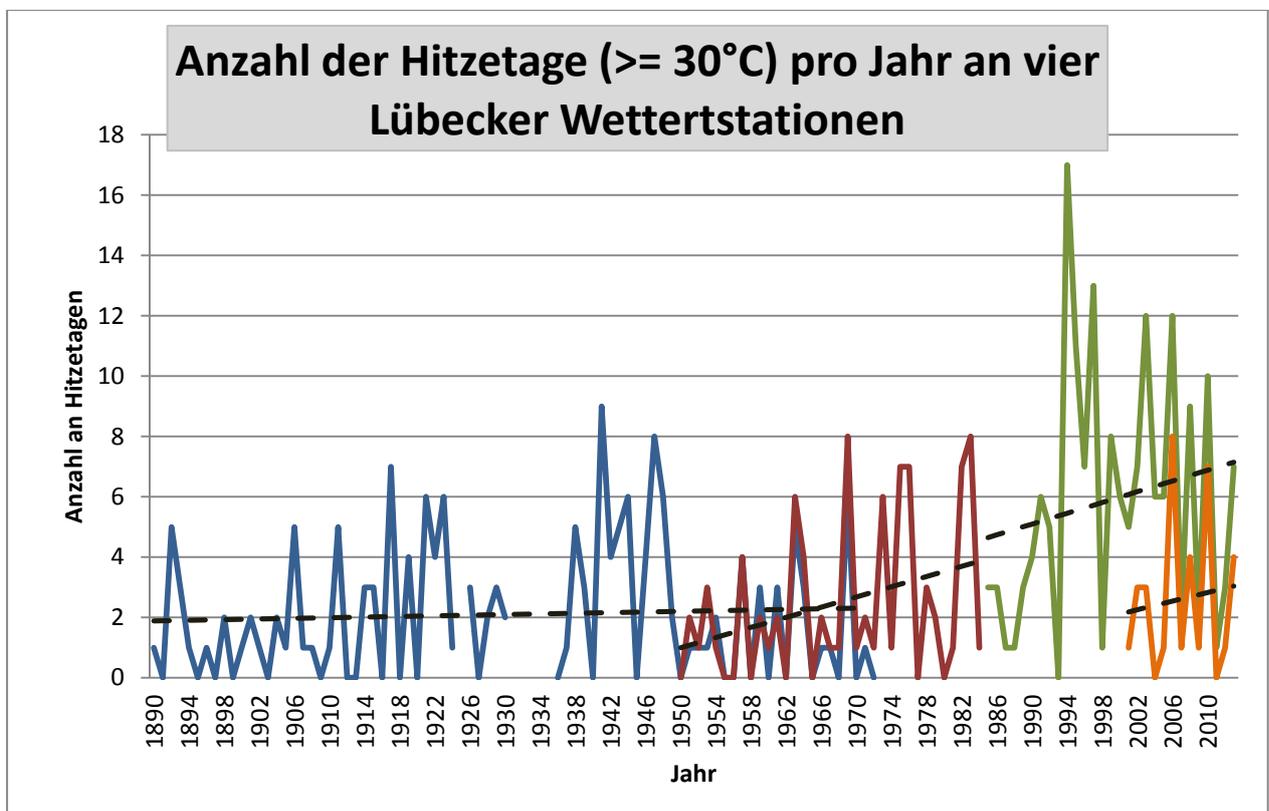
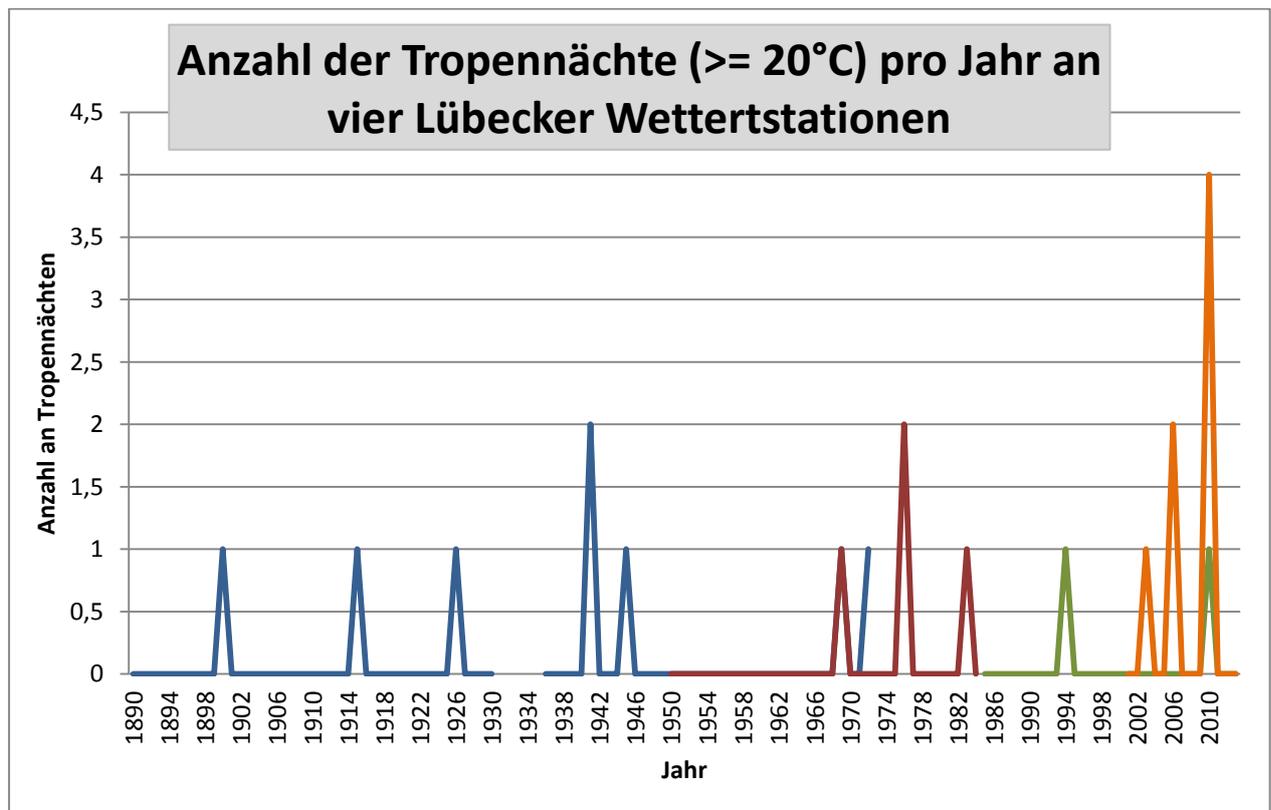


Abb. 2.6: Hitzetage in Lübeck von 1890 bis 2013

(Legende: siehe Abb. 2.4. Datengrundlage: Lübeck Wert, Lübeck, Lübeck-Blankensee: DWD, [www.dwd.de](http://www.dwd.de); Lübeck Fachhochschule: Fachhochschule Lübeck)

In Abb. 2.6 ist die Entwicklung der Hitzetage (Tage mit einem Temperaturmaximum  $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) für die verschiedenen Messstationen dargestellt. Hitzetage sind ein besonders starker Indikator für die Wärmebelastung des Menschen. Steigen die Temperaturen über dreißig Grad an, wird der Organismus zunehmend belastet. Körperliche Arbeit und anstrengende Tätigkeiten sollten reduziert werden. Besonders gefährdet sind alte und kranke Menschen.

Hier ist der Trend an allen gemessenen Stationen eindeutig positiv. Vor allem seit den 50er-Jahren ist es zu einem größeren Anstieg der Hitzetage pro Jahr gekommen. Insgesamt sind die Hitzetage in Lübeck im Vergleich zu anderen deutschen Städten aber gering ausgeprägt. Dies ist auf die Lage der Stadt an der Ostsee zurück zu führen.



**Abb. 2.7:** Tropennächte in Lübeck 1890 bis 2013

(Legende: siehe Abb. 2.4. Datengrundlage: Lübeck Wert, Lübeck, Lübeck-Blankensee: DWD, [www.dwd.de](http://www.dwd.de); Lübeck Fachhochschule: Fachhochschule Lübeck)

Ein ebenfalls sehr wichtiger Indikator, um die Hitzebelastung zu messen, ist die Tropennacht. Eine Tropennacht ist eine Nacht, in der die Temperatur nicht unter  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sinkt. Temperaturen über  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  in der Nacht verhindern eine wirksame Erholung während der Nachtstunden.

In der Hansestadt Lübeck sind auf Grund des ozeanisch geprägten Klimas Tropennächte eher selten. Etwas hervor stechen die Tropennächte, die im Bereich der Fachhochschule auftreten. Hier sind im Jahr 2010 vier Tropennächte aufgetreten. Diese höhere Ausprägung kann auf die Lage der Wetterstation und damit auf das typische Stadtklima, welches im Folgenden genauer erläutert wird, zurück zu führen sein.

Im verdichteten Stadtgebiet Lübecks entstehen durch anthropogene Einflüsse spezielle Stadtklimate, die sich unter anderem durch Wärmeinseleffekte auszeichnen. Im Sommer führen sie zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen in den Siedlungsflächen, die Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und der Gesundheit der Bewohner zur Folge haben können.

Solche belastenden 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.

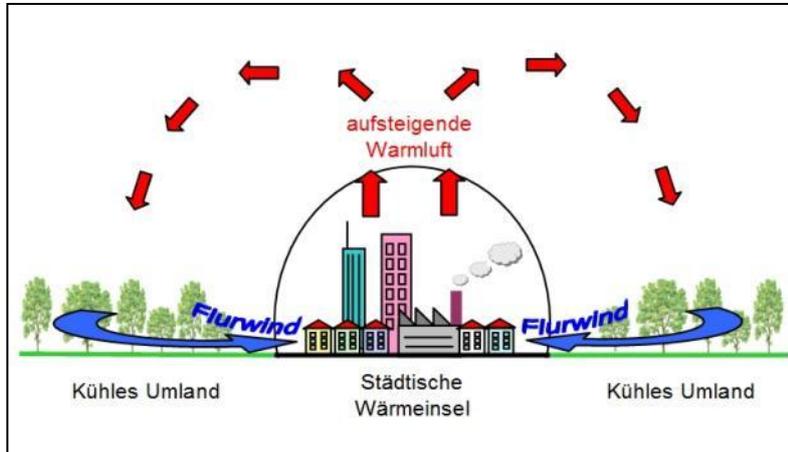


Abb. 2.8: Prinzipskizze Flurwinde

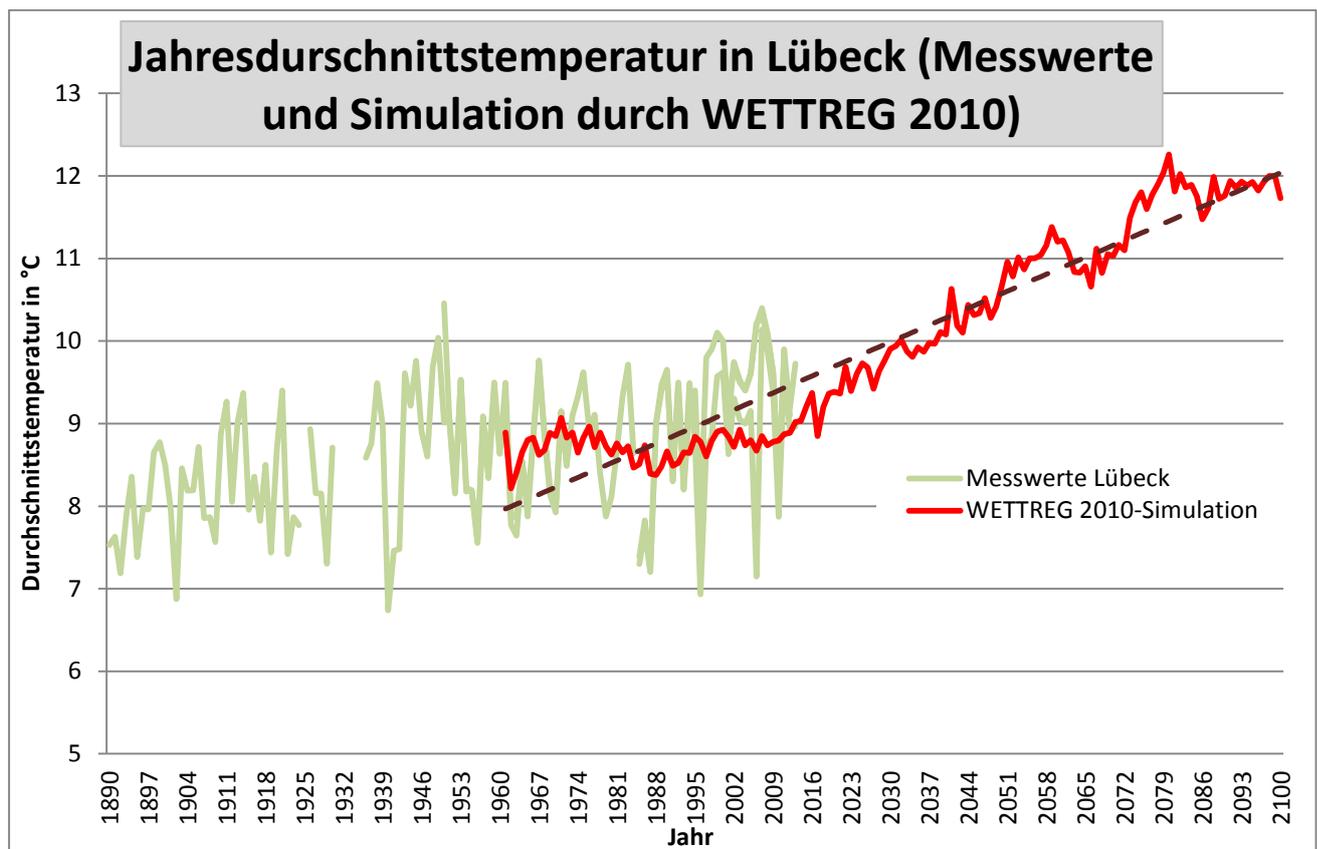
Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen von warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge dessen treten sogenannte Flurwinde als Ausgleichsströmungen auf, die bodennah zu einem Zuströmen kühlerer Luft aus dem Umland führen. Solche Strömungen sind auf einen überwärmten Bereich ausgerichtet und fließen bevorzugt über gering bebauten Flächen in die Stadt ein (Abb. 2.8). 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.

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. Darüber hinaus treten Kaltluftabflüsse über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von  $\geq 1^\circ$  aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus stadtklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Aufgrund der Reliefsituation im Untersuchungsraum treten Kaltluftabflüsse nur kleinräumig 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.

## 2.2 Die Entwicklung des Klimas in Lübeck

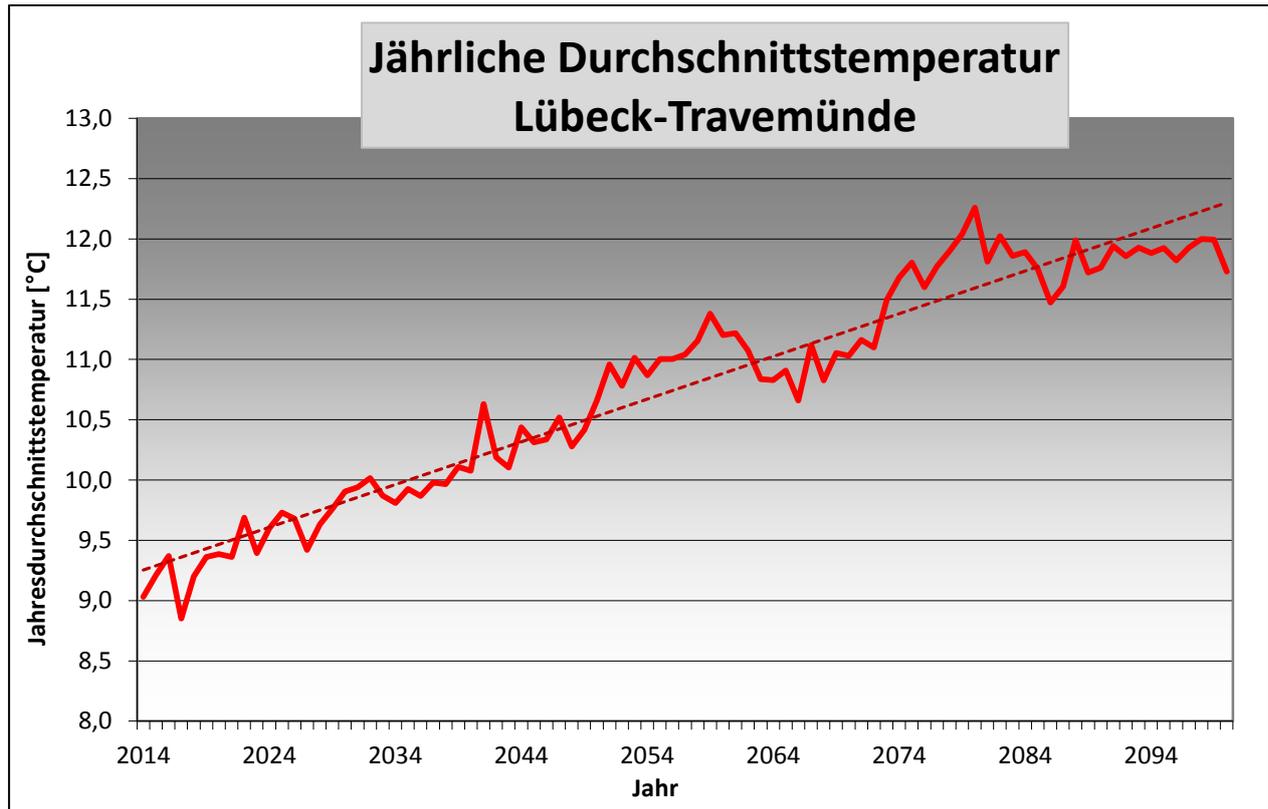
Auch die mögliche Entwicklung des Klimas in der Zukunft spielt vor allem für die Klimaanpassung eine wichtige Rolle. Im Folgenden sollen kurz die wichtigsten Prognosen für das Bioklima im Hinblick auf die Temperaturentwicklung dargestellt werden. Hierbei wird auf das Klimamodell WETTREG 2010<sup>1</sup>, Szenario A1B, Klimastation Lübeck-Travemünde zurückgegriffen. Diese Klimastation ist die einzige in Lübeck, für die die WETTREG-Simulation vorgenommen wurde. Durch die Lage direkt an der Ostsee wird hier kein typisches Stadtklima abgebildet, sondern eher das Klima des Umlands mit der Besonderheit des Seeklimas. Dargestellt werden die gemittelten Werte aus 10 Modellläufen.



**Abb. 2.9:** Jahresdurchschnittstemperatur in Lübeck 1890 bis 2010 (Messwerte und Simulation durch WETTREG 2010)

Abb. 2.9 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen Werten in Lübeck und der Modellierung mit WETTREG, die im Jahr 1961 startet. Die Mittelwerte der Klimanormalperiode 1961-1990 liegen sowohl für die Modellierung als auch für die Messungen bei 8,7 °C. Obwohl die gemessenen Werte eine wesentlich größere Amplitude aufweisen, ist hier eine hinreichend genaue Korrelation festzustellen.

<sup>1</sup> s. Glossar

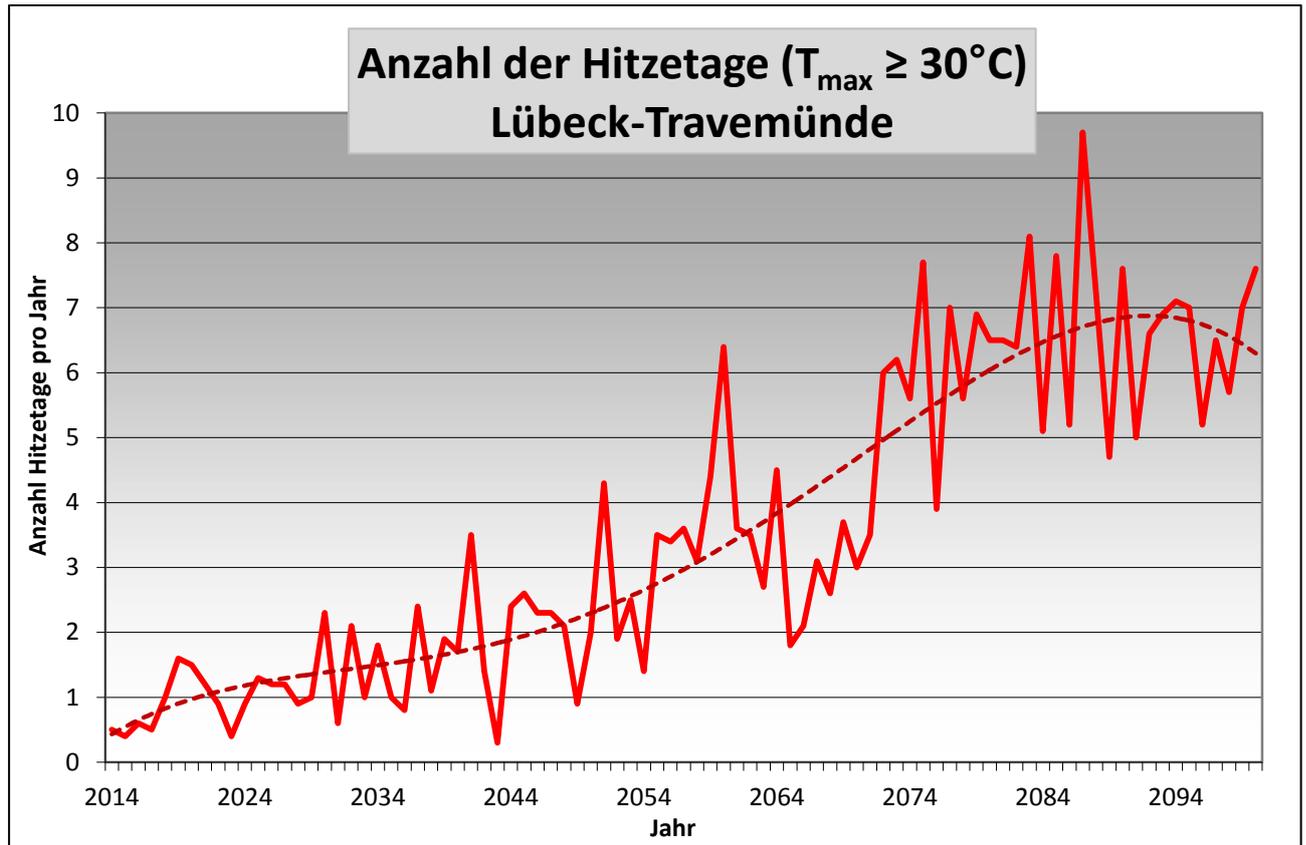


**Abb. 2.10:** Jahresdurchschnittstemperatur Lübeck-Travemünde, Betrachtungszeitraum 2014 – 2100  
WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B

In Abb. 2.10 wird die modellierte Jahresmitteltemperatur an der Station Lübeck-Travemünde für den Zeitraum 2014 bis 2100 dargestellt. Prognostiziert wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen auf 11,7 °C im Jahre 2100. Der höchste prognostizierte Jahresmittelwert wird im Jahre 2080 mit 12,9 °C erreicht. Damit wird ein deutlicher Anstieg der Jahresmitteltemperaturen von etwa 2,8 °C bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur heutigen Situation vorhergesagt.

Diese Entwicklung der steigenden Temperaturen wird auch bei der Betrachtung der Entwicklung der Hitzetage in Lübeck-Travemünde deutlich. In Abb. 2.11 wird die Anzahl der Hitzetage pro Jahr für den Zeitraum 2014 bis 2100 begleitet von einer polynomischen Trendlinie dargestellt. Es ist ein deutlicher Anstieg der Hitzetage pro Jahr zu erkennen. Im Jahr 2100 werden 7,6 Tage im Jahr mit einer Temperatur  $\geq 30$  °C prognostiziert, während es für das Jahr 2014 lediglich 0,5 Tage sind. Vergleicht man diese simulierten Werte mit denen in der Vergangenheit in Lübeck gemessenen, fällt auf, dass in Lübeck in den letzten Jahren bereits mehrfach eine recht hohe Anzahl von Hitzetagen auftrat. Hier wird vermutlich der Einfluss der Ostsee auf die Spitzentemperaturen in Travemünde deutlich. Aus dem Trend des Werteverlaufs bis zum Ende des Jahrhunderts ist für das Landesinnere und die städtischen Gebiete Lübecks ein weiteres Ansteigen von Hitzetagen mit entsprechend höheren Werten zu erwarten.

Für den menschlichen Organismus sind vor allem Hitzetage belastend. Davon betroffen sind insbesondere ältere oder sehr junge Menschen, aber auch Menschen, die schwere körperliche Arbeiten verrichten müssen. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der Entwicklung von Hitzewellen insbesondere interessant, denn je länger die hohen Temperaturen andauern, desto stärker ist auch die Belastung für den menschlichen Organismus.

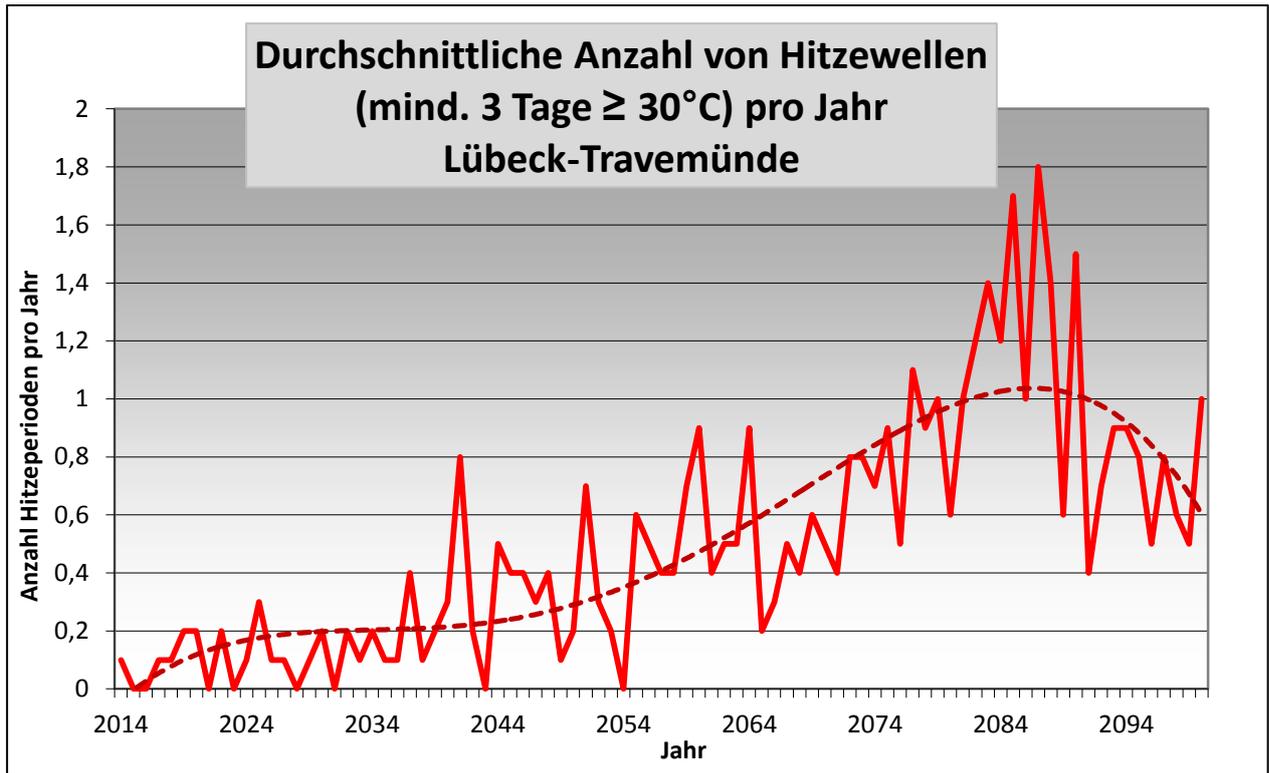


**Abb. 2.11:** Anzahl der Hitzetage pro Jahr in Lübeck-Travemünde, Betrachtungszeitraum 2014 bis 2100  
WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B

Der Begriff Hitzewelle ist nicht klar definiert. Temperaturschwellenwerte und andere Rahmenbedingungen (z.B.: Luftfeuchte oder Dauer) unterscheiden sich je nach Land oder Region. Grund dafür sind die klimatischen Unterschiede, die auch eine unterschiedliche Akklimatisierung der Bevölkerung (bezogen auf einen gesunden Menschen durchschnittlichen Alters) an hohe Temperaturen mit sich bringen. In Deutschland gibt es keine offizielle Definition einer Hitzewelle. Für dieses Gutachten werden mindestens 3 Tage mit Maximaltemperaturen über 30°C als Hitzewelle angenommen.

Abb. 2.12 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Hitzewellen für die Station Lübeck-Travemünde. Der zunächst noch schwache Anstieg erhöht sich etwa ab dem Jahr 2050 deutlich. Werden 2014 noch 0,1 Hitzewellen projiziert, sind es im Jahr 2087 1,8 Hitzewellen. In den Jahren danach ist wieder ein kleiner Rückgang von Hitzewellen pro Jahr zu erkennen. Die Anzahl von einer Hitzewelle im Jahr 2100 ist dennoch wesentlich höher als zu Beginn des Jahrhunderts.

Auch hier ist zu bedenken, dass es sich um den Standort Travemünde handelt, der sehr von der ausgleichenden Wirkung der Ostsee profitiert. Es ist davon auszugehen, dass im Landesinneren noch mehr Hitzewellen pro Jahr auftreten können.

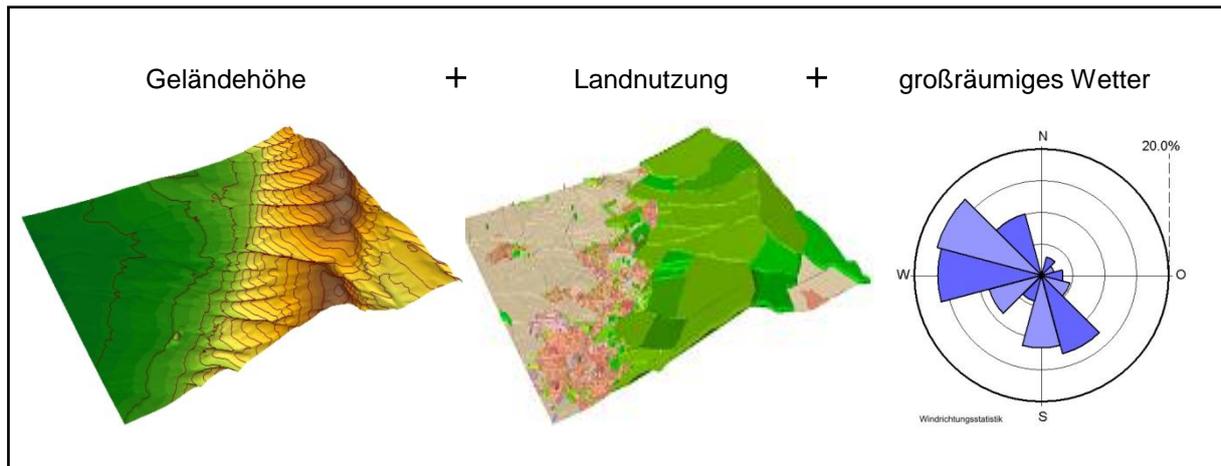


**Abb. 2.12:** Durchschnittliche Anzahl von Hitzewellen pro Jahr Lübeck-Travemünde, Betrachtungszeitraum 2014 – 2100 WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B

### 3 Methodik und Datengrundlagen für die Erstellung einer Klimafunktionskarte

#### 3.1 Eingangsdaten

Bei numerischen Simulationen muss 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 größerskaligen 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:

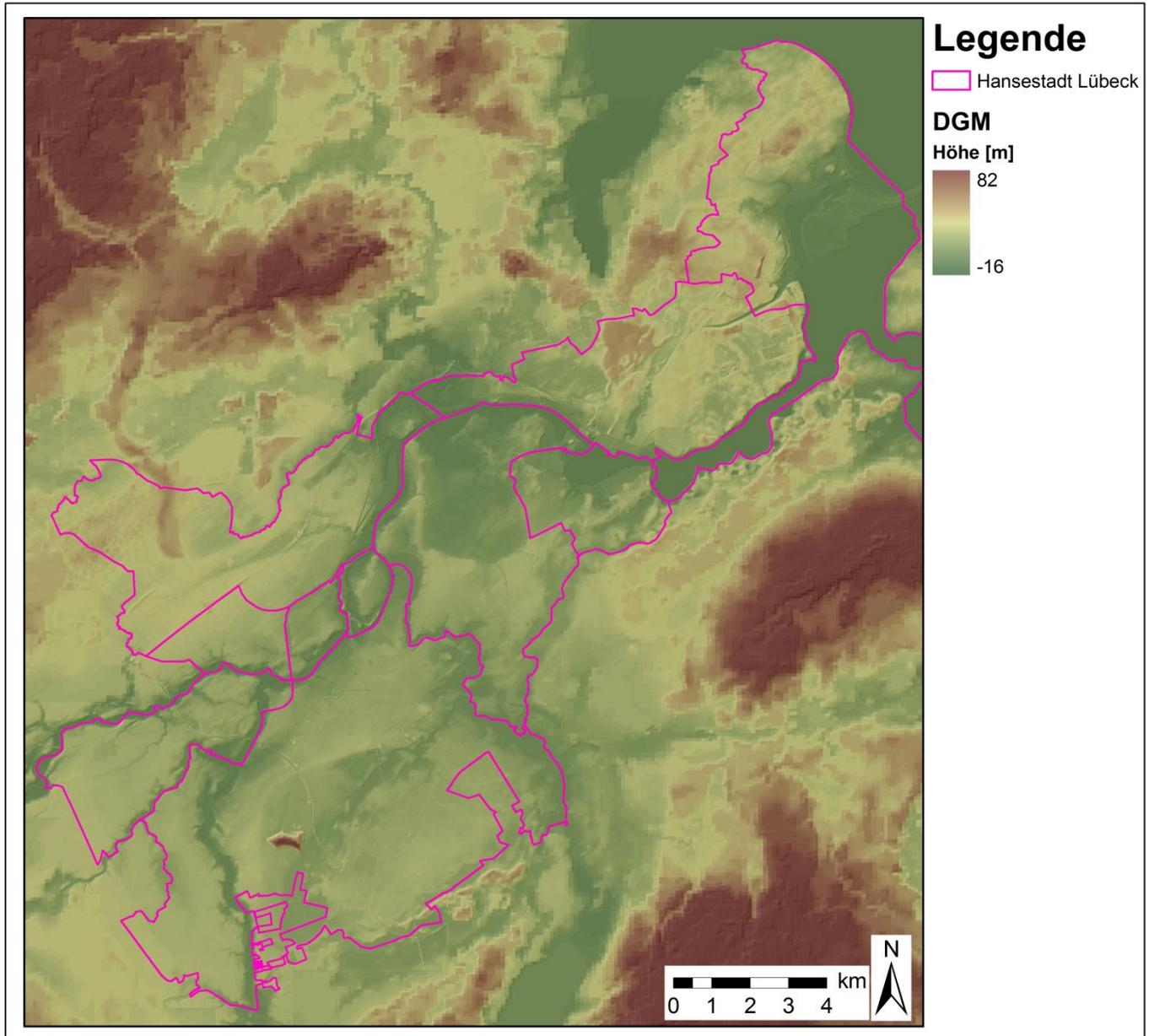
- Geländedaten (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsdaten (Verteilung der Landnutzung)
  - Bei urbanen Räumen: z.B. Gebäudehöhe, Überbauungsgrad, anthropogene Abwärme, Albedo,.....
  - Bei Bewuchs: z.B. Bestandshöhe, Bestandsdichte, Blattflächenverteilung,...
- Wetter-/Klimadaten (z.B. großräumige Anströmungsrichtung und –geschwindigkeit, Luftmassencharakteristiken wie Temperatur und Feuchte).

Bei einer Gesamtgröße des Untersuchungsgebietes von ca. 620 km<sup>2</sup> geht die Abgrenzung des Untersuchungsraumes deutlich über das Stadtgebiet Lübecks hinaus und zielt darauf ab, auch die außerhalb der Stadtgrenzen liegenden Gelände- und Nutzungsstrukturen in die Klimamodellierung zu integrieren. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 25 m.

##### 3.1.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die modellgestützte Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell der Hansestadt Lübeck mit einer Auflösung von 1 m zurückgegriffen werden. Für das nähere Umland wurde das Geländemodell durch DTED-Höhendaten ergänzt (vgl. Digital Terrain Elevation Data - NATIONAL GEOSPATIAL INTELLIGENCE AGENCY 2004). Darauf basierend wurde

das für die Modellrechnung erforderliche Raster mit einer Auflösung von 25 m erzeugt. Abb. 3.2 zeigt die Geländehöhen im Untersuchungsgebiet.



**Abb. 3.2:** Geländehöhe im Untersuchungsraum

Die höchsten Erhebungen mit Höhen von etwa 82 m ü. NN sind am nordwestlichen und südöstlichen Rand des Untersuchungsgebiets zu finden. Lübeck ist umgeben vom Schleswig-Holsteinischen-Hügelland einem durch Jungmoränen aus der Weichseleiszeit geprägten Gebiet. Die niedrigsten Geländehöhen mit bis zu -16 unter NN liegen an der Küste sowie im Bereich der Trave, Wakenitz und des Elbe-Lübeck-Kanals. Die Trave durchquert das Untersuchungsgebiet von Nordosten nach Südwesten. Die Wakenitz bildet die Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern bis sie in Richtung Trave abknickt. Der Elbe-Lübeck-Kanal trennt sich im Südwesten des Untersuchungsgebiets von der Trave ab. Im Rechengebiet treten Höhendifferenzen bis etwa 98 m zwischen der Küste und den Flussniederungen und dem Schleswig-Holsteinischen-Hügelland auf.

### 3.1.2 Nutzungsstruktur

Die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen fand bereits in der Phase 1: Klimatopkarte statt, da die Nutzung auch als Grundlage für die Klimatopbestimmung diente. Wie in Kapitel 3 beschrieben wurden die Nutzungsstrukturen auf Grundlage der von der Stadt Lübeck zur Verfügung gestellten ALKIS- und ATKIS-Daten mit Hilfe von aktuellen Luftbildern geprüft und gegebenenfalls überarbeitet. Damit war es beispielsweise möglich, über die in den Ursprungsdaten hinaus enthaltenen Informationen zusätzliche Grünanteile innerhalb von Siedlungsbereichen zu erfassen und deren klimatische Wirkung zu berücksichtigen. Für das Umland standen CORINE Landnutzungsdaten zur Verfügung (siehe auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), die ebenfalls angepasst wurden. Die Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet zeigt Abb. 3.3.

Modellrechnungen verwenden rasterhafte Repräsentationen von Eingangsvariablen. Für die Bereitstellung der Modelleingangsdaten muss die Flächengeometrie daher auf Rasterzellen jeweils einheitlicher Nutzungsstruktur – hier mit einer Maschenweite von 25 m – übertragen werden. Da bei dieser Auflösung Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst werden können, gehen sie entsprechend parametrisiert durch die Definition der Nutzungsklassen in die Modellierung ein. Sie werden daher je Rasterzelle über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert. Im Zuge des hierbei eingesetzten geostatistischen Verfahrens wurden kleinere Nutzungseinheiten, die aufgrund der Maßstabsbeschränkung in der Flächengeometrie nicht enthalten sind (z. B. Straßenräume, Hausgärten, kleinere Baumgruppen) den einzelnen Rasterzellen mittels umfangreichem Abgleich auf Basis von Luftbildern sowie der Biotopkartierung zugeordnet.

Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben. Da auf Maßstabsebene der gesamtstädtischen Klimamodellierung keine Einzelgebäude aufgelöst wurden, sind für die Einordnung der Strukturhöhe und des Oberflächenversiegelungsgrades nutzungsklassifiziert vorliegende Literaturdaten (u.a. MOSIMANN et al. 1999) genutzt worden, die auf Untersuchungsergebnissen aus mehreren deutschen Städten beruhen. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein vereinfachter, 14-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet. Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen möglich zu machen. Die verwendeten Nutzungskategorien mit dem jeweils zugeordneten Versiegelungsgrad und der zugeordneten Strukturhöhe zeigt Tab. 3.1.

Für die Klimamodellierung ist weniger die Nutzungsart relevant als vielmehr die Nutzungsstruktur und damit der Flächentyp. Maßgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie z.B. Versiegelungsgrad, Bebauungsdichte und Strukturhöhe aus. Daher gilt es eine Einstufung zu finden, welche am ehesten die strukturelle Eigenschaft einer Fläche widerspiegelt. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. Für die Modellrechnung zum Kaltlufthaushalt, auf dessen Grundlage die Klimafunktionskarte beruht, ist eine einheitliche Rasterauflösung von 25 m x 25 m verwendet worden.

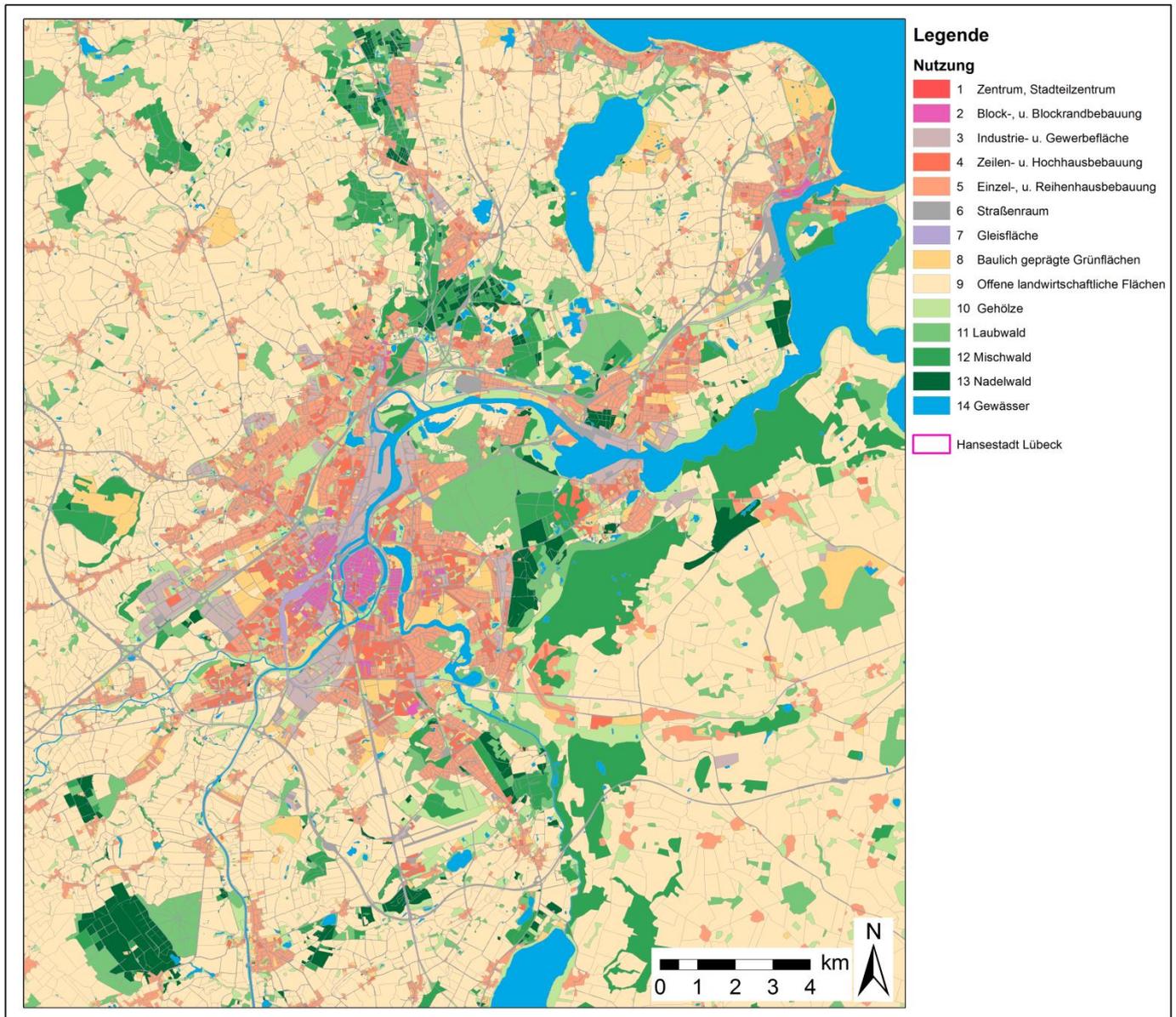


Abb. 3.3: Nutzungsstruktur im Untersuchungsgebiet

Klasse	Flächentyp	Beschreibung	Mittlerer Versiegelungsgrad (%)	Mittlere Strukturböhe (m)
1	Zentrum, Stadtteilzentrum	Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- 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 Grün- und Freiflächenanteil, 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	Schienerverkehrsfläche mit geringer Strukturböhe.	25	0,5
8	Baulich geprägte Grün- und Freifläche	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	Offene landwirtschaftliche Flächen	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	12,5
12	Mischwald			
13	Nadelwald			
14	Gewässer	Still- und Fließgewässer.	0	0

**Tab. 3.1** Nutzungskategorien der Klimamodellierung mit Kennwerten zur Strukturböhe und zum Versiegelungsgrad der einzelnen Nutzungsklassen

### 3.1.3 Straßenverkehr und Schiffsemissionen

Im Rahmen der Klimaanalyse für die Hansestadt Lübeck wurde auch eine lufthygienische Untersuchung für eine austauscharme sommerliche Wetterlage durchgeführt. In Abb. 3.4 ist ein Überblick über die verwendeten Eingangsdaten dargestellt.

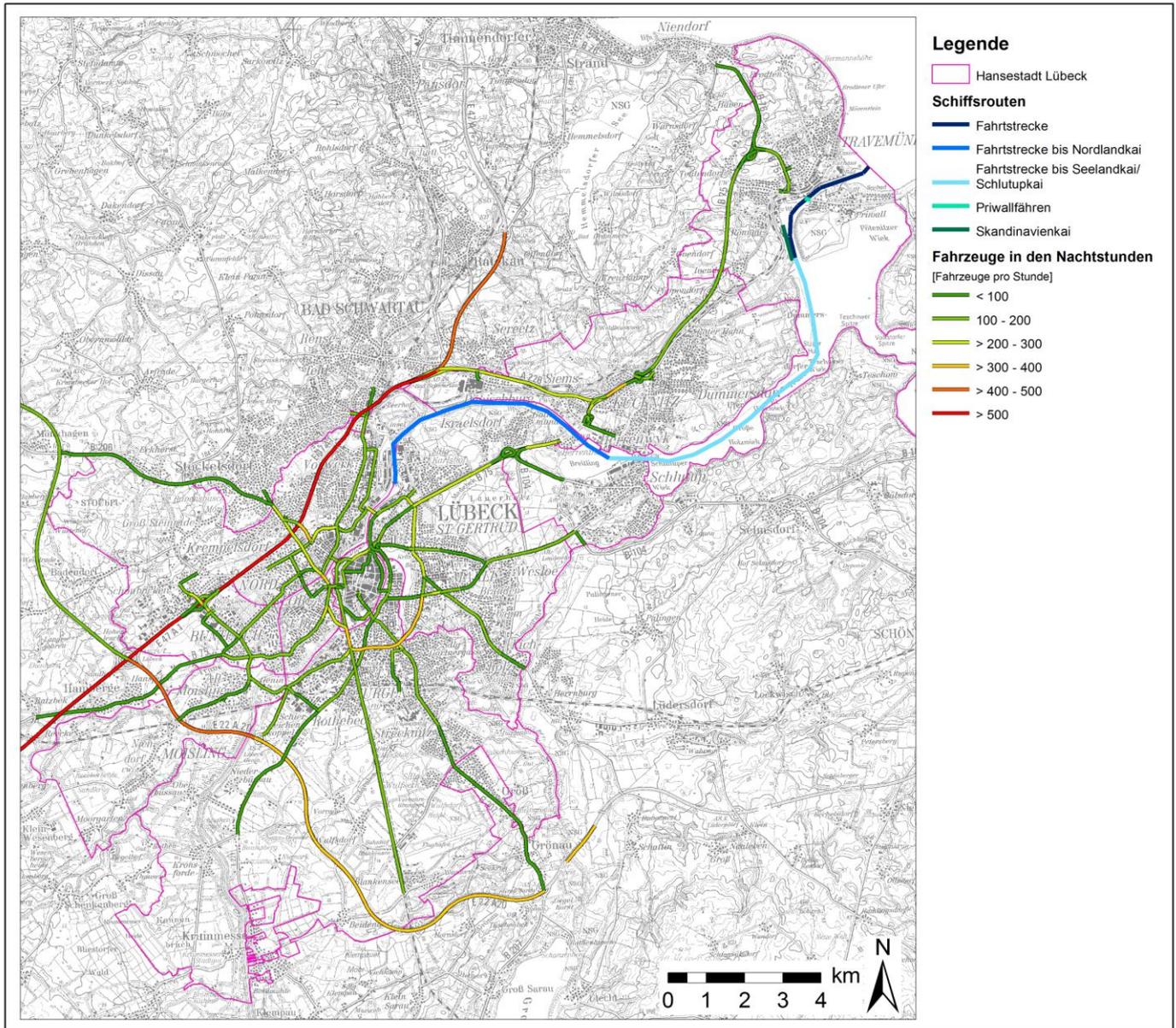


Abb. 3.4: Verkehrsmengen in der Nacht und Schiffsrouten in Lübeck (Quellen siehe Text)

Die Verkehrszahlen für das Hauptverkehrsnetz der Jahre 2010 bis 2012 wurden durch die Hansestadt Lübeck bereitgestellt. Da die Daten eine Unterscheidung zwischen Tag – und Nachtsituation (22:00 bis 6:00 Uhr) erlauben, wurden in der Emissionsprognose durchschnittliche Verkehrsbelastungen während der Nachtstunden betrachtet. Auf Grundlage des Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs des Umweltbundesamtes HBEFA3.2 (vgl. UBA 2014) wurden die nächtlichen Emissionen der betrachteten Straßenabschnitte für das Prognosejahr 2014 berechnet.

Zur Ermittlung der Emissionen aus dem Schiffsverkehr auf der Trave wird auf ein Gutachten des TÜV Nord vom März 2014 (vgl. TÜV Nord 2014) zurückgegriffen, das die vorwiegend durch Schiffsemissionen geprägte Immissionssituation im Bereich des Priwallhafens beschreibt. Auch bei den Schiffsemissionen werden, soweit eine Unterscheidung möglich ist, vornehmlich die Emissionen während der Nacht- und frühen Morgenstunden betrachtet. In dem Gutachten des TÜV Nord werden Emissionen der den Passathafen passierenden Schiffe, Emissionen der am Ostpreußenkai liegenden Passagier- und Kreuzfahrtschiffe, Emissionen der Priwallfähren sowie Emissionen der Schiffe am Skandinavienkai berücksichtigt. Soweit die Schiffsemissionen in dem vorliegenden Gutachten als zeitlich konstant angenommen wurden, werden diese Emissionen auch in der nächtlichen Ausbreitungsrechnung berücksichtigt. Dies betrifft den Schiffsverkehr auf der Trave

im Bereich der Halbinsel Priwall sowie die Emissionen des Skandinavienkais. Gemäß dem Gutachten des TÜV Nord erstrecken sich die Liegezeiten der Kreuzfahrtschiffe am Ostpreußenkai vornehmlich auf den Zeitraum zwischen 7:00 und 21:00 Uhr, so dass die vergleichsweise hohen Emissionen dieser Schiffe für die nächtliche Ausbreitungsrechnung nicht relevant sind. Aus Ermangelung weiterer detaillierter Daten zum Schiffsverkehr wurde in Absprache mit der Hansestadt Lübeck der weitere Schiffsverkehr auf der Trave bis zum Schlutup-/Seelandkai und bis zum Nordlandkai anteilig von den durch den TÜV Nord ermittelten Werten auf Grundlage von Umschlagszahlen der beiden Häfen angenommen. Dieses Verfahren ist mit großen Unsicherheiten behaftet und kann nur eine ungefähre Annäherung an die tatsächliche Emissionsbelastung durch den Schiffsverkehr auf der Trave wiedergeben.

## 3.2 Methodik der Modellrechnung

### 3.2.1 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

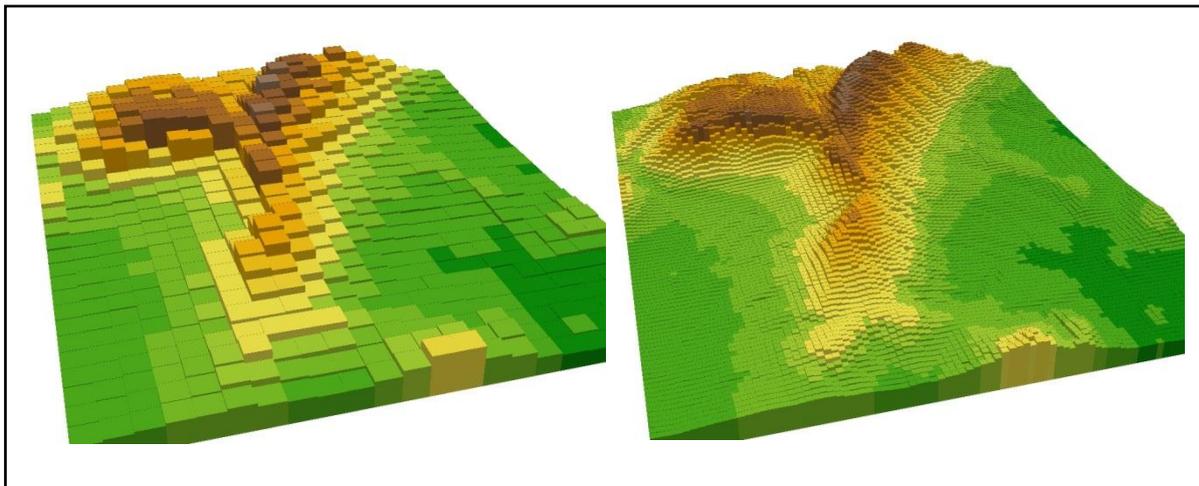
Die Verteilung der lokalklimatisch relevanten Größen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings immer nur punktuell repräsentativ 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, Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz zu studieren und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen zu finden.

#### 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. 3.5).



**Abb. 3.5:** 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  $\Delta x$  beträgt 25 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  $\Delta z$  immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen).

### Parametrisierungen

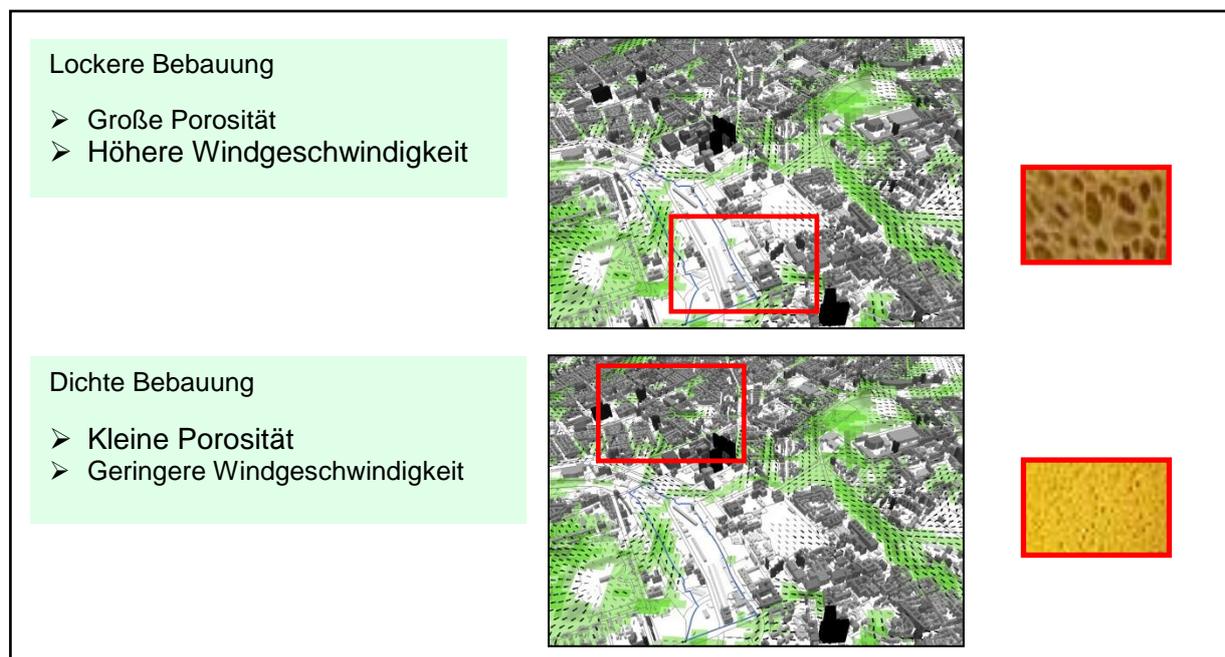
Das mesoskalige Modell FITNAH berechnet alle meteorologischen Variablen als mittlere Werte für das entsprechende Raster. Mit der Rasterweite wird somit auch die Dimension der räumlich noch auflösbaren Strukturen festgelegt. Typische Rasterweiten sind 25m x 25m bis 1000m x 1000m. Sie decken damit den 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).

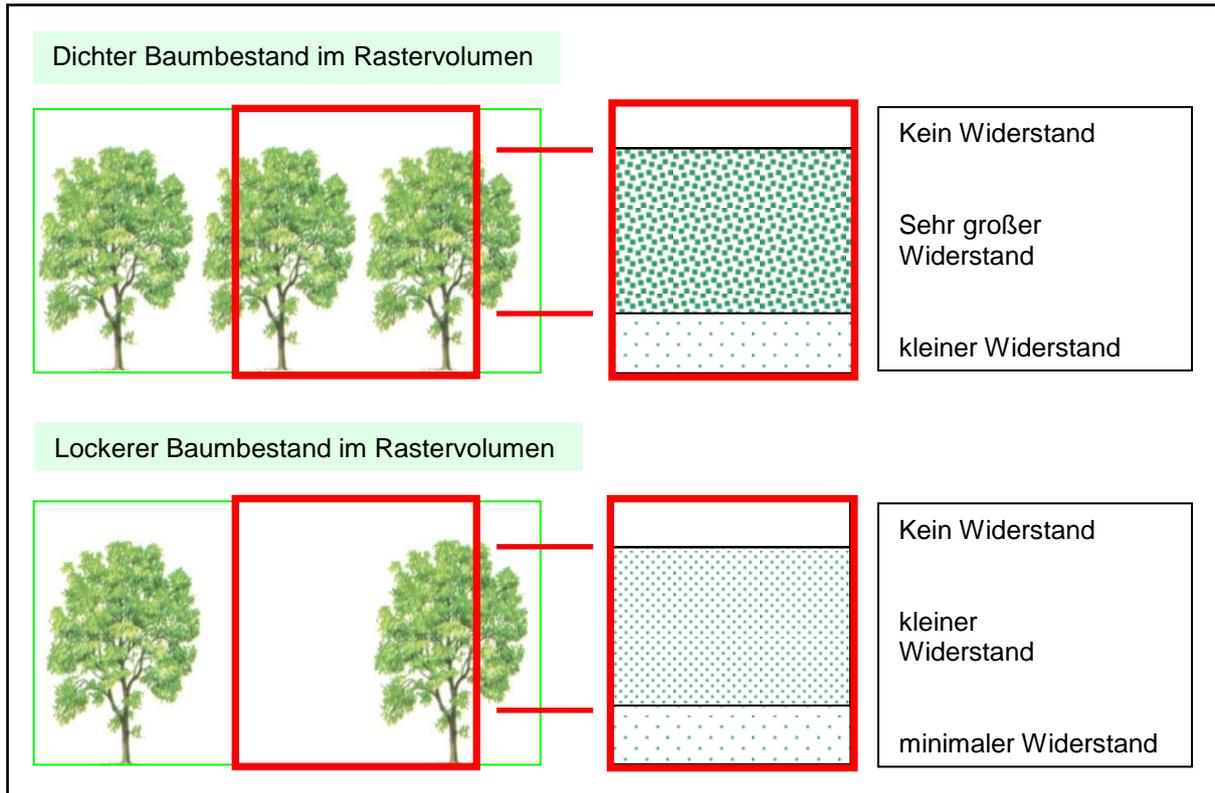
Die beiden wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude der Strömung in den Weg und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, die summarische Wirkung über eine Rasterzelle mit Gebäuden ist aber eine Verzögerung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Hindernisse die Turbulenz verstärkt. Auch die Temperaturverteilung wird in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Diese Effekte können über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Porosität (Abb. 3.6). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

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 anthropogene 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. 3.7). 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. 3.6:** Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit



**Abb. 3.7:** 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.

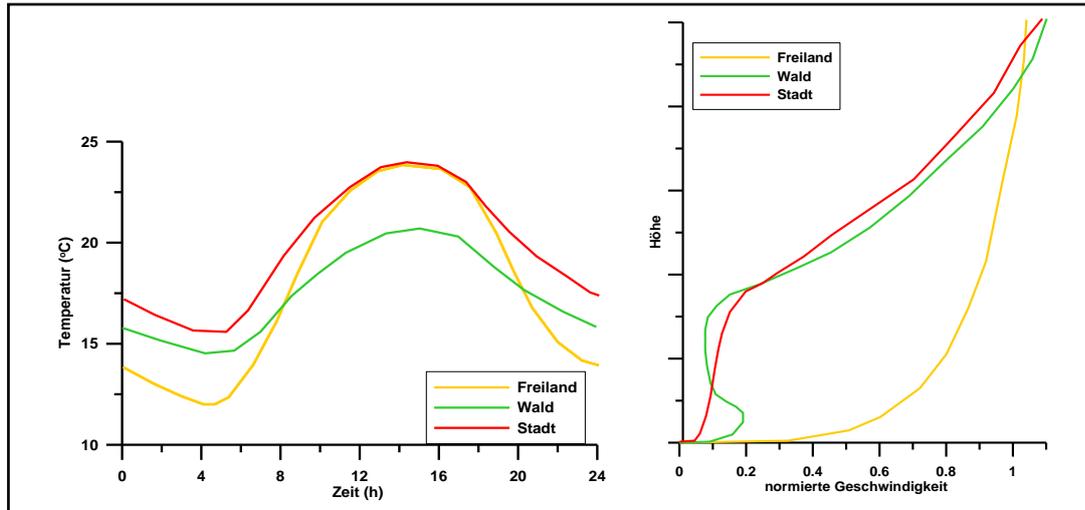
### 3.2.2 Meteorologische Rahmenbedingungen für die Modellberechnung Kaltlufthaushalt

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 Grün- oder Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

In Abb. 3.8 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. 3.8:** Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Der Tagesgang der Lufttemperatur zeigt, dass sowohl Grün- oder Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnliche 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 Grün- oder 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.

### 3.2.3 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 dient dabei die Ausbreitung eines fiktiven Schadstoffs im Strömungsfeld der Kaltluftmodellierung. Die Ausgangswerte hierfür liefern Berechnungen der Emissionsmengen von Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x^2$ ), die als Leitkomponente der Quellgruppe Verkehr angesehen werden können.

Die hier beschriebenen Immissionsfelder beziehen sich ganz explizit auf eine Ausbreitungssituation, die nur bei speziellen meteorologischen Situationen und nur in den Nachtstunden auftritt. Sie sind quantitativ nicht auf reale Immissionsbedingungen zu übertragen. Die Schadstoffbelastung wird im Rahmen der eingesetzten Methodik hauptsächlich durch die Emissionsmenge und die modellierte Strömung bestimmt. Sie ist damit nicht geeignet, grenzwertrelevante Aussagen zu treffen, sondern dient lediglich dazu, Siedlungsbereiche zu identifizieren, in denen bei autochthonen Wetterlagen mit erhöhten Luftschadstoffbelastungen zu rechnen ist (Indikatorfunktion).

Nach Berechnung der straßenabschnittsbezogenen  $\text{NO}_x$ -Emissionen wurden diese in das Geodatenbankumfeld des Verkehrsnetzes überführt und auf ein für das Simulationsmodell FITNAH geeignetes Raster mit einer Zellengröße von 25 m x 25 m übertragen.

<sup>2</sup> S. Glossar

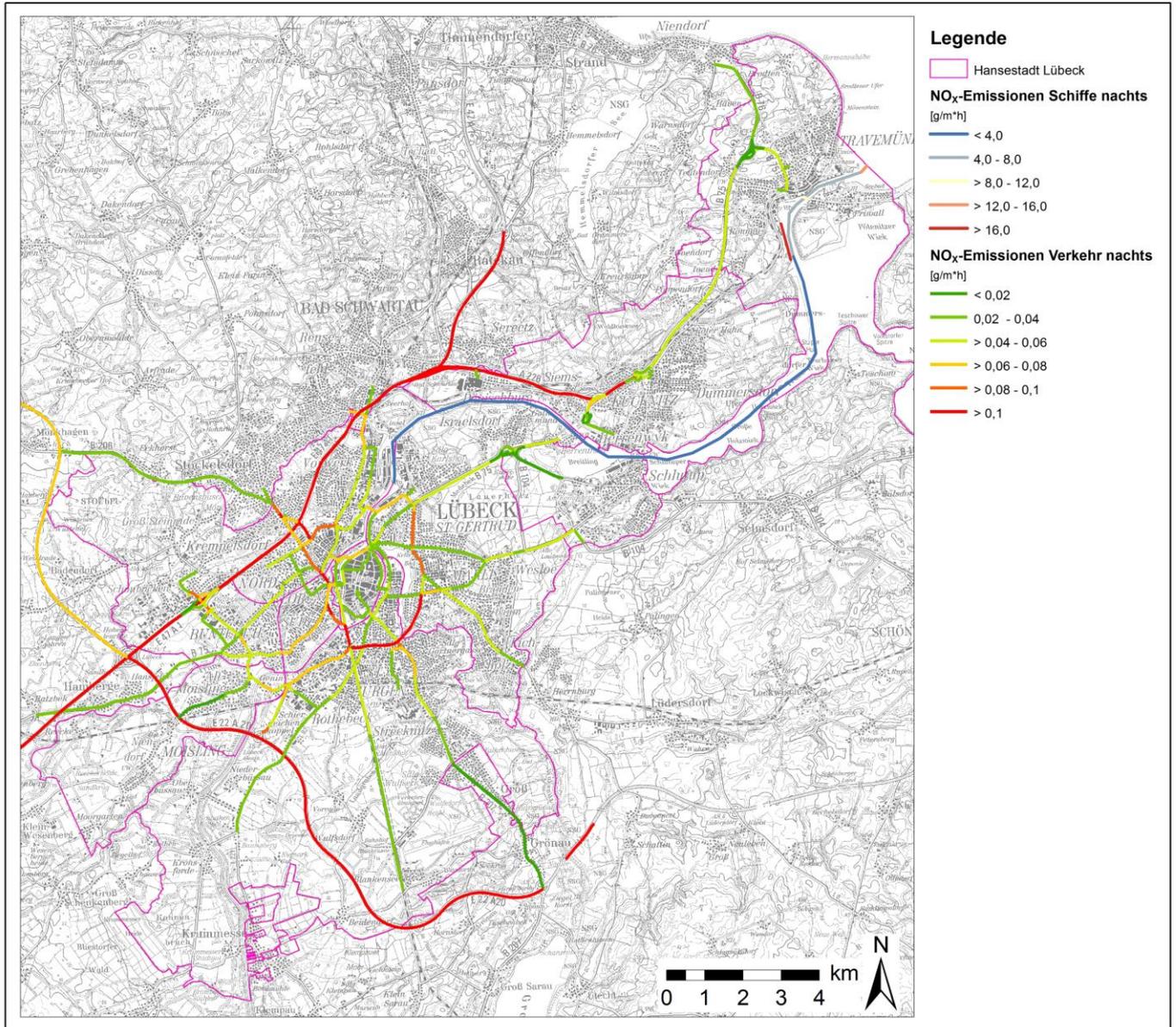


Abb. 3.9: Emissionsdichten von NO<sub>x</sub> in Gramm pro Meter und Stunde

### 3.3 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 Grün- und Freiflächen 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 **Klimafunktionskarte** 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 25 m Raster vorliegen.

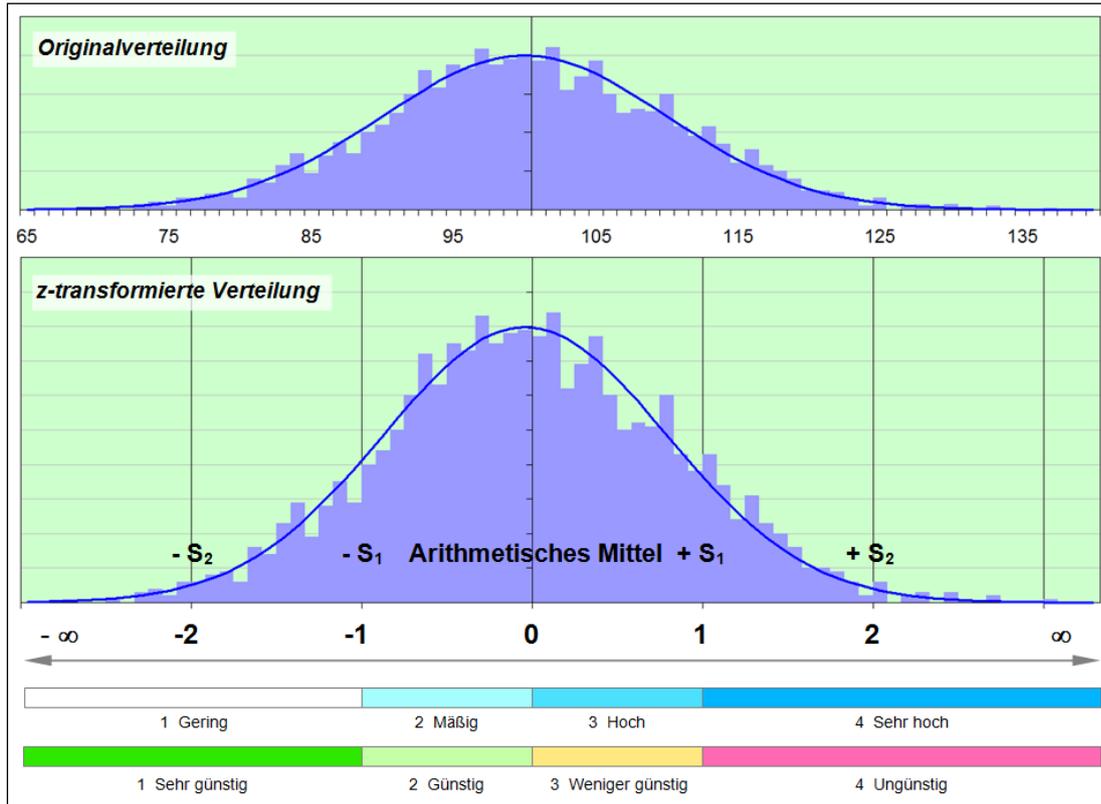
Die qualitative Bewertung der einzelnen Klimaparameter erfolgt dann in Relation zum mittleren Wertenniveau der Klimaparameter im Untersuchungsgebiet. Dieses Vorgehen erfolgt in Anlehnung an die VDI Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008b), in der vorgeschlagen wird, für eine Bewertung der Klimaparameter die 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)
- $\mu$ :          arithmetisches Mittel der Variablen
- Sigma:      Standardabweichung

Eine Klassifizierung in Kategorien wie „Hoch“ und „Gering“ 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. 3.10:** 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.

### 3.3.1 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 m³/s
<i>sehr gering</i>	< -1	< 300
<i>gering</i>	-1 bis 0	300 - 800
<i>mittel</i>	> 0 bis 1	800 - 1300
<i>hoch</i>	> 1	> 1300

**Tab. 3.2:** Bewertung der Kaltluftlieferung in der Klimafunktionskarte

In der Klimafunktionskarte wird – im Gegensatz zur Planungshinweiskarte – die Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen bewertet. Die räumliche Lage der Flächen zu bioklimatisch belastetem Siedlungsraum und damit auch ihre stadtklimatische Bedeutung wird in der Klimafunktionskarte nicht mit einbezogen.

### 3.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen

Zur Beurteilung des Bioklimas in den Siedlungsräumen, wie es in der Klimafunktionskarte der Fall ist, 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 PMV*<sup>3</sup> (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. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiological Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider, als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

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 Klimafunktionskarte 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.

Bioklimatische Situation qualitative Einstufung	charakteristische Bebauungstypen
<b>sehr günstig</b>	Dörflich geprägte Siedlungstypen
<b>günstig</b>	Einzel- und Reihenhausbebauung
<b>weniger günstig</b>	Block- und Blockrandbebauung
<b>ungünstig</b>	Verdichteter Siedlungsraum

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

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. 3.10, S. 31).

Bei der Bewertungsklasse 4 "ungünstig" liegt eine überdurchschnittliche Wärmebelastung vor. Eine bioklimatische Belastung ist auch noch bei der Bewertungsklasse 3 „weniger günstig“ gegeben. Günstige Verhältnis-

<sup>3</sup> Predicted Mean Vote (FANGER 1972), für eine ausführliche Beschreibung siehe VDI 3785 Blatt 1 (VDI 2008)

se 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 Tab. 3.3 sind den jeweiligen Klassen diese charakteristischen Bebauungstypen zugeordnet.

### 3.3.3 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.

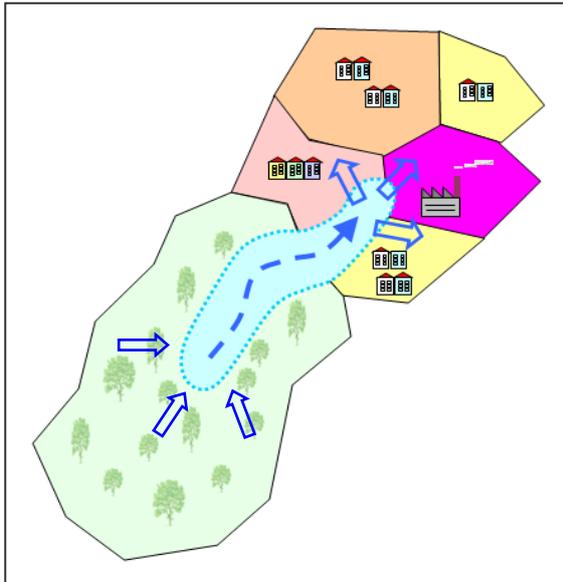


Abb. 3.11: Prinzipskizze einer Kaltluftleitbahn

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.

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 Grün- oder Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus stadtklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten.

Das Untersuchungsgebiet in Lübeck weist ein sehr kleinteiliges Relief auf, dass die Windbewegungen beeinflusst. Kaltluftabflüsse treten vor allem im Bereich der größten Erhebungen im Nordwesten und Südosten des Untersuchungsgebiets auf.

## 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 Strahlungswetterlagen<sup>4</sup> im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Grün- und 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 Grün- oder 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 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 ihrer Umgebung, da sie tagsüber kühlend wirken, während der Nachtstunden aber die Abkühlung verringern.

---

<sup>4</sup> s. Glossar

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:**

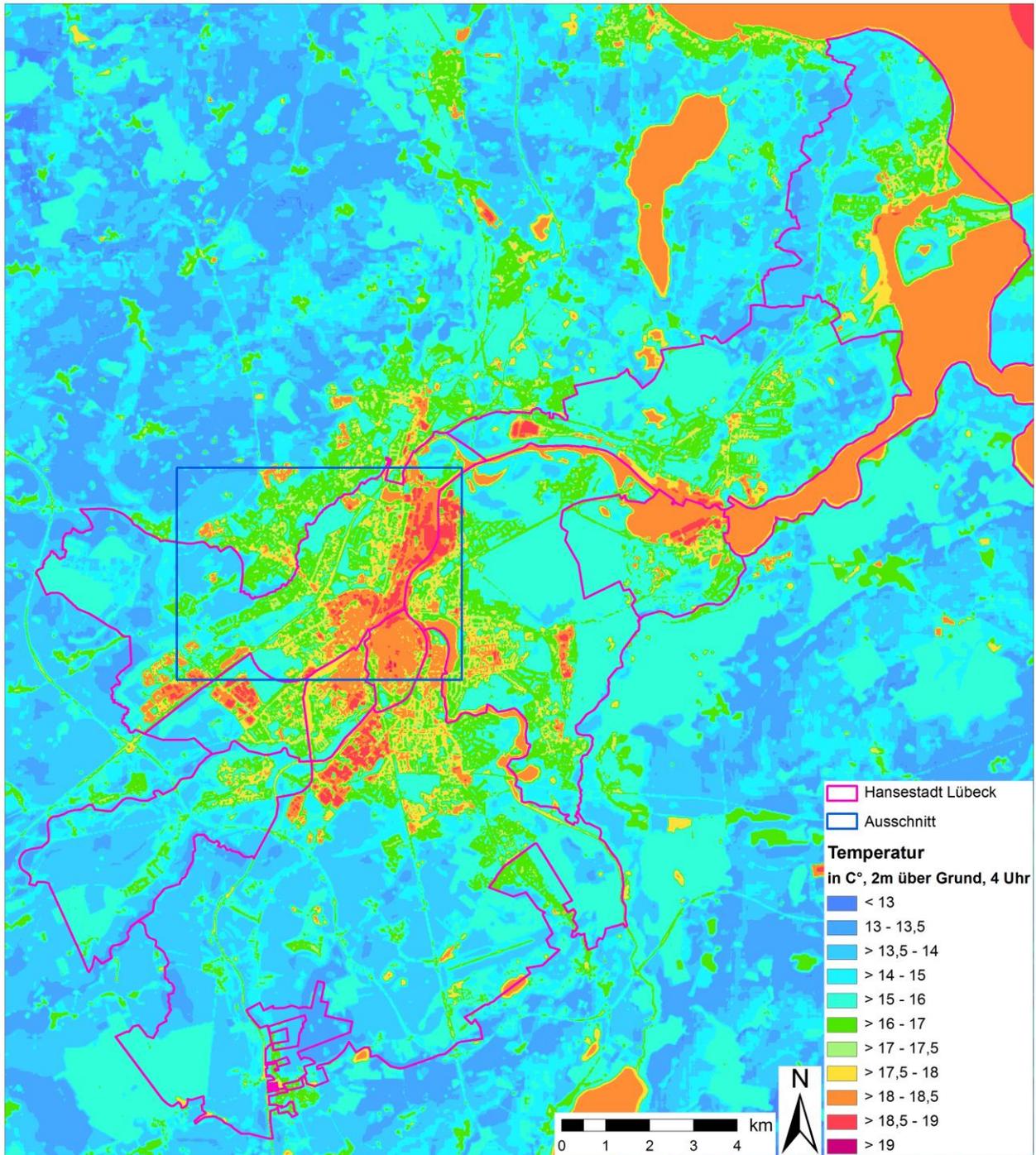
Abb. 4.1 zeigt das für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens berechnete Temperaturfeld im Stadtgebiet der Hansestadt Lübeck in 2 m über Grund. Im Untersuchungsgebiet weisen die bodennahen Temperaturen eine Spannweite von 12,6 °C bis 19,2 °C auf. Es wurde somit eine sehr warme hochsommerliche Nachtsituation modelliert. Die Spannweite und das Temperaturniveau stellen eine typische Sommernacht in Norddeutschland dar. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt bei den hier angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,9 °C.

Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Grün- und 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 19,2 °C in der dicht bebauten und zum Teil nahezu vollständig versiegelten Lübecker Altstadt auf. Sehr hohe Temperaturen wurden ebenfalls für einige Gewerbegebiete ermittelt, die eine Bebauungsdichte mit hohem Versiegelungsgrad aufweisen.

Große Teile des Siedlungsraumes sind durch Reihen- und Einzelhaus- sowie Zeilenbebauung geprägt, in denen mit 15 °C bis 17,5 °C deutlich niedrigere Lufttemperaturen vorliegen. Von den Wohnbauflächen weist die Einzelhausbebauung vor allem an den Siedlungsrändern das geringste Temperaturniveau auf, wobei dort in Randbereichen auch nur 14 °C erreicht werden, während in der Zeilenbebauung teilweise auch Werte bis 18 °C erreicht werden.

Darüber hinaus zeigen große Verkehrsflächen, abhängig vom Versiegelungsgrad, Temperaturen zwischen 16 °C und 18,5 °C. Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Grün- und Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor, wobei auf ihre Rolle als Kaltluft produzierende Areale auch in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.



**Abb. 4.1:** Bodennahe Temperaturen in °C für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens im Untersuchungsgebiet Lübeck

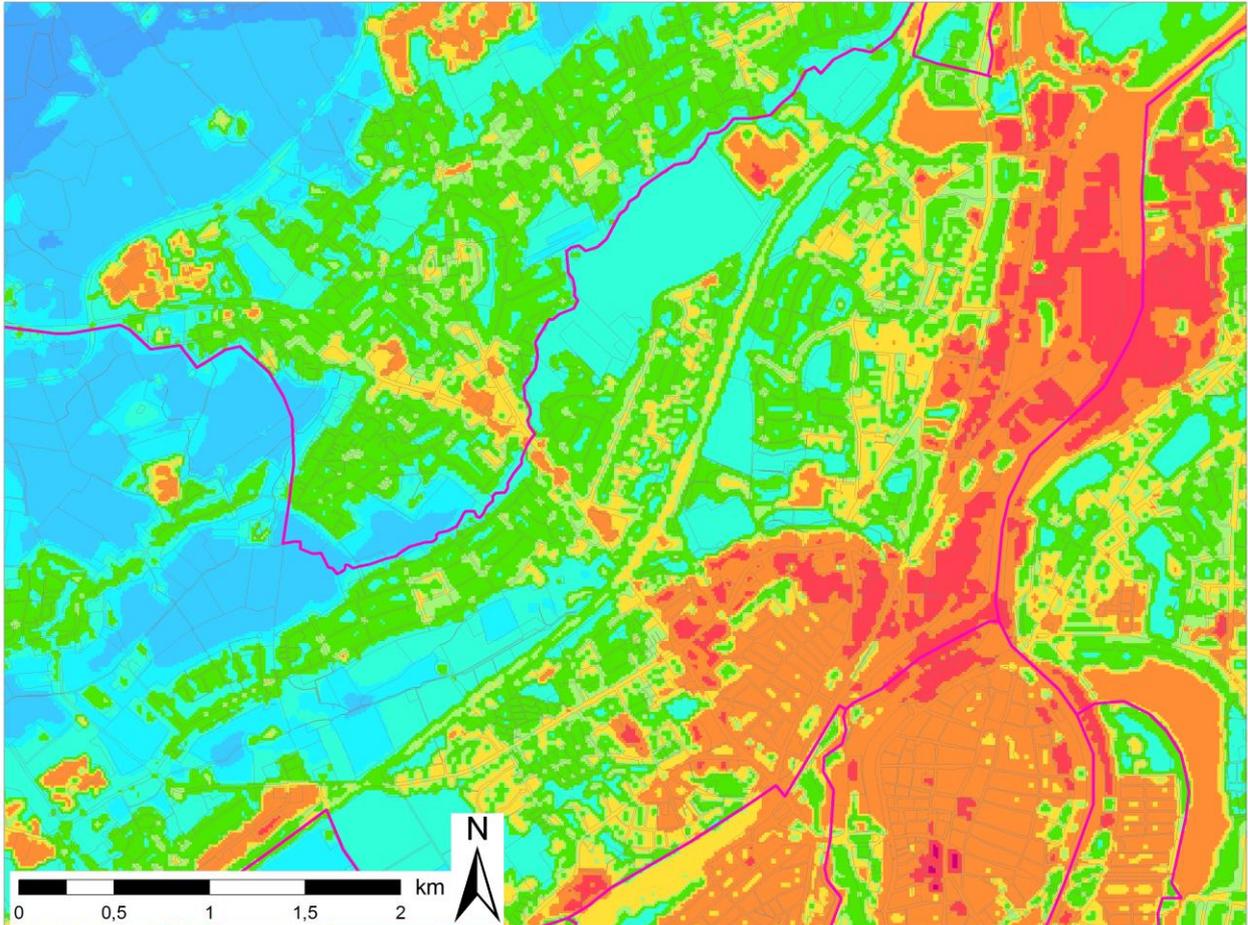
Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als 13 °C über Grün- und Freiflächen im Nordwesten und Südosten des Untersuchungsgebiets zu finden. Dort kommt es in den Nachstunden zu einer starken langwelligen Ausstrahlung und das recht kleinräumige Relief ermöglicht hier zudem die Bildung von Kaltluftansammlungen in Senken. Im eigentlichen Stadtgebiet sind es ebenfalls die am Stadtrand gelegenen Freiflächen, die mit Temperaturen unter 13,5 °C die niedrigsten Werte aufweisen.

Die Waldareale, die vor allem im Osten der Stadt Lübeck zu finden sind, besitzen ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau von großflächig 15 °C bis 16 °C. Hier dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur.

Verglichen mit den weitläufigen Grün- und Freiflächen des Umlandes weisen die innerstädtischen Grün- und Freiflächen, abhängig von ihrer Größe und Form, ein höheres Wertespektrum auf, welches meist zwischen

14° C und 17 °C beträgt. Über sehr kleineren Grün- und Freiflächen werden teilweise 17,5 °C nicht unterschritten. Hier wird deutlich, dass diese Flächen in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind und daher die vergleichsweise geringen Temperaturen des Umlandes nicht mehr erreicht werden.

### Lufttemperatur – Beispiel Lübeck-Mitte/-West



**Abb. 4.2:** Detail-Ausschnitt: Temperaturverteilung Lübeck-Mitte/-West  
(Legende siehe Abb. 4.1)

Einen Ausschnitt des Temperaturfeldes mit dem Bereich Lübeck-Mitte/Altstadt und den nordöstlich davon gelegenen Stadtgebieten sowie Stockelsdorf zeigt Abb. 4.2. Die stärkste Abkühlung auf 13 bis 14 °C (dunklere Blautöne) wird am westlichen Rand des Ausschnitts auf den Ackerflächen östlich von Stockelsdorf erreicht. In der direkt angrenzenden lockeren Wohnbebauung ist ein Temperaturniveau von 15 °C bis 17,5 °C anzutreffen (Grüntöne). Mit steigendem Überbauungsgrad nehmen die Temperaturen zu und betragen im Bereich der Gewerbegebiete rund um den Nordlandkai bis zu 19°C (rot).

Die höchsten Temperaturen über 19 °C werden im Süden der Altstadt Lübecks erreicht. Dort ist die Versiegelung nahezu vollständig und die Baustruktur von großen Häusern geprägt. Auch der restliche Teil der Altstadt und angrenzende dichter bebaute Gebiete weisen Temperaturen von 18 bis kleinfächig 19 °C auf.

Im betrachteten Ausschnitt lässt sich zwischen Vorwerker Friedhof (14 bis 15 °C; blaue Farbe) und dem Gewerbeareal am Nordlandkai (18,5 bis 19 °C; rote Farbe) ein maximaler Temperaturgradient von bis zu 5 °C auf einer Entfernung von etwa 1000 m beobachten.

## 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. Eine weitere wichtige Rolle spielt die Neigung einer Oberfläche. Sie beeinflusst, wie gut abgekühlte Luftpakete abfließen können. Dies ist vor allem für Waldbestände auf Hangbereichen bedeutend, während auf ebener Fläche die Bestandsränder den Luftaustausch eher behindern. (vgl. MOSIMANN et al. 1999) Die Abkühlungsrate hängt unter anderem 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 erhebliche Fehler aufweisen, 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 einer 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 Berechnung

Abb. 4.3 zeigt die durchschnittliche stündliche Kaltluftproduktionsrate für die hier betrachtete sommerliche Strahlungsnacht. Eine qualitative Einstufung der Werte erfolgte relativ zum Gebietsmittel der Produktionsrate.

Erwartungsgemäß zeigen die landwirtschaftlich genutzten Grün- und Freiflächen als effektive Kaltluftentstehungsgebiete große Kaltluftproduktionsraten. Die höchsten Kaltluftproduktionsraten sind in den größeren Senken des Untersuchungsgebiets zu finden, da sich hier die Kaltluft sammelt. Weniger Kaltluft wird in den Waldgebieten und den innerstädtisch gelegenen Grünflächen produziert.

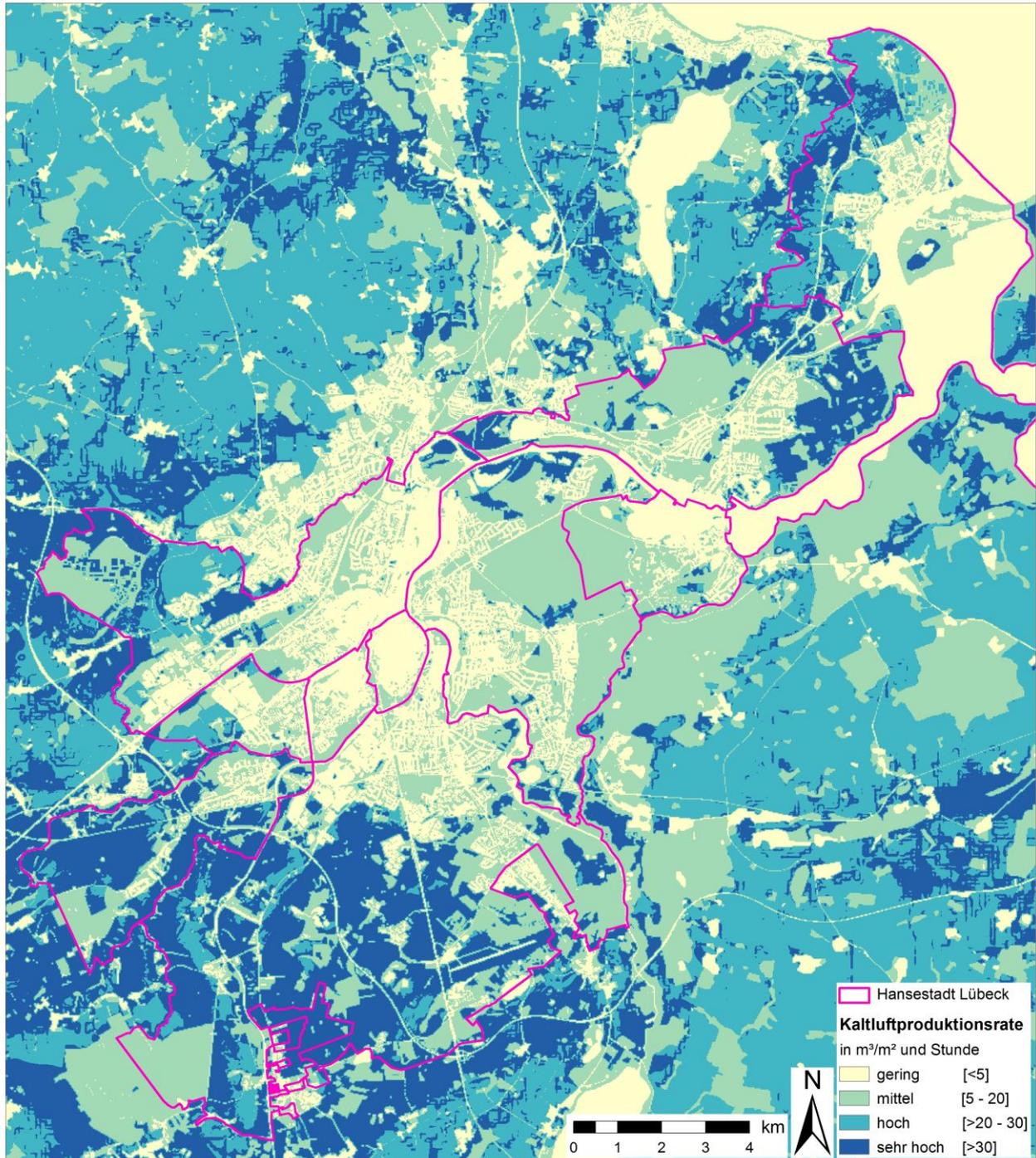


Abb. 4.3: Kaltluftproduktionsrate im Untersuchungsgebiet Lübeck

### 4.3 Das nächtliche Strömungsfeld

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Grün- und Freiflächen einstellen. An den geeigneten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. MOSIMANN et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt.

Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Grün- und Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 2.8). Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (vgl. KIESE 1988).

Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bebauung abgebremst wird. Die Flur-/ Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist unterhalb von  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (vgl. MOSIMANN et al. 1999).

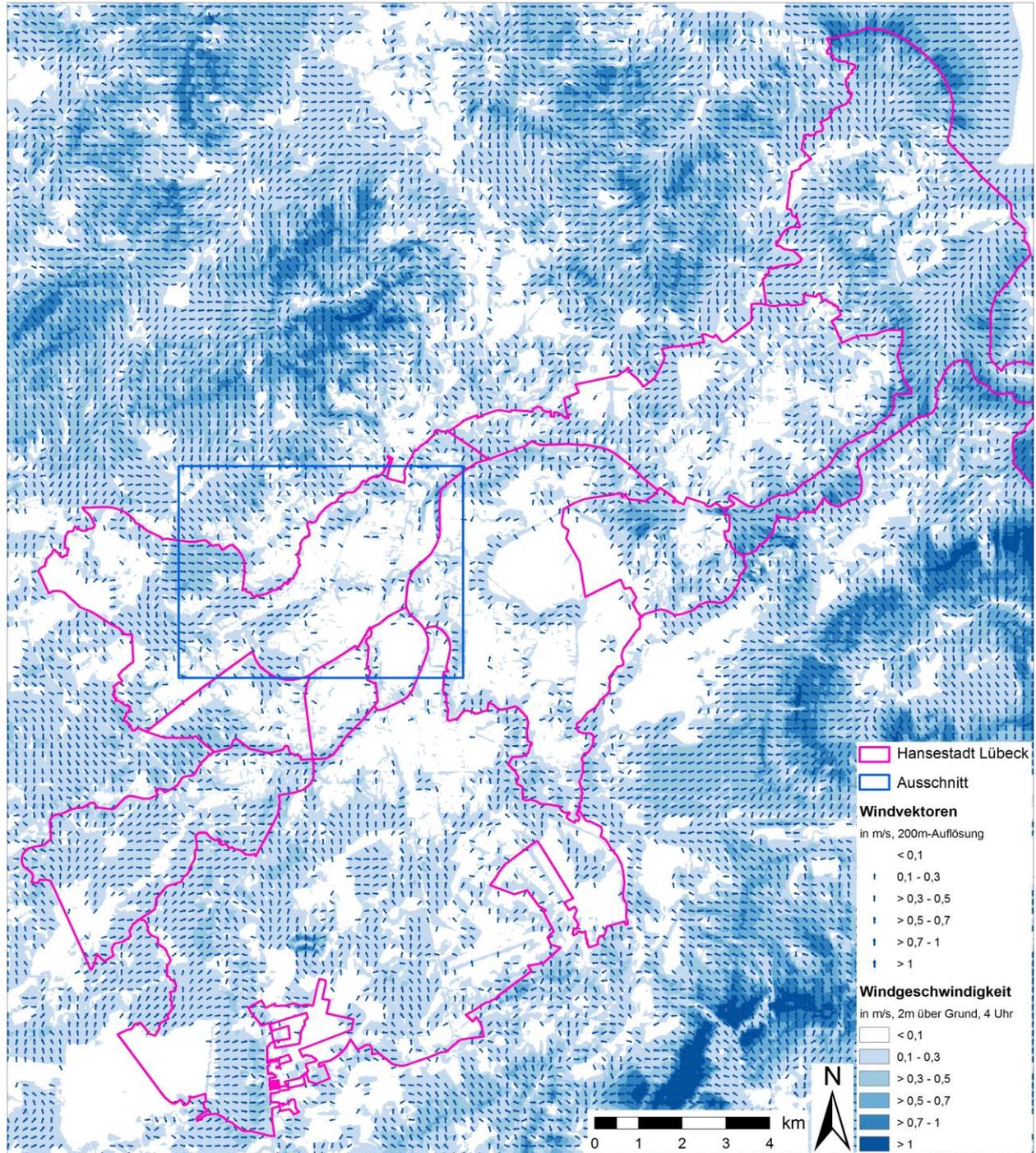
Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden. Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den großen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen.

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bauart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

## Ergebnisse Strömungsfeld

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

Die Abb. 4.4 stellt das zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  Kantenlänge aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen  $25 \text{ m}$  Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von  $\geq 0,1 \text{ m/s}$  und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.



**Abb. 4.4:** Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet Lübeck

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Untersuchungsraums reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von 1,7 m/s im südöstlichen Untersuchungsgebiet (dunkelblau). Überdurchschnittlich hohe Werte von mehr als 1 m/s sind auf den am stärksten geneigten Flächen den Hangbereichen im Untersuchungsgebiet im Nordwesten und vor allem im Südosten zu finden.

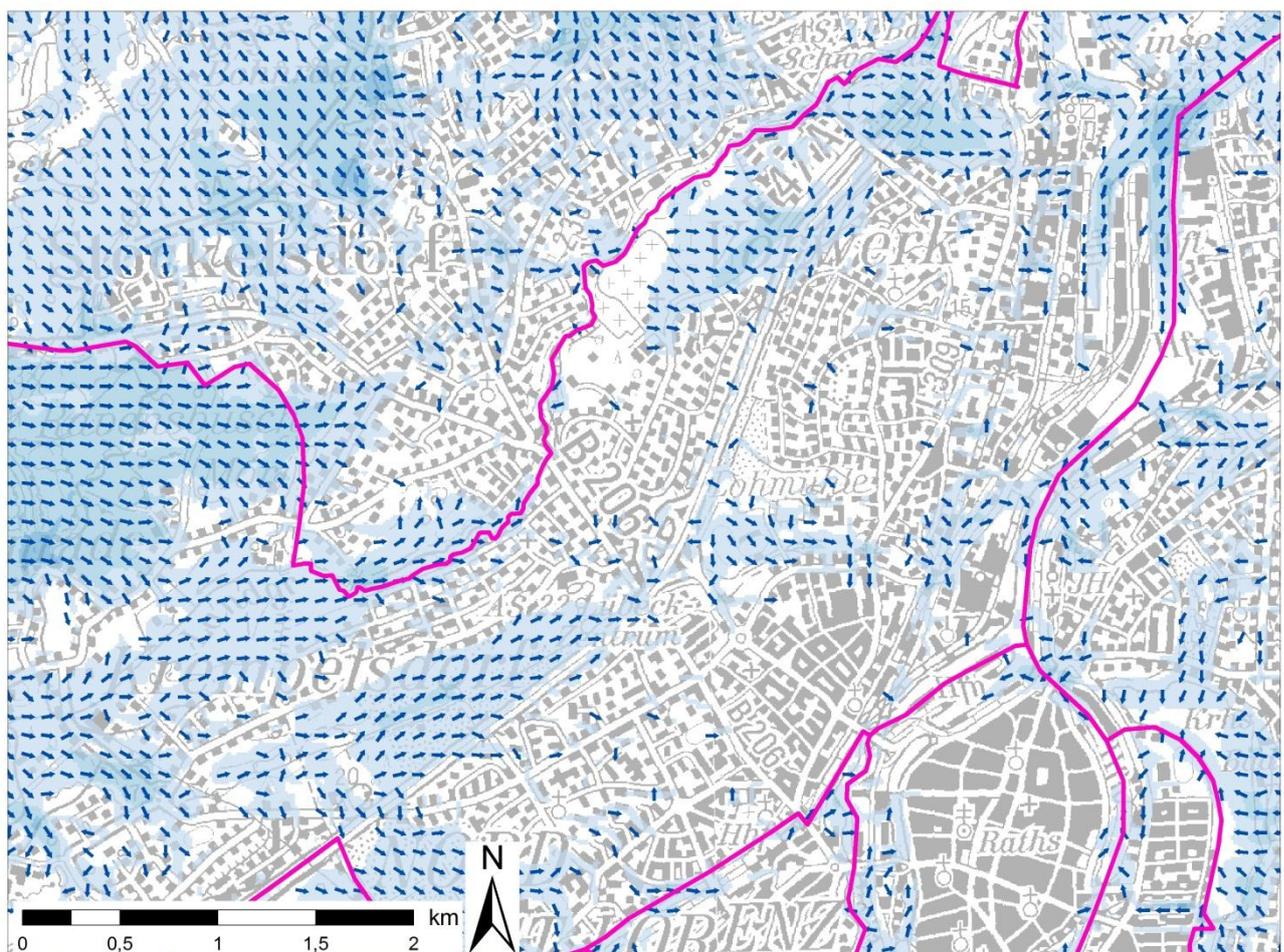
Auf Grund des sehr kleinräumigen Reliefs im durch eine Moränenlandschaft geprägten Untersuchungsgebiet kommt es auch zu kleinräumigen Veränderungen der Windrichtung. Außerdem kann sich über die rauigkeitsarmen Wasserflächen wie der Trave eine Windbewegung entwickeln.

Die Eindringtiefe der Kaltluft in die Siedlungsräume und damit auch das Maß der bioklimatischen Gunstwirkung während sommerlicher Hochdruckwetterlagen wird stark von der Bebauungsstruktur und der Intensität

der Kaltluftdynamik beeinflusst. Ganz allgemein wird eine vergleichsweise gering überbaute Einzel- und Reihenhausbauung besser durchströmt als eine Block- und Blockrandbauung. Die Spanne der Eindringtiefe variiert deutlich und beträgt, abhängig von den baustrukturellen und topologischen Bedingungen, zwischen wenigen Metern und 700 m. Eine intensive Durchlüftung von durchgrünten Siedlungstypen bewirkt hier die sehr günstigen und günstigen bioklimatischen Bedingungen (vgl. Kap. 3.3.2, S. 32). Gut durchströmt werden vor allem die kleinen Ortschaften im Umland Lübecks. Aber auch einige zum Stadtgebiet gehörende Einzel- und Reihenhausbauung können von einströmender Kaltluft profitieren. Hier ist beispielsweise der Stadtteil St. Lorenz zu nennen, der vor allem durch die größeren Windbewegungen von den nordwestlich gelegenen Erhöhungen profitiert. Gleiches gilt auch für das nicht zu Lübeck gehörende Stockeldorf.

Kaum durchlüftet werden die verdichteten Bereiche der Stadt Lübeck, so zum Beispiel die Altstadt und die angrenzenden Gebiete. Eine unterdurchschnittliche Durchlüftung weist auch St. Gertrud auf. Obwohl der Stadtteil größtenteils lockere Strukturen aufweist, dringt verhältnismäßig wenig Kaltluft in die Bebauung vor. Dies liegt hier vor allem an der Topographie, denn St. Gertrud befindet sich durchschnittlich ca. 5 m höher als die umgebenen Grün- und Freiflächen.

#### Kaltluftströmungsfeld – Beispiel Lübeck-Mitte/-West



**Abb. 4.5:** Windgeschwindigkeiten und Strömungsfeld im Vertiefungsraum Lübeck-Mitte/-West  
(Legende siehe Abb. 4.4)

In Abb. 4.5 ist ein Ausschnitt des Strömungsfelds zu sehen. Gut zu erkennen ist das Einströmen der Kaltluft zwischen die Bebauung über Grün- und Freiflächen. In diesem Fall handelt es sich zum einen um die landwirtschaftlichen Flächen entlang des Landgrabens und zum anderen um die Kleingärten des Vereins KGV Holstentor Nord e.V.. Hier ist auch gut zu erkennen, wie die Strömung über die A1 hinweg bis zum Stadion

an der Lohmühle und den dort im Osten angrenzenden Freiflächen weiterführt und so kühlere Luft aus dem Umland bis in stärker verdichtete Gebiete transportiert. Darüber hinaus lassen sich die Windbewegungen über den rauigkeitsarmen Wasserflächen rund um die Altstadt beobachten. Auf Grund der dichten Baustrukturen, kann hier allerdings nur ein geringes Einströmen in die Bebauung erfolgen.

Im Norden des Ausschnitts ist das Einströmen der Kaltluft in die lockere Bebauung von Stockelsdorf gut zu erkennen. Der Kaltluftstrom ist hier stark ausgeprägt, da zu den thermisch bedingten Luftbewegungen die Kaltluftabflüsse von den nordwestlich gelegenen Hängen den Luftaustausch ergänzen. Auch hier wird die Luft über den Tremser Teich und die umgebenen Grünflächen weiter geleitet bis zu den östlich davon gelegenen Industriegebieten.

#### 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 25 m). Der Kaltluftvolumenstrom ist damit ein Maß für die Menge an Kaltluft die aus einer Gitterzelle des Modells ausströmt. Als Mittelwert für eine Grün- oder Freifläche ist der Kaltluftvolumenstrom damit ein Maß für die Kaltluftlieferung dieser Fläche. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 04 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist.

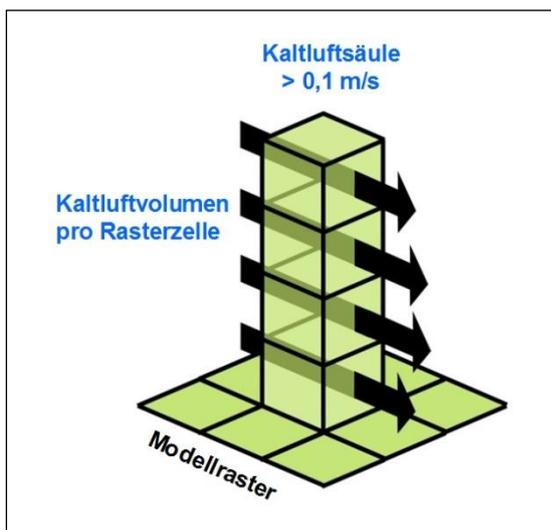


Abb. 4.6: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man somit, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $m^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-dichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 25 m breites, quer zur Luftströmung hängendes

Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>5</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 4.6). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den *Zustrom von Kalt-*

<sup>5</sup> Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wird

luft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

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 und damit deren Volumenstrom hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt wesentlich von der Bebauungsdichte und -höhe, aber auch der anthropogenen Wärmezufuhr ab. Darüber hinaus können natürliche Hindernisse wie zum Beispiel dichte Waldbestände einen abbremsenden Einfluss ausüben. Ebenso tragen natürliche Wärmequellen wie z.B. Wasseroberflächen zu einer Erwärmung der Kaltluftschicht bei und beeinflussen so die Ausgleichsströmungen.

Gebäude, Mauern, Straßendämme oder Lärmschutzwände können als Strömungshindernisse und luvseitig einen markanten Kaltluftstau auslösen. Bei einer mesoskaligen Rasterzellenweite von 25 m x 25 m werden kleinräumige Hindernisse wie z.B. Lärmschutzwände nicht explizit abgebildet. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass mächtigere Kaltluftschichten, die sich erst im Laufe einer Nacht ausbilden, lokale Hindernisse über- oder umströmen.

### **Ergebnisse Kaltluftvolumenstrom**

Ausgehend von der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mehr als 300 m<sup>3</sup>/s angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen Volumenstrom aufweisen.

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abb. 4.7 zeigt den Kaltluftstrom für das gesamte Stadtgebiet in einer qualitativen Abstufung.

Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte vor allem über den Hangbereichen im Südosten und Nordwesten des Untersuchungsgebiets auf. Durch eine Strömungskanalisation und über rauigkeitsarmen Untergrund können die Werte auch kleinräumig auf eine hohe bis sehr hohe Stufe ansteigen.

In weiten Teilen des übrigen Untersuchungsraums ist ein mäßiger Volumenstrom anzutreffen. In den unterdurchschnittlich durchlüfteten Siedlungsflächen liegt dagegen ein geringer Kaltluftvolumenstrom vor. Das bedeutet, dass ein Großteil der zentral gelegenen Siedlungsbereiche davon betroffen ist. Die Eindringtiefe des von Kaltluft produzierenden Flächen ausgehenden Volumenstroms entspricht in etwa der des Kaltluftströmungsfeldes.

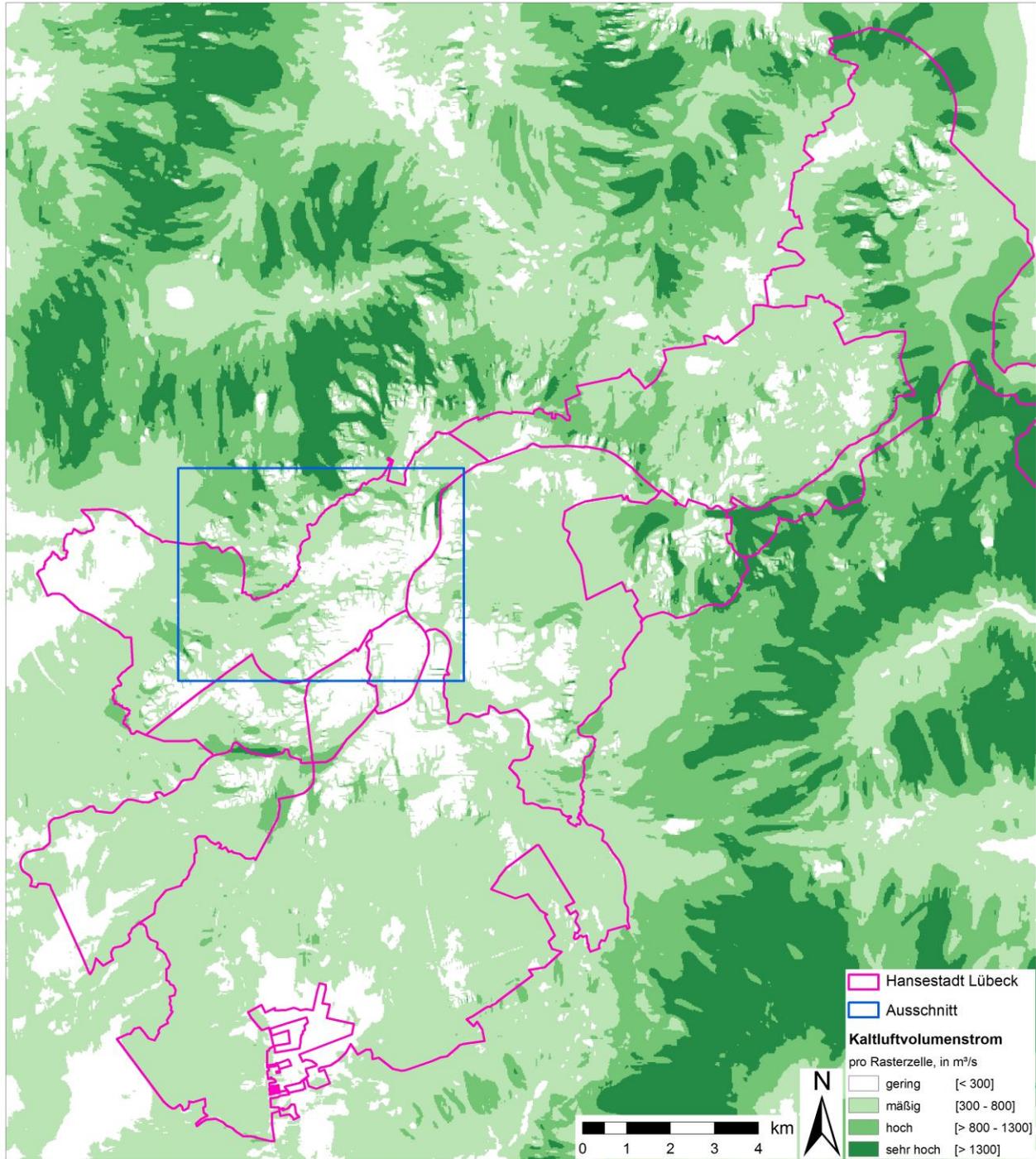


Abb. 4.7: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens im Untersuchungsgebiet Lübeck

### Kaltluftvolumenstrom – Beispiel Lübeck-Mitte/-West

Der Kaltluftvolumenstrom im Bereich Lübeck-Mitte/-West wird in Abb. 4.8 dargestellt. Deutlich wird der recht große Kaltluftzufluss aus dem Norden und Nordwesten des Ausschnitts. Auch hier wird das Vordringen der Kaltluft über die Grün- und Freiflächen deutlich. Auf Grund der Integration mit der Höhe kann ein Kaltluftvolumenstrom auch weiter innerhalb der Siedlungsflächen im Dachniveau vorhanden sein, während bodennah in 2 m über Grund keine Durchströmung mehr stattfindet. Im verdichteten Stadtkern Lübecks kann die Kaltluft über den Straßenraum an einigen Stellen eindringen, was auf den hohen Temperaturgradienten als „Antrieb“ für den Luftaustausch zurückzuführen ist. Kaum oder gar kein Kaltluftvolumenstrom ist in den stärker verdichteten Stadtgebieten vorhanden.

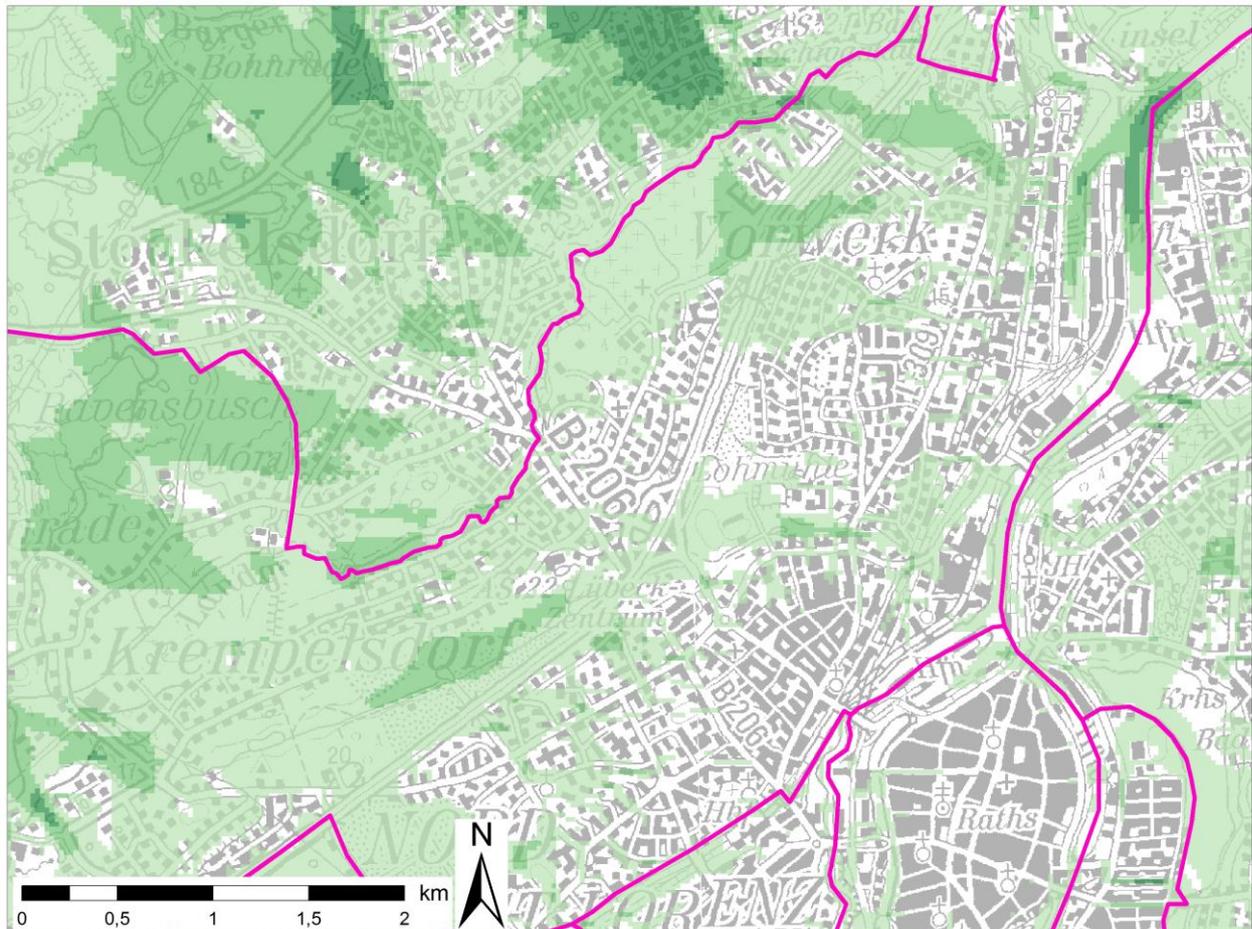


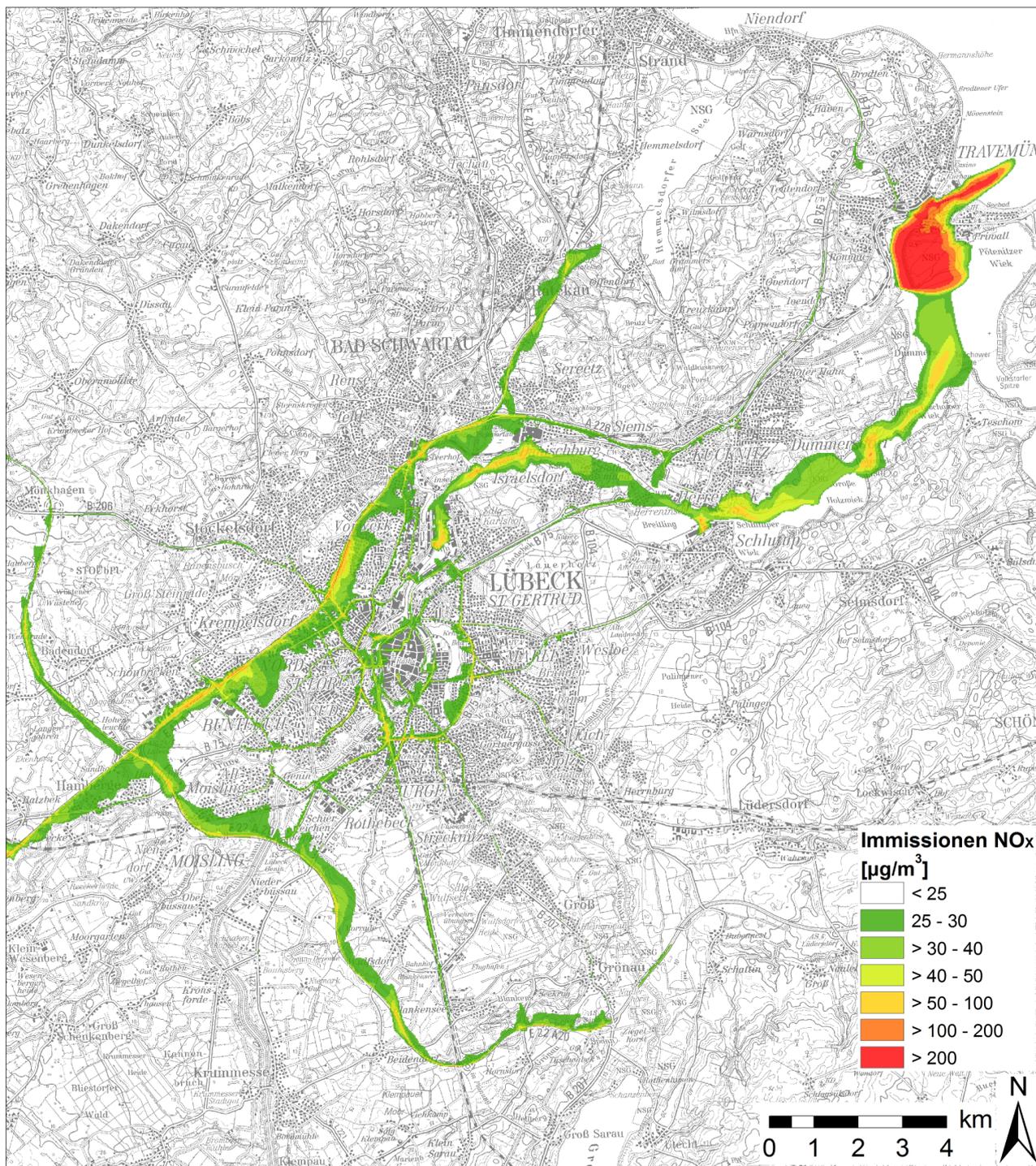
Abb. 4.8: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens in Lübeck-Mitte/-West

#### 4.5 Lufthygienische Belastung im Untersuchungsgebiet

Für das Ziel, die lufthygienische Belastung so gering wie möglich zu halten, stellen austauscharme Wetterlagen ein besonderes Problem dar. Die Durchmischung der Luft ist während solcher Wetterlagen mehr oder weniger stark eingeschränkt, was wegen der vielfach auftretenden Inversionen hauptsächlich für die vertikale, aufgrund des schwachen Windes aber auch für die horizontale Richtung gilt. Halten austauscharme Wetterlagen, insbesondere im Herbst und Winter, über längere Zeit an, können sich Schadstoffe in Bodennähe anreichern und die Überschreitungen Immissionsgrenzwerte verursachen.

Eine spezielle Situation ergibt sich während der durch Kaltluftbildung und Ausgleichsströmungen beeinflussten Nachtstunden. Die Kaltluft kann sich dabei positiv oder negativ auf die lufthygienische Situation auswirken: Zunächst einmal bildet die vom Boden her abkühlende Luft eine stabile vertikale Schichtung aus, die mit einer geringen turbulenten Diffusion und einer eingeschränkten Verdünnung von bodennah emittierten Luftschadstoffen einhergeht. Dieser Effekt kann noch deutlich verstärkt werden, wenn die Schadstoffe innerhalb von stagnierenden Kaltluftschichten freigesetzt werden. Ist die kaltluftproduzierende Fläche frei von Emittenten, weist die Kaltluft die Qualität der Grundbelastung auf und kann als Frischluftstrom zu einer Verbesserung der Luftqualität in höher belasteten Räumen beitragen. Führt der Strömungsweg der Kaltluft über Emissionsquellen hinweg in die Siedlungsräume hinein, werden die Luftbeimengungen in mitunter quellferne Flächen transportiert und verursachen dort, insbesondere in Stau-Bereichen, eine signifikante Erhöhung der Luftschadstoffbelastung.

### Ergebnisse Immissionsrechnung



**Abb. 4.9:** Konzentration von NO<sub>x</sub> im Untersuchungsgebiet während einer autochthonen Wetterlage (Hintergrundbelastung: 21 µg/m<sup>3</sup>)

Bei der Interpretation der Modellergebnisse müssen zahlreiche Einschränkungen beachtet werden. Beispielsweise werden größere Strömungshindernisse wie Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst, sondern gehen entsprechend parametrisiert durch die Definition der Nutzungsklassen in die Modellierung ein. Sie werden daher je Rasterzelle lediglich über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe repräsentiert. Spezielle lufthygienisch bedeutsame Konstellationen wie etwa Straßenschluchten können auf diese Weise nicht hinreichend abgebildet werden. Die berechnete Ausbreitungssituation ist somit nicht einfach auf reale Immissionsbedingungen zu übertragen. Die Schadstoffbelastung wird im Rahmen der eingesetzten Methodik

hauptsächlich durch die Emissionsmenge und die modellierte Strömung bestimmt und ist geeignet, Siedlungsbereiche zu identifizieren, in denen bei autochthonen Wetterlagen mit erhöhten Luftschadstoffbelastungen zu rechnen ist. Abb. 4.9 veranschaulicht die Konzentration von  $\text{NO}_x$  im Untersuchungsgebiet.

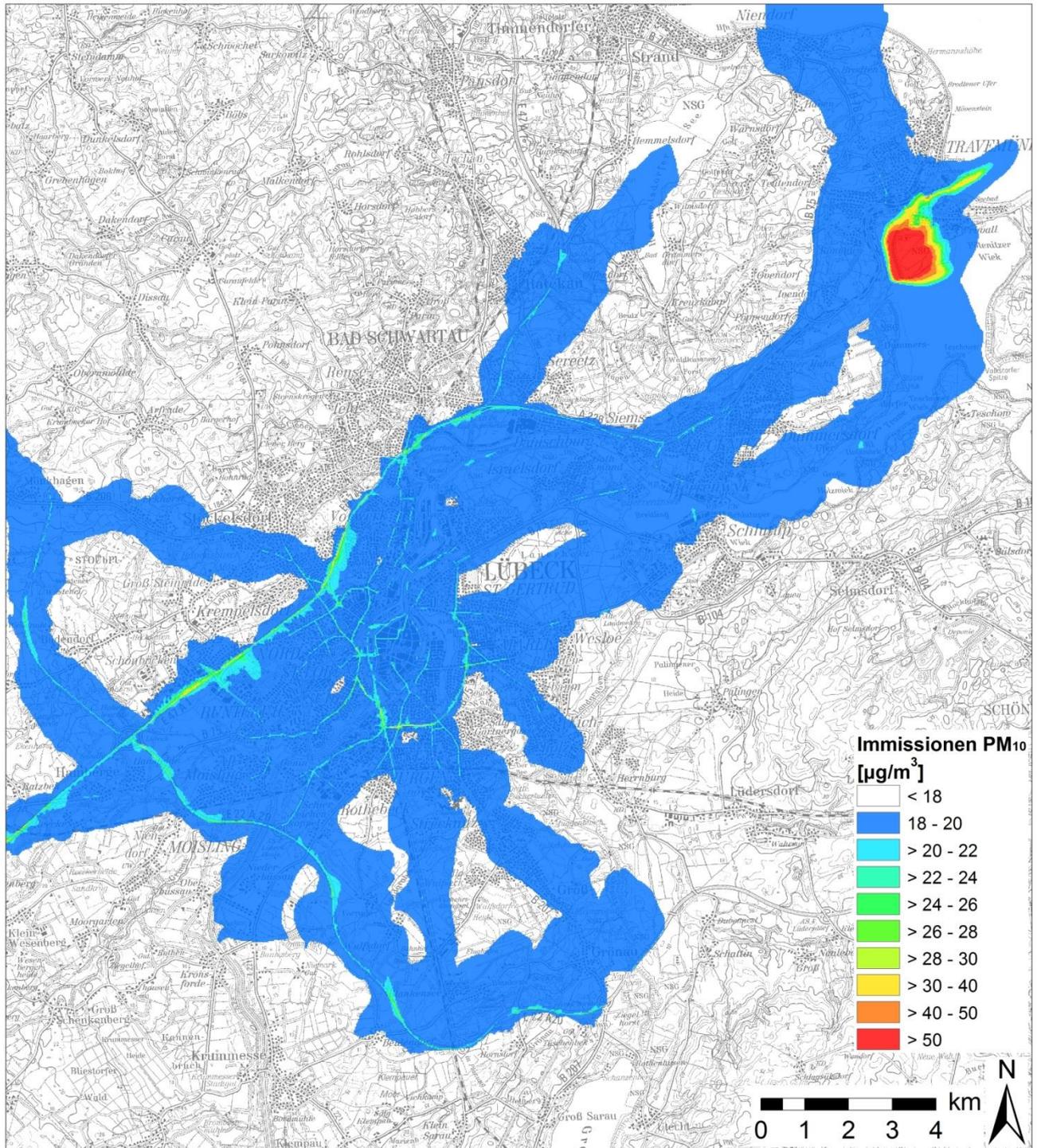
Die Situation der Belastung mit  $\text{NO}_x$  in Lübeck um vier Uhr morgens während einer autochthonen Wetterlage stellt sich größtenteils als unproblematisch dar. Geht man pessimistisch davon aus, dass die mit der Kaltluftströmung verdrifteten Stickoxide ausschließlich aus dem beurteilungsrelevanten  $\text{NO}_2$  bestehen, sind durch die Schiffsemissionen Überschreitungen des Stunden-Immissionswertes gemäß 39. BImSchV (2010) von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu erwarten.

Die höchsten Werte sind im Bereich der Wasserstraßen durch die Schiffsemissionen zu vermerken. Im Bereich des Skandinavienkais, wo auf Grundlage des TÜV-Gutachtens (vgl. TÜV NORD 2014) ein Schiffsbetrieb auch nachts angenommen wurde, kommt es zu den größten Immissionskonzentrationen. Die hier modellierten Werte liegen zum Teil weit über dem Stundengrenzwert. Der betroffene Bereich umfasst allerdings unbebaute Bereiche und Wasserflächen, so dass kaum Siedlungen direkt betroffen sind. Weiter die Trave hinunter nimmt die Belastung durch Schiffsemissionen stark ab. Da die Emissionswerte über den Skandinavienkai hinaus nur näherungsweise bestimmt werden konnten, sind insbesondere die hier ermittelten Werte nur als grobe Richtwerte zu sehen.

Die größten Belastungen mit  $\text{NO}_x$  durch Autoverkehrsemissionen sind im Bereich der Autobahnen, insbesondere der A1, zu verzeichnen. Hier treten insbesondere die Autobahnkreuze Lübeck-Zentrum und Lübeck-Moisling hervor. Hier reichen die Werte zwar punktuell in die Nähe des Grenzwerts, überschreiten ihn aber nicht. In Lübeck liegt ein Gutachten des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein vor, das orientierende Luftschadstoffmessungen für Stickstoffdioxid in Lübeck im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 beschreibt. Direkt lassen die dort ermittelten Werte nicht mit den in dieser Klimaanalyse ermittelten Werten vergleichen. Zu Grenzwertüberschreitungen kommt es nach den Messungen des Landesamts bei den Jahresgrenzwerten für  $\text{NO}_2$  im Bereich der Fackenburger Allee. (LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (2013))

Abb. 4.10 zeigt die Verteilung der  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration um vier Uhr im Untersuchungsgebiet während einer autochthonen Strahlungswetterlage. Die Werte zeigen für die durch den Straßenverkehr entstehenden Emissionen eine sehr geringe Ausprägung weit entfernt vom Tagesgrenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Bereich der Auffahrten auf die A1 weist analog zu den  $\text{NO}_x$ -Werten die größte Ausprägung auf.

Bei der Betrachtung der Schiffsemissionen wird deutlich, dass es im Bereich des Skandinavienkais eine Überschreitung des Tagesgrenzwertes von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  kommt. Der Bereich der Grenzwertüberschreitungen ist recht klein ausgeprägt und betrifft auch hier keine Wohnbebauung. Es ist davon auszugehen, dass diese Grenzwertüberschreitungen von  $\text{NO}_x$  und  $\text{PM}_{10}$  vor allem auf die spezielle autochthone Wetterlage zurück zu führen ist.



**Abb. 4.10:** Konzentration von PM<sub>10</sub> im Untersuchungsgebiet während einer autochthonen Wetterlage (Hintergrundbelastung: 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

## 5 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte fasst als erstes Teilergebnis dieser Untersuchung die klimaökologisch relevanten Strukturen zusammen, die für das Stadtgebiet von Lübeck 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 belastete Siedlungsräume (**Wirkungsräume**) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (**Ausgleichsräume**). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen, kann ein Kaltlufttransport vom Ausgleichs- zum Wirkungsräum über gering bebaute Grün- und Freiflächen erfolgen. Finden diese Luftaustauschprozesse in deutlicher Ausprägung über Grün- und Freiflächen mit begrenztem Querschnitt statt, 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 Lübeck. Neben einer Abgrenzung der Funktionsräume, ist die qualitative Bewertung der einzelnen klimatischen Funktionsräume eine Kernaussage der Klimafunktionskarte:

- Einteilung der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsräume) entsprechend ihres Kaltluftliefervermögens
- Klassifizierung der Siedlungsräume (Wirkungsräume) entsprechend ihrer bioklimatischen Belastung
- Bewertung lokaler und regionaler Luftaustauschströmungen

Die Klimafunktionskarte bildet dabei den planungsrelevanten Ist-Zustand 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 Grün- und Freiflächen

Vegetationsgeprägte Grün- und 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 nur dann von Relevanz, wenn ein Transport der Kaltluft zu den Siedlungsbereichen erfolgen kann. Ein Maß für den Transport von Kaltluft ist der Kaltluftvolumenstrom. Die Gesamtfläche der Kaltluft produzierenden Grün- und Freiflächen im Untersuchungsgebiet Lübeck beziffert sich auf etwa 47613 Hektar, was einem Flächenanteil von rund 74% des Untersuchungsgebiets entspricht. Im Stadtgebiet Lübeck liegen davon ca. 12579 ha. Dies entspricht annähernd 59% des Stadtgebiets. Unter dem Begriff Grün- und Freiflächen sind in diesem Bericht öffentliche und halböffentliche Flächen mit überwiegendem Grünbewuchs wie Parkanlagen, Sportplätze, Friedhöfe, Kleingartenanlagen, landwirtschaftliche genutzten Flächen, Wälder und bewachsene Brachflächen sowie größere Grünzüge zusammengefasst. Die privaten Hausgärten und halböffentlichen Grünflächen von Wohnsiedlungen finden sich hier nicht wieder, da sie in der hier ausgewerteten Bezugsgeometrie nicht enthalten sind. Sie wurden zwar auf Rasterebene in der Modellierung des Klimas soweit möglich berücksichtigt, sind ansonsten aber den Siedlungsflächen, in denen sie lokalisiert sind, zugeordnet. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

Für die Klimafunktionskarte werden Grün- und Freiflächen ausschließlich hinsichtlich ihres Liefervermögens von Kaltluft charakterisiert. Bewertungskriterium ist der Volumenstrom als Maß für den Zustrom von Kaltluft aus benachbarten Flächen. Die Bewertung der Grün- und Freiflächen erfolgt auf Grundlage einer qualitativen Einordnung der Kaltluftvolumenströme in 4 Klassen (s. Kap. 3.3.1). Tab. 5.1 fasst die ausgewiesenen Kategorien zusammen.

Kaltluftlieferung Untersuchungsgebiet	Untersuchungsgebiet		Stadtgebiet	
	Flächengröße [ha]	Anteil am Grün- und Freiflächenbestand [%]	Flächengröße [ha]	Anteil am Grün- und Freiflächenbestand [%]
Sehr hoch	8029	16,9	172	1,4
Hoch	13362	28,1	1125	8,9
Mäßig	23204	48,7	10046	79,9
Gering	3019	6,3	1237	9,8

**Tab. 5.1:** Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grün- und Freiflächen im Untersuchungsgebiet und im Stadtgebiet Lübeck

Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den in der Flächennutzungstypenkartierung ausgewiesenen Grün- und Freiflächen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Kaltluftvolumenstrom und Kaltluftproduktionsrate zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe von zonalen Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die unter anderem die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der flächen-spezifischen Werteausprägungen umfasst.

Die qualitative Zuordnung der Flächen spiegelt also lediglich deren gemittelte durchschnittliche Kaltluftlieferung wieder. Auf Grund der unterschiedlichen Größen und der Lage der Flächen kann es daher dazu kommen, dass angrenzende Flächen unterschiedlich eingestuft werden. Die Einstufung der Kaltluftlieferung dient zum Verständnis der Luftaustauschprozesse und nicht zur Beurteilung der Relevanz der Flächen für die Planung. Die stadtklimatische Bedeutung der Grün- und Freiflächen wird in der Planungshinweiskarte dargestellt und berücksichtigt zudem die bioklimatische Situation in den Siedlungsräumen.

In Lübeck spielt neben den Grünflächeneigenschaften und den thermisch bedingten Luftbewegungen auch das kleinräumige Relief eine wichtige Rolle bei der Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms. So sind die Flächen mit einem sehr hohen Kaltluftvolumenstrom vor allem im Nordwesten und Südosten des Untersuchungsgebiets mit den größten Erhebungen zu finden. Hier entwickelt sich auf den Frei- und Ackerflächen jeweils in Hangneigungsrichtung ein sehr hoher Kaltluftvolumenstrom. Von diesen überdurchschnittlich hohen Werten profitieren die angrenzenden Siedlungen, da sie besonders gut durchströmt werden. Hier ist zum Beispiel Stockelsdorf im Norden der Hansestadt Lübeck zu nennen, wo die Kaltluft bis zu 700 m und mehr in die Bebauung vordringen kann. Die Flächen mit einer sehr hohen Kaltluftlieferung befinden sich zum größten Teil außerhalb des Stadtgebiets. Insgesamt sind 16,9% der Grün- und Freiflächen im Untersuchungsgebiet mit einem sehr hohen Kaltluftvolumenstrom ausgestattet. Im Stadtgebiet sind es lediglich 1,4% der Flächen (siehe Tab. 5.1).

Flächen mit einer hohen Kaltluftlieferung sind zumeist im Verbund mit Flächen sehr hoher Kaltluftlieferung zu finden. Es handelt sich vor allem um landwirtschaftliche Flächen. Zudem weisen auch einige kleinere Waldflächen auf geneigtem Gelände eine hohe Kaltluftlieferung auf, da hier ein Kaltluftabfluss aus dem Bestand heraus erfolgen kann. In ebener Lage kann die Kaltluft allerdings schlechter abfließen, die im Kronenbereich gebildete Kaltluft sinkt in den Stammraum ab und verbleibt dort im Wesentlichen. Aus diesem Grund sind die Waldflächen im östlichen Stadtgebiet Lübecks mit nur mäßiger Kaltluftlieferung ausgestattet. Ebenso weist

die recht ebene Fläche im Südwesten des Untersuchungsgebiets großflächig einen mäßigen Kaltluftvolumenstrom auf, da hier die Komponente Relief wegfällt. Auch innerstädtische Grünareale wie zum Beispiel die Parkflächen am Stadtgraben und am Mühlen- und Krähenteich oder der Stadtpark fallen in die Klasse. Auf Grund der Lage im Stadtgebiet ist die Ausgleichsleistung dieser Flächen ebenfalls als klimaökologisch relevant einzustufen. Insgesamt weisen im Untersuchungsgebiet 13362 ha (28,1%) des Grün-/Freiflächenbestands eine hohe Kaltluftlieferung und 23204 ha (48,7%) des Grün- und Freiflächenbestands eine mäßige Kaltluftlieferung auf. Im Stadtgebiet sind es 8,9% mit hoher Kaltluftlieferung und 79,9% mit mäßiger Kaltluftlieferung.

Darüber hinaus sind die kleineren Grün- und Freiflächen wie zum Beispiel kleine Stadtteilparks oder nicht überbaute Ruderalflächen mit geringer Größe und geringem Kaltluftvolumenstrom zu nennen. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkungsbereich aus, da sie in eine insgesamt wärmere Bebauung eingebettet sind. Durch die isolierte Lage in der Bebauung weisen sie zudem keine Anbindung an vorhandene Leitbahnen auf. Innerhalb von Waldflächen handelt es sich um kleinere Gebiete mit unterdurchschnittlicher Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft im Stammraum, was mit entsprechend geringen Werten einhergeht. Einen sehr geringen Kaltluftvolumenstrom weisen mit 3019 ha etwa 6,3% der Grün- und Freiflächen im Untersuchungsgebiet auf. Im Stadtgebiet sind es 9,8% der Flächen.

Innerhalb von Belastungsbereichen können aber auch diese Flächen eine bedeutsame Funktion als klimaökologische Komfortinseln erfüllen. Sie wirken als „Klimaoasen“, wenn sie in klimatisch ungünstigen Siedlungsgebieten liegen. Während sommerlicher Hochdrucklagen mit intensiver Einstrahlung und Wärmebelastung erfüllen am Tage auch diese kleinen innerstädtischen Grün- und Freiflächen 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.

Die Hansestadt Lübeck weist auf Grund der großen landwirtschaftlichen Flächen und Waldgebiete im Umland eine gute Frei- und Grünflächenausstattung auf. Der Stadtkern ist allerdings sehr kompakt, so dass dieses Gebiete und einige angrenzende Wohnsiedlungen in den Stadtteilen St. Lorenz Nord und –Süd sowie St. Jürgen einen geringen Freiflächenanteil aufweisen. Umso wichtiger sind deshalb auch kleinere, öffentlich zugängliche Grün- und Freiflächen wie beispielsweise die Parks entlang des Stadtgrabens und entlang der Trave.

Unterschiedliche Struktureigenschaften der Grün- und Freiflächen führen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Kaltluftdynamik. Die einzelnen (Teil-) Areale innerhalb eines Kaltlufteinzugsgebietes besitzen in ihrer Summenwirkung eine Entlastungsfunktion für benachbarte und weiter entfernte Siedlungsräume.

Abb. 5.1 zeigt einen Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte. Zusätzlich zum Kaltluftvolumenstrom sind in der Abbildung auch kleine Strömungspfeile dargestellt, die die Richtung und Geschwindigkeit der Kaltluftströmung verdeutlichen. Dargestellt wird jeweils ein Strömungspfeil pro Fläche.

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

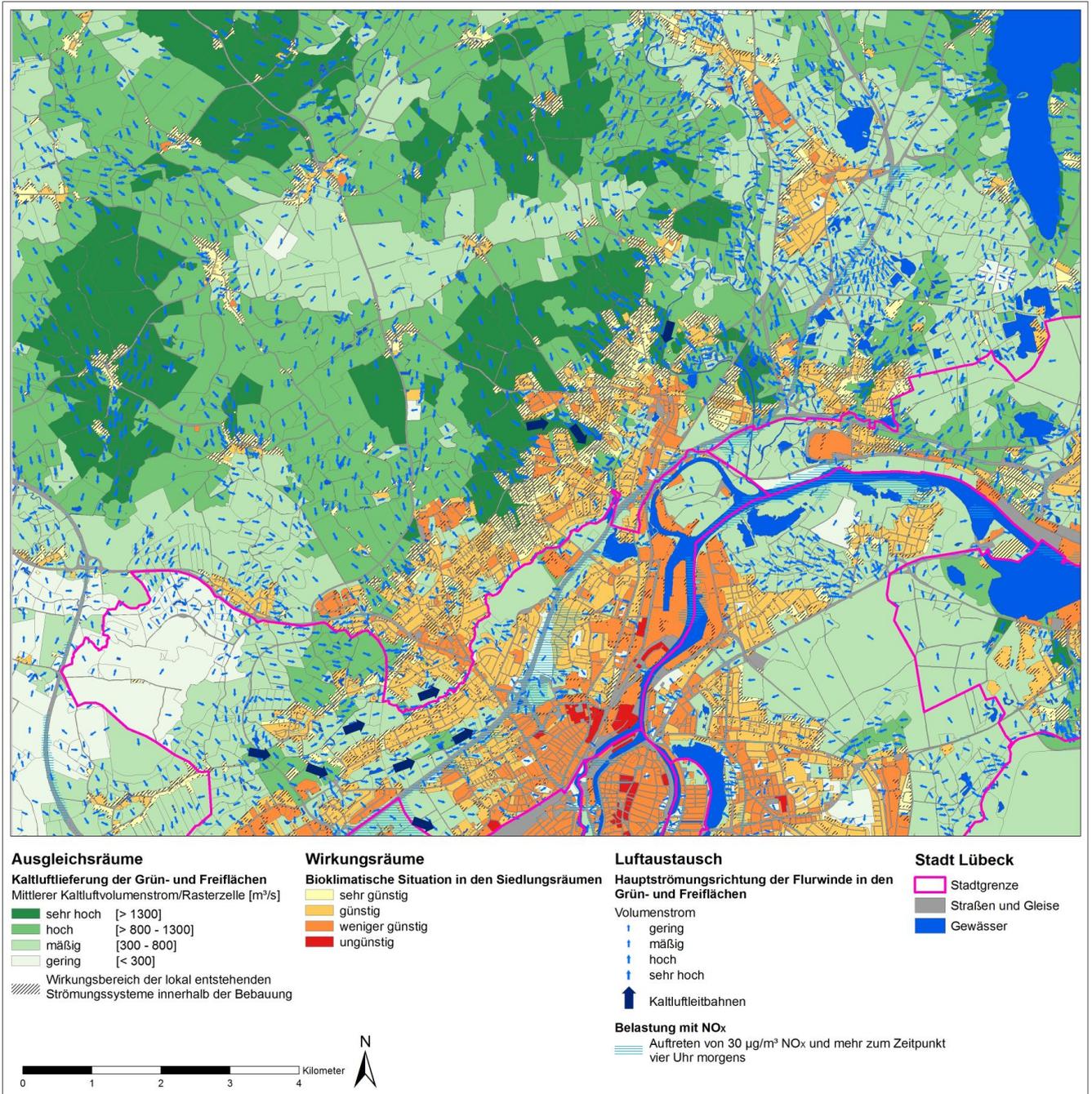
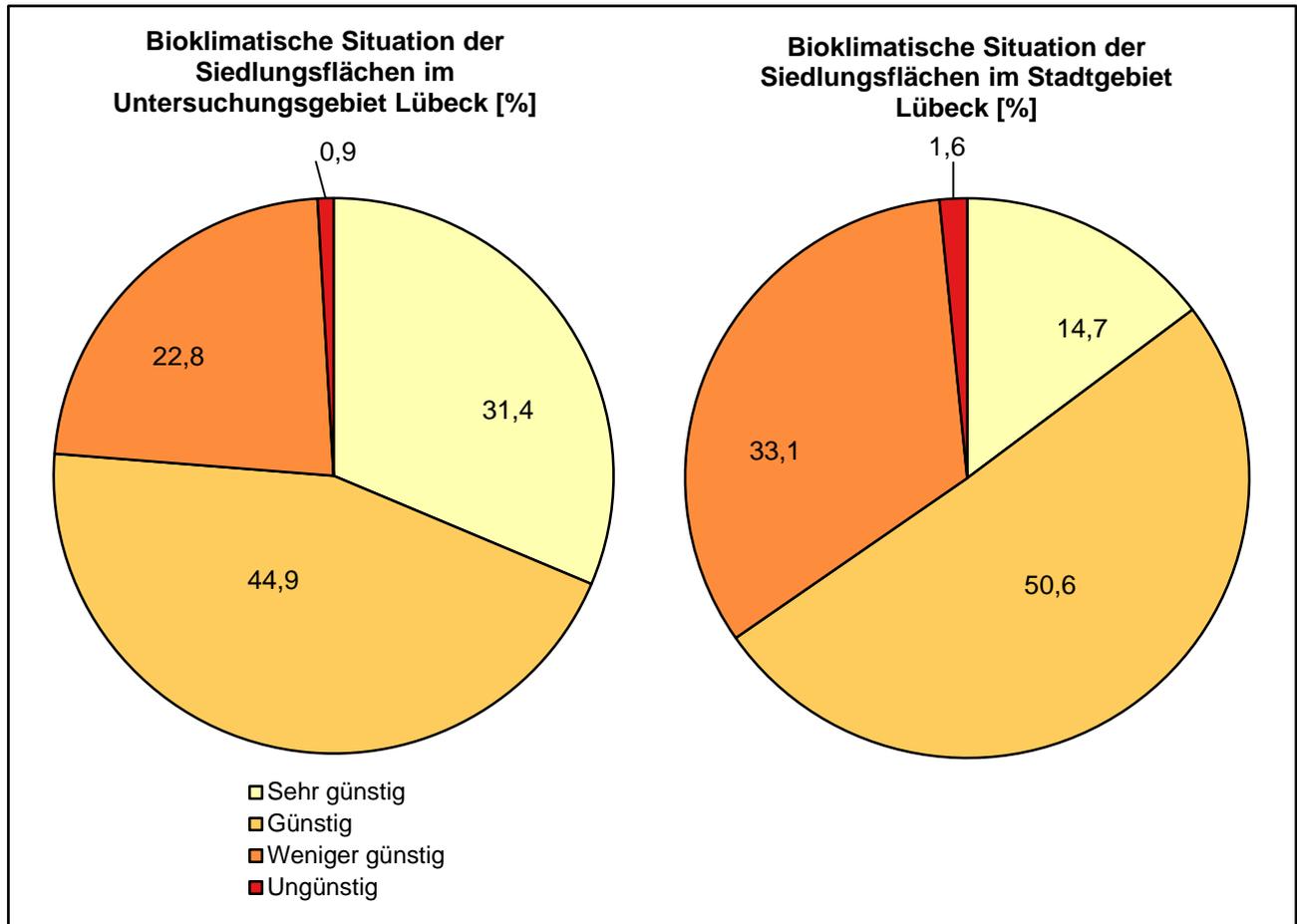


Abb. 5.1: Ausschnitt Klimafunktionskarte

## 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 günstigere Bereiche untergliedert (s. Kap. 3.3.2). Abb. 5.2 zeigt die Verteilung der bioklimatischen Situation auf die Siedlungsflächen im Untersuchungs- und im Stadtgebiet Lübecks:



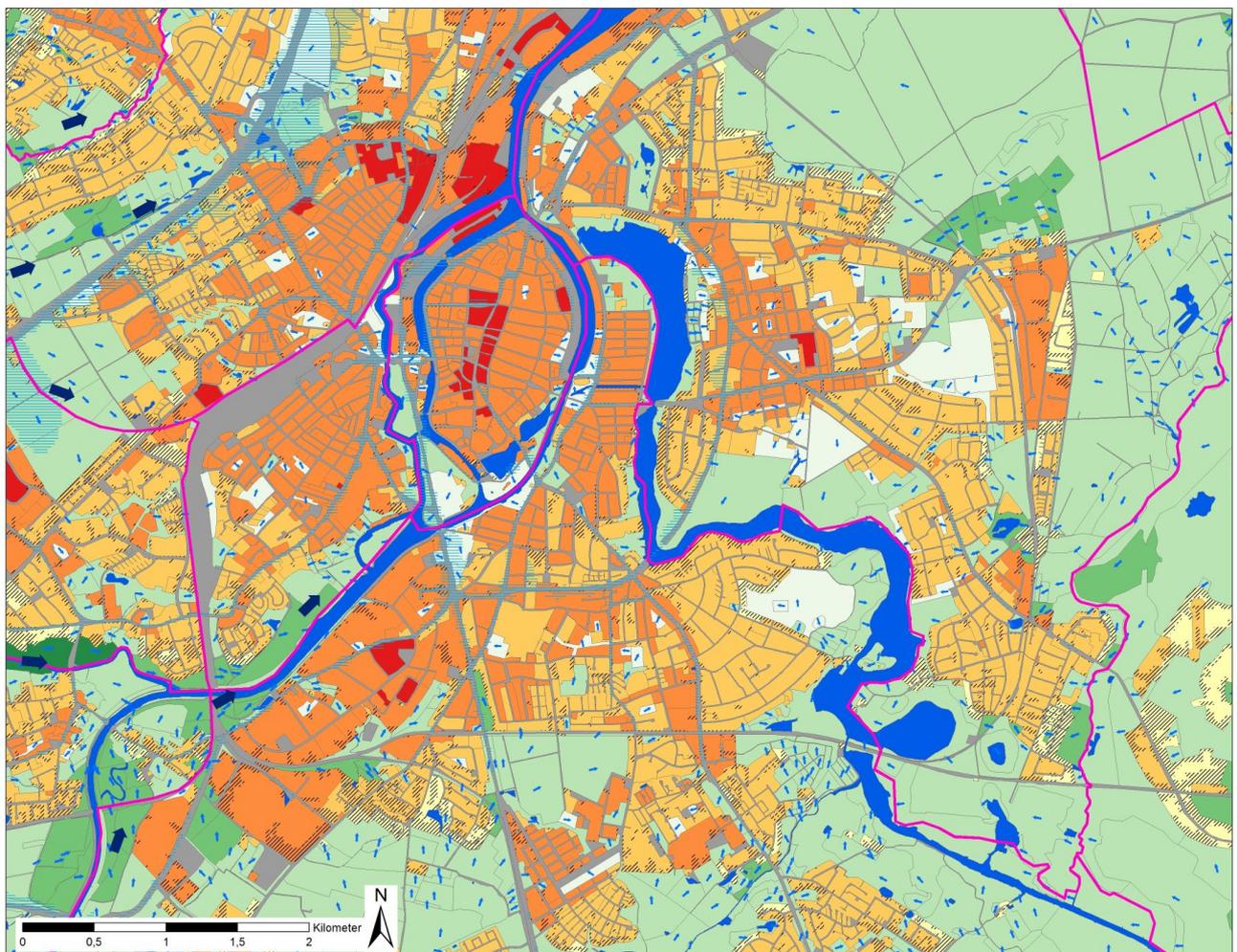
**Abb. 5.2:** Bioklimatische Situation der Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet und Stadtgebiet von Lübeck

Bioklimatisch günstige Siedlungsbereiche sind häufig durch eine relativ geringe bauliche Dichte, eine moderate Flächenversiegelung und durchgrünte Bereiche gekennzeichnet. Solche Bebauungsstrukturen sind typisch für Einzel- und Reihenhausbereiche. Liegen diese Siedlungen im Einwirkungsbereich von Kaltluftströmungen erfahren sie zusätzlich eine Entlastung der thermischen Situation. Aufgrund des für Siedlungsräume niedrigen Strömungswiderstandes kann Kaltluft weit in locker bebaute Bereiche eindringen. Kaltlufteinwirkungsbereiche sind in der Klimafunktionskarte durch eine diagonale schwarze Schraffur gekennzeichnet. Insgesamt werden im Untersuchungsgebiet Lübeck etwa 33 % und im Stadtgebiet etwa 23 % des Siedlungsraumes durchlüftet. Diese Flächen befinden sich größtenteils in den randlich gelegenen Siedlungsbereichen oder in Alleinlage zwischen Grün- und Freiflächen.

Wie in Kap. 4.3 erläutert, hängt die Reichweite einer Kaltluftströmung in die Bebauung vor allem vom Ausmaß der Kaltluftdynamik ab. Sie ist bei Flurwinden mit Bezug zu großräumigen Kaltluftentstehungsgebieten wie den landwirtschaftlichen Nutzflächen am intensivsten. Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt zwischen wenigen Metern und bis zu 700 m. Neben den entstehenden Winden spielt vor allem die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle für das Eindringen der Kaltluft in die Bebauung. Zudem können auch kleinere Grün- und Freiflächen innerhalb der Bebauung relevant sein. Sie sorgen dafür, dass Kaltluft weiter in die Bebauung vordringen kann. Dies ist zum Beispiel im Stadtteil St. Lorenz Nord der Fall (s. Abb. 4.5). In den peripheren, vergleichsweise gering überbauten dörflichen Ortsteilen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum. Mit Blick auf die Situation im gesamten Untersuchungsgebiet profitieren vor allem die Bereiche von einer sehr guten Belüftung, welche sich im Einzugsgebiet der Talabwinde befinden. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um die von Stockelsdorf sowie um Areale im Südosten. Insgesamt ist die bioklimatische Belastung bei einer Einzel- und Reihenhausbauung mit einem vergleichsweise niedrigen Versiegelungsgrad und hohem Grünanteil am geringsten ausgeprägt.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem das Stadtzentrum mit der Altstadt, aber auch einige angrenzende Quartiere, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie der unzureichenden Durchlüftung. Dabei treten auch die größeren Gewerbe- und Industrieareale (z.B. nördlich der Kernstadt) mit einer Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie eine Zentrumsbebauung aufweisen.

Abb. 5.3 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte den Bereich Lübeck-Mitte, wobei die bioklimatische Situation der Siedlungsräume mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Dabei tritt deutlich der Innenstadt-/Altstadt-Bereich als bioklimatisch weniger günstig bzw. ungünstig hervor. Die typische Bebauungsstruktur der Zentrums- und Blockbebauung bewirkt während sommerlicher Hochdrucklagen eine Überwärmung dieser Stadtteile. Auf Grund ihres hohen Bauvolumens sind sie außerdem für ausgleichende Kaltluftströmungen kaum zugänglich.

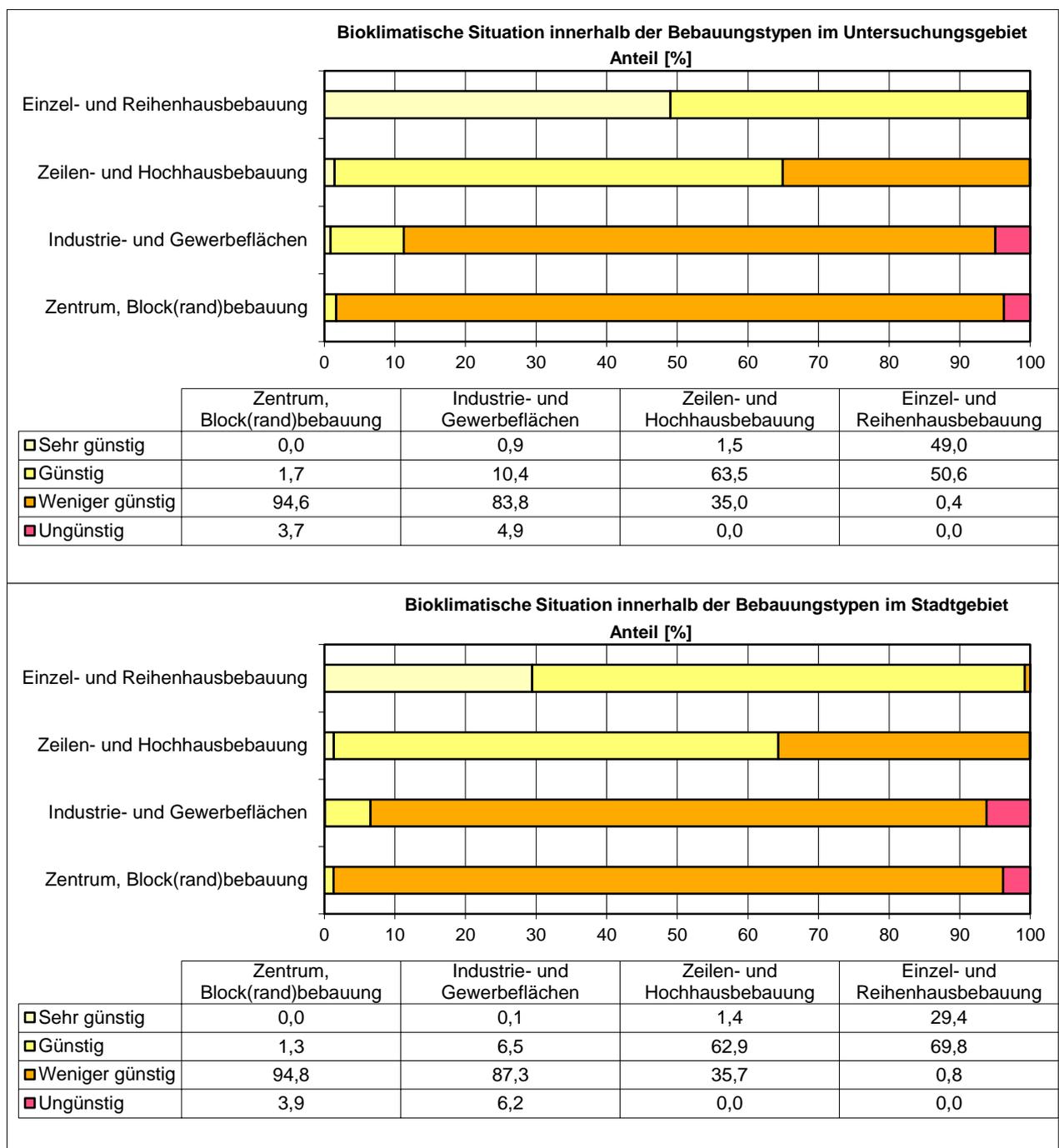


**Abb. 5.3:** Ausschnitt der Klimafunktionskarte Lübeck-Mitte  
Legende siehe Abb. 5.1

Die Altstadt Lübecks weist eine weniger günstige oder ungünstige bioklimatische Situation auf. Hier ist die Stadtstruktur besonders verdichtet und der Grünanteil sehr gering. Die umliegenden Stadtquartiere sind vor allem von Blockrandbebauung geprägt. Hier überwiegt eine weniger günstige bioklimatische Situation. Die Industriegebiete in Lübeck sind ebenfalls von weniger günstigen und ungünstigen bioklimatischen Situationen geprägt. Im Bereich Messering beispielsweise weist die dort vorhandene dichte Bebauung eine ungünstige und weniger günstige bioklimatische Lage auf.

Flächen, in denen block- und zeilenartige Baustrukturen vorherrschen, ordnen sich in ihren bioklimatischen Eigenschaften zwischen den Bebauungsextremen ein und weisen, je nach ihrer Nähe und Lage zu Gunst- oder Ungunstbereichen, variable Werteausprägungen hinsichtlich der bioklimatischen Situation auf. Dies bedeutet, dass je nach Lage und Bebauungsdichte der Flächen die Bewertung trotz gleichem Bebauungstyps unterschiedlich ausfallen kann. Beispielhaft lässt sich dies in Abb. 5.3 an den Flächen östlich der Wakenitz im Stadtteil St. Gertrud erkennen.

Die in der Klimafunktionskarte dargestellte Verteilung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsräume spiegelt zum einen die einzelnen Bebauungstypen im Stadtgebiet mit ihren unterschiedlichen Verdichtungen wider, verdeutlicht aber ebenso die räumliche Lage der Ortsteile zu den Kaltluft liefernden Grün- und Freiflächen und den positiven Einfluss nächtlicher Ausgleichsströmungen. Abb. 5.4 bilanziert die bioklimatische Situation im Siedlungsraum für die einzelnen Bebauungstypen.



**Abb. 5.4:** Bilanz der bioklimatischen Situation der unterschiedlichen Siedlungstypen im Untersuchungsgebiet

### 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 Grün- und Freiflächenanteil und möglichst linearer Ausrichtung auf Wirkungsräume. Grundsätzlich kommen hierfür Tal- und Niederungsbereiche, größere Grün-/Freiflächen 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 Grün- und Freiflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf von Flächen abgrenzen über die lediglich ein Transport erfolgt.

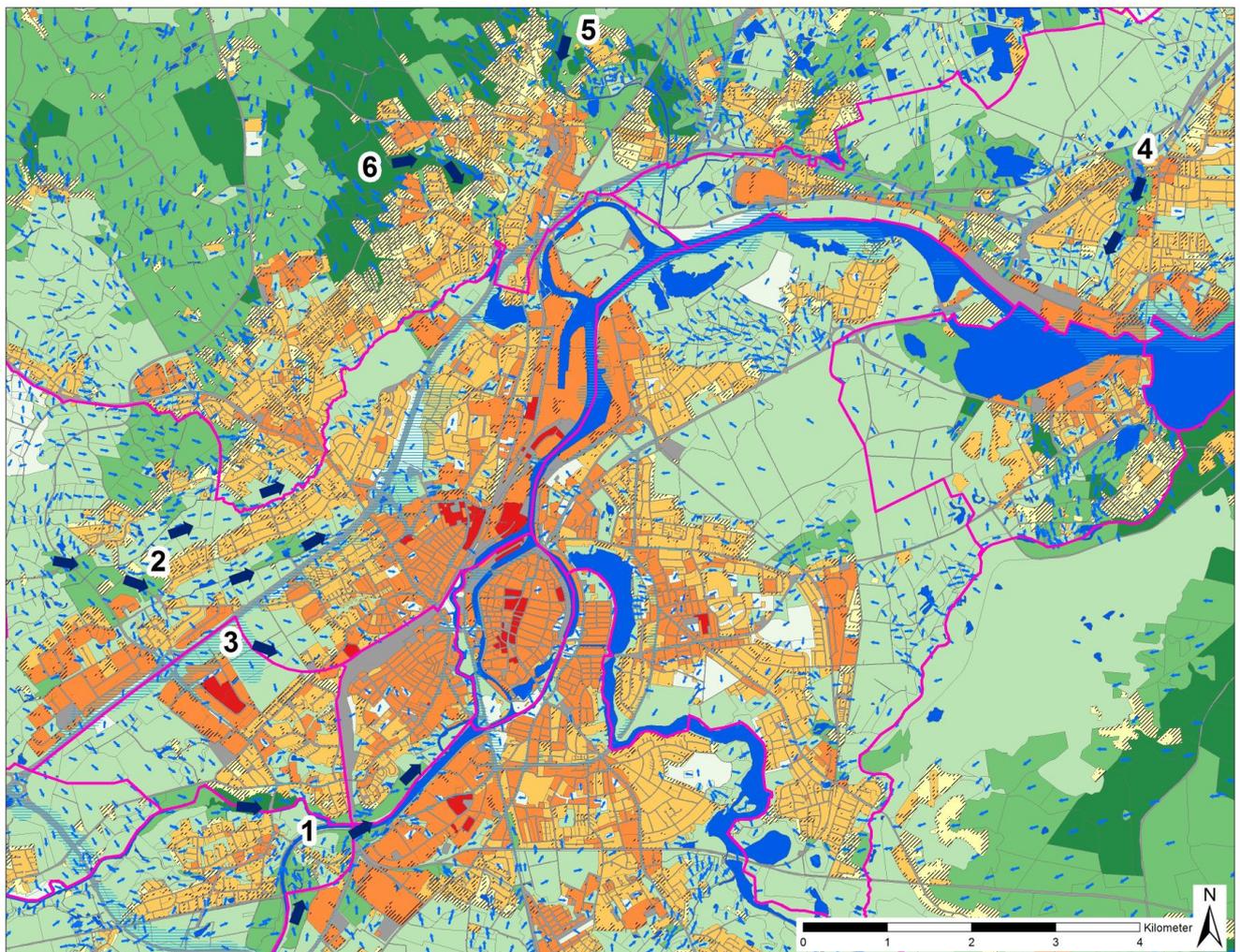


Abb. 5.5: Ausschnitt Klimafunktionskarte Lübeck: Leitbahnen

Abb. 5.5 zeigt einen Ausschnitt der Klimafunktionskarte, der das Stadtzentrum und die im Untersuchungsgebiet Lübeck liegenden Leitbahnen zeigt. Die ausgewiesenen wichtigsten Leitbahnbereiche werden im Folgenden beschrieben. Eine Übersicht ist in Tab. 5.2 dargestellt. Die Nummern finden sich in Abb. 5.5 wieder.

Nummer	Leitbahn
1	Lübeck Süd
2	Lübeck West
3	Lübeck West 2
4	Lübeck Nord
5	Bad Schwartau Nord
6	Bad Schwartau West

Tab. 5.2: Leitbahnen in Lübeck

Eine wichtige Leitbahn in Lübeck ist die Leitbahn **Lübeck Süd**, die vom Süden aus über **das Tal der Trave und des Elbe-Lübeck-Kanals** frische und kühle Luft bis zur Altstadt transportiert. Die Leitbahn ist zunächst zweigeteilt und führt zum einen über die Traveniederung Frischluft in Richtung Zentrum. Zwischen dem Stadtteil Buntekuh und Alt-Moisling-Genin fließt die Trave eingebettet in Grün- und Freiflächen. Hier kann die Kaltluft aus dem Umland zwischen der Bebauung hindurch der Trave folgend weiter vordringen. Zum anderen wird Kaltluft über den Elbe-Lübeck-Kanal und die darum herum liegenden Grün- und Freiflächen geleitet und südliche an Alt-Moisling-Genin vorbeigeführt. Im Osten der Siedlung fließen die beiden Flüsse zusammen und auch die Kaltluftströme vereinen sich ab hier und fließen weiter in Richtung Innenstadt. Über die raugkeitsarmen Freiflächen und die beiden Gewässer kann die Kalt- und Frischluft relativ ungehindert vordringen und kann so weit in die Bebauung eindringen und einen wichtigen Beitrag zur Belüftung der Hansestadt Lübeck leisten.

Eine weitere Leitbahn ist die Leitbahn **Lübeck West**. Sie liegt im Stadtteil St. Lorenz Nord. Sie teilt sich in ihrem Verlauf auf und führt **nördlich und südlich der Siedlung Dornbreite** entlang. Gespeist wird diese Leitbahn von den Flächen im Westen von St. Lorenz. Sie wird dann einerseits nördlich an Dornbreite vorbei über die Grün- und Freiflächen in der Landgrabenniederung geleitet. Hierbei überströmt sie auch stark aufgelockerte Besiedlung. Dort, wo die Siedlungsflächen von Stockelsdorf und Dornbreite zusammen stoßen endet dieser Teil der Leitbahn. Sie versorgt die angrenzende Bebauung mit Kaltluft. Andererseits führt die Strömung im Süden der Siedlung Dornbreite entlang über die Kleingärten des KGV Holstentor Nord e.V.. Auch hier überströmt sie in einem kleinen Bereich Siedlungsfläche. Am südlichen Arm der Leitbahn kann die Kaltluft aus dem Umland in kleinen Teilen auch noch über die Autobahn hinweg über die angrenzenden Grünflächen weiter geleitet werden, so dass ein kleiner Teil noch weiter in Richtung Stadtzentrum vordringen kann.

Die Leitbahn **Lübeck West 2** wird nur zu einem kleinen Teil aus dem Umland gespeist, die von hier ausgehende Kaltluft entsteht vorwiegend lokal im Bereich der Kleingärten. Die Kaltluft wird hier über die Kleingärten der **KGVs Buntekuh e.V., Rothenhausen e.V. und Neuhof e.V.** in die angrenzende Bebauung geführt.

Die Leitbahn **Lübeck Nord** führt entlang des **Kücknitzer Mühlenbachs**, dessen Aue zwischen der Bebauung hindurchführt und bis an das Industriegebiet heranreicht. Diese Leitbahn kann die angrenzende Bebauung mit Frischluft versorgen, ebenso wie das südlich gelegene Industriegebiet.

Die letzten beiden Leitbahnen befinden sich nicht mehr im Stadtgebiet Lübecks. Da sie aber recht prägnant sind und zudem von den größeren Kaltluftabflüssen von den Hangflächen profitieren, sollten sie dennoch mit in den Leitbahnbestand aufgenommen werden.

Die Leitbahn **Bad Schwartau Nord** liegt im Bereich der **Swartau Aue**, die in die Bebauung hineinführt. Ein Teil der Kaltluft kann durch die Bebauung hindurch strömen und über die dahinter angrenzenden Freiflächen bis zur Trave vordringen.

Die letzte Leitbahn ist die Leitbahn **Bad Schwartau West**. Sie führt entlang der **Clever Au** und macht einen Linksknick bis zum Mühlenteich. Die angrenzende Bebauung wird sehr gut durchströmt, da der Kaltluftvolumenstrom im Bereich der Leitbahn sehr groß ist.

## 6 Zusammenfassung Klimafunktionskarte

Die GEO-NET Umweltconsulting GmbH wurde von der Hansestadt Lübeck beauftragt, eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet zu erarbeiten. Grundlage der Klimaanalyse bildet das Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources). Ziel der Untersuchung war eine umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Stadtgebiet Lübecks und die Bewertung unterschiedlicher Nutzungen hinsichtlich ihrer klimatischen Funktionen.

Die Hansestadt Lübeck lässt sich dem ozeanisch geprägten Klima zuordnen. Dieser Bereich ist von maritimen Einflüssen geprägt. Das langjährige Mittel der Lufttemperatur beträgt an der Station Lübeck-Blankensee 8,8 °C. Seit den 50er Jahren steigt die Zahl der Hitzetage in Lübeck an, wobei im Sommer 1994 die höchste Anzahl mit 17 Hitzetagen erreicht wurde. Die jährliche Niederschlagssumme beträgt im Durchschnitt etwa 712 mm. In unseren Breiten führen sommerliche austauscharme Hochdruckwetterlagen zu den ungünstigsten bioklimatischen Situationen innerhalb von Siedungsflächen.

Grundlage für die Beurteilung der stadtklimatischen Situation ist die Analyse des klimatischen Ist-Zustandes im Stadtgebiet während einer austauscharmen sommerlichen Hochdrucklage, welche häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergeht. Aus den Grundlageninformationen über die Stadt, wie Topographie, Bebauung und Vegetation sowie Kenntnissen über atmosphärische Prozesse und lokalklimatischer Phänomene werden Aussagen über Wärmebelastung, Durchlüftung und Bioklima abgeleitet. Im Vordergrund der Betrachtung stehen der lokale nächtliche Kaltluftaustausch und die Sicherung und Verbesserung der damit in Zusammenhang stehenden relevanten städtischen Strukturen und Grün- und Freiflächen. Die Klimafunktionskarte fasst dieses als Ergebnis der Untersuchung zusammen.

Durch die Zufuhr von frischer und kühlerer Luft können Grün- und Freiflächen klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistungen für städtische Belastungsräume erbringen. Tab. 5.2 zeigt eine Übersicht über die in Lübeck ausgewiesenen Kaltflutleitbahnen. In der Karte 9 im Anhang (Klimafunktionskarte) sind diese räumlich verortet. Der Erhalt von Leitbahnen ist ein wesentlicher Bestandteil zur Schaffung eines günstigen Stadtklimas in Lübeck.

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 im Stadtgebiet Lübeck ergibt:

- 1,6 % der Siedlungsfläche sind als bioklimatisch ungünstig einzuordnen,
- 32,1 % sind weniger günstig,
- 51,0 % weisen günstige bioklimatische Bedingungen auf,
- 15,3 % des Siedlungsraumes können als sehr günstig eingestuft werden.

Die ländlicheren Stadtteile Lübecks (z.B. Moisling oder Teile von St. Jürgen) weisen insgesamt eine günstige Situation auf und werden von der thermisch ausgleichenden Wirkung der ausgedehnten umgebenen Grün- und Freiflächen positiv beeinflusst. Auf Grund der Struktur der Stadt Lübeck erweist sich der stark verdichtete Stadtkern (z.B.: Innenstadt, Teile von St. Jürgen sowie Teile von St. Lorenz Nord und Süd) mit seinem eher geringen Grün- und Freiflächenanteil aus klimaökologischer Sicht als problematisch. Durch die kompakte Stadtstruktur kann die Innenstadt Lübecks wenig von den Ausgleichsgebieten des Umlands profitieren.

## 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.

**Eigenbürtige Wetterlage:** s. autochthone Wetterlage

**Flurwind:** Thermisch bedingte schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Grün- und 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 Grün- und 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.

**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 strukturierte Vegetationsflächen in Wirkungsräumen mit günstigen klimatischen und lufthygienischen Bedingungen (z.B. kleine Parkanlage), s. auch Komfortraum.

**Komfortraum:** Bewachsene Grün- oder Freifläche, z.T. vielfältig strukturiert, mit günstigen bioklimatischen und lufthygienischen Bedingungen, in Nachbarschaft zum Wirkungsraum.

**Leitbahnen:** Mehr oder weniger linear ausgerichtete Grün- und 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.

**NO<sub>x</sub>:** Summe aus Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Stickstoffmonoxid (NO, ausgewiesen als NO<sub>2</sub>-Äquivalente). Stickstoffoxide werden bei Verbrennungsprozessen freigesetzt. Ein größerer Anteil wird als NO emittiert, das später mit Luftsauerstoff und insbesondere mit Ozon (O<sub>3</sub>) zu NO<sub>2</sub> reagiert. Aus diesem Grund beziehen sich Emissionsmengen auf NO<sub>x</sub>, als beurteilungsrelevante Immissionen werden NO<sub>2</sub> Konzentrationen betrachtet.

**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.

**WETTREG 2010:** „Wetterlagen basierte Regionalisierungsmethode“: Statistisches Klimamodell, das eine Berechnung regionaler Entwicklungen aus globalen Klimamodellen ermöglicht. Für die Modellierungen in Deutschland liegt das globale Klimamodell des IPCC „ECHAM5/MPI-OM“ zu Grunde. WETTREG projiziert die zukünftige Entwicklung des Klimas für bestimmte Klimastationen. Die Modellierungen stehen für 282 Klima- und 1695 Niederschlagsstationen zur Verfügung.

**Wirkungsraum:** Siedlungsraum, der bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastet 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 einhergehen.

## Literatur

- DWD – Deutscher Wetterdienst (2012): Klimadaten- online, [www.dwd.de](http://www.dwd.de).
- EEA – European Environment Agency (2012): Fast Track Service Precursor (FTSP) on Land Monitoring. Degree of soil sealing.
- EUROPEAN COMMISSION (1994): EUR 12585 - CORINE Landcover project - Technical guide. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg.
- FACHHOCHSCHULE LÜBECK: Wetterseite der FH-Lübeck, [wetter.fh-luebeck.de](http://wetter.fh-luebeck.de)
- 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.
- KIESE, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. Landschaft + Stadt 20, H. 2: 67-71.
- LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (2013): Orientierende Luftschadstoffmessungen für Stickstoffdioxid in Lübeck Juli 2102 – Juni 2013, Lufthygienische Überwachung Schleswig-Holstein, Itzehoe
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- NATIONAL GEOSPATIAL INTELLIGENCE AGENCY (2004): Digital Terrain Elevation Data.
- TÜV Nord Umweltschutz (2014): Gutachterliche Stellungnahme zur Luftschadstoffbelastung im geplanten Geltungsbereich des Bebauungsplans Nr. 33.05.00 „Priwall Waterfront Teilbereich I“, Hamburg.
- UBA (2014): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 3.2. INFRAS AG, Bern Schweiz, Januar 2014. Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin.
- VDI (2003): Richtlinie VDI 3787 Blatt 5 Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2004): Richtlinie VDI 3787 Blatt 9 Umweltmeteorologie – Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in der räumlichen Planung. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2008a): Richtlinie VDI 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima. VDI Verein Deutscher Ingenieure Düsseldorf.
- VDI (2008b): Richtlinie VDI 3785, Blatt 1, Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2014): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf Februar 2014. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.