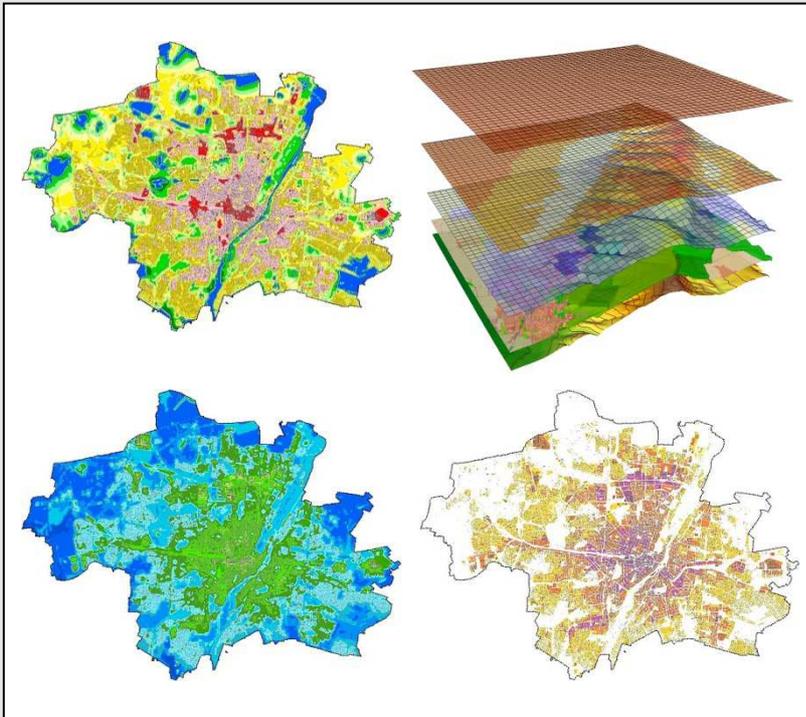


# Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München



Auftraggeber:



Landeshauptstadt  
München  
**Referat für Gesundheit  
und Umwelt**  
Bayerstraße 28a  
80335 München



**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**

Große Pfahlstraße 5a

3 0 1 6 1 Hannover

Tel. (0511) 3887200

FAX (0511) 3887201

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

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

**Auftrag:** Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München

**Standort:** LH München  
Bundesland: Bayern  
Deutschland

**Auftraggeber:** LH München  
Referat für Gesundheit und Umwelt  
Bayerstraße 28 a  
80335 München

**Projektnummer:** 2\_12\_002

**Berichtsnummer:** 2\_12\_002\_München\_Klima\_Rev00

**Version:** 1

**Datum:** 21. Juli 2014

**Erstellt von:**   
-----  
Dipl.-Geogr. Dirk Funk

**Unter Mitarbeit von:**   
-----  
Prof. Dr. Günter Groß

**Geprüft von:**   
-----  
Dipl.-Geogr. Peter Trute

**GEO-NET**  
**Umweltconsulting GmbH**

*Geschäftsführer:*  
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey  
Dipl.-Geogr. Peter Trute

Große Pfahlstraße 5a  
D-30161 Hannover  
Tel. (0511) 388 72 00  
Fax (0511) 388 72 01

info@geo-net.de  
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover  
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG  
KTO. 532 248 000  
BLZ 251 900 01



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

## Inhaltsverzeichnis

Seite:

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Klimatische Bedingungen in München.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen .....</b>	<b>14</b>
3.1 Geländehöhe.....	14
3.2 Nutzungsstruktur .....	15
<b>4. Methodik.....</b>	<b>19</b>
4.1 Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH .....	19
4.2 Standardisierung der Parameter.....	24
4.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen .....	25
4.4.1 Grün- und Freiflächen .....	26
4.4.2 Bioklima in den Siedlungsflächen .....	27
<b>5. Ergebnisse der Klimamodellierung .....</b>	<b>30</b>
5.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld.....	30
5.2 Autochthones Windfeld .....	33
5.3 Kaltluftvolumenstrom.....	37
5.4 Ermittlung der lufthygienischen Belastung durch die Quellgruppe Verkehr .....	39
<b>6. Klimaökologische Funktionen .....</b>	<b>41</b>
6.1 Grün- und Freiflächen .....	41
6.2 Siedlungsräume .....	43
6.3 Luftaustausch.....	44
<b>7. Bewertungskarte Stadtklima .....</b>	<b>47</b>
7.1 Grün- und Freiflächen .....	47
7.2 Siedlungsräume .....	52
7.3 Luftaustausch.....	52
7.4 Nutzungshinweise für die Bauleitplanung.....	53

<b>8</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>58</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse .....	1
Abb. 2.1: Klimadiagramm München-Nymphenburg. ....	3
Abb. 2.2: Stärkewindrose für die Station München-Stadt.....	4
Abb. 2.3: Prozentuale Häufigkeiten der Windrichtungen für alle Windgeschwindigkeiten.....	5
Abb. 2.4: Prozentuale Häufigkeiten der Windrichtungen in den Sommermonaten.....	5
Abb. 2.5: Luftströmung im Voralpenraum während wolkenarmer sommerlicher Wetterlagen.....	6
Abb. 2.6: Prinzipskizze Flurwinde.....	7
Abb. 2.7: Monatliche Summen der Hitze- und Sommertage .....	9
Abb. 2.8: Anzahl der Sommertage an der Station München-Stadt im Vergleich zum langjährigen Mittel .....	10
Abb. 2.9: Jahresdurchschnittstemperatur München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100.....	11
Abb. 2.10: Anzahl Sommertage pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100 .....	11
Abb. 2.11: Anzahl Hitzetage pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100.....	12
Abb. 2.12: Anzahl Hitzewellen pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100 .....	12
Abb. 2.13: Anzahl Tropennächte pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100.....	13
Abb. 3.1: Geländehöhe im Untersuchungsraum .....	14
Abb. 3.2: Nutzungsstruktur im Stadtgebiet München .....	15
Abb. 4.1: Unterschiedliche Rasterweiten bei einem digitalem Geländehöhenmodell.....	20
Abb. 4.2: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit.....	21
Abb. 4.3: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle.....	22
Abb. 4.4: Eingangsdaten für die Modellrechnung .....	23
Abb. 4.5: Beispielhafter Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen .....	24
Abb. 4.6: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern.....	25
Abb. 4.7: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn.....	27
Abb. 5.1: Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund).....	32
Abb. 5.2: Lufttemperatur in 2 m Höhe im Vertiefungsraum München-Stadtmitte.....	33
Abb. 5.3: Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund).....	35
Abb. 5.4: Kaltluftströmungsfeld und Windgeschwindigkeit im Vertiefungsraum München-Stadtmitte .....	36
Abb. 5.5: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom .....	37
Abb. 5.6: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens .....	38
Abb. 5.7: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens im Vertiefungsraum München-Stadtmitte .....	39

Abb. 6.1 Klimafunktionen im Bereich München-Stadtmitte .....	44
Abb. 7.1 Bewertungskarte Stadtklima im Bereich München-Stadtmitte .....	48
Abb. 7.2: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen .....	50

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Ausgewählte Klimawerte für das Jahr 2013 .....	3
Tab. 2.2: Jährliche Summen der Hitze- und Sommertage im Jahr .....	9
Tab. 2.3: Jährliche Summen der Hitze- und Sommertage in den Zeiträumen 1961-1990 und 1981-2010 .....	10
Tab. 3.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung .....	16
Tab. 3.2: Strukturtypen München und zugewiesene Nutzungskategorien der Klimamodellierung .....	17
Tab. 4.1: Bewertung der Kaltluftlieferung innerhalb von Grünflächen .....	26
Tab. 4.2: Klassifizierung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen während einer windschwachen Sommernacht .....	28
Tab. 5.1: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms .....	37
Tab. 6.1: Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet München .....	42
Tab. 7.1: Bilanzierung der Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht .....	51

## Kartenverzeichnis

Karte 1: Lufttemperatur 14 mittags
Karte 2: Lufttemperatur abends
Karte 3: Lufttemperatur morgens
Karte 4: nächtliche Abkühlungsrate
Karte 5: Bioklimatische Situation während einer austauscharmen Strahlungswetternacht
Karte 6: Kaltluftvolumenstrom abends
Karte 7: Kaltluftvolumenstrom morgens
Karte 8: Kaltluftvolumenstrom abends
Karte 9: Kaltluftvolumenstrom morgens
Karte 10: Klima- und immissionsökologische Funktionen für das Stadtgebiet
Karte 11: Bewertungskarte Stadtklima

## 1. Aufgabenstellung

Das Schutzgut Klima ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und Bestandteil der Abwägung bei der Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele 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 klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt somit ab auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse, die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität und das Angebot besonderer Lokalklimate. Eine besondere Relevanz für eine klimagerechte Stadtentwicklung ergibt sich vor dem Hintergrund des sich abzeichnenden Klimawandels und der damit einhergehenden Zunahme der sommerlichen Wärmebelastung in den Siedlungsflächen.

Im Auftrag der Landeshauptstadt München wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet München durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen

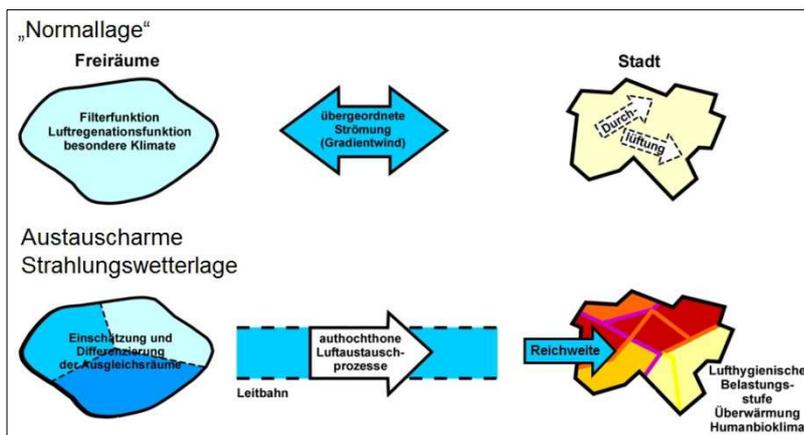


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse

Wärmebelastung in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einhergehen. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und/oder Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1.1).

Die mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and

Anthropogenic Heat Sources) gewonnenen Ergebnisse der Klimaanalyse haben zu einer umfassenden Bestandsaufnahme der klimatisch-lufthygienischen Situation im Stadtgebiet von München geführt. Die durchgeführten Untersuchungen haben darüber hinaus zum Ziel, die unterschiedlichen Teilflächen der Stadt München 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 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 Freiflächen (*Luftleitbahnen*) beide miteinander verbinden.

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

Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Stadtgebiet vor. Die *Nachtsituation* steht deshalb im Vordergrund, da nur dann eine im Vergleich zu Siedlungsflächen intensivere Abkühlung auf Freiflächen mit Vegetation erfolgt. Dabei entstehen je nach Größe unterschiedliche Volumina an Kaltluft, welche als lokale Strömungssysteme Kalt-/Frischlufte für den Siedlungsbereich liefern. Um das komplexe Prozessgeschehen in einer Großstadt wie München erfassen zu können, ist der Beginn (22 Uhr) und das Ende einer Nacht (04 Uhr) simuliert worden. Während die Kaltluftentstehung innerstädtischer Grünflächen eher in der ersten Nachthälfte am höchsten ist, sind die Kaltluftströmungen des Umlandes erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet.

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

Dieses Vorgehen unterscheidet sich damit von der früher verbreiteten - und sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stützenden - statischen Betrachtung auf der Basis von Klimatopen, in welchen ein, den unterschiedlichen Nutzungen entsprechendes, einheitliches Mikroklima unabhängig von der Lage des Klimatops angenommen wird (VDI 1997). Während eine Thermalscannerbefliegung lediglich die Oberflächentemperatur darstellt, nicht aber die eigentliche Lufttemperatur oder Kaltluftströmungen erfasst, bietet die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Des Weiteren ermöglicht nur die numerische Simulation eine Prognose zukünftiger Entwicklungen.

Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt fundierte Aussagen für den Maßstabbereich 1 : 50 000 bis 1 : 15 000 (Flächennutzungsplan-Ebene). Eine abschätzende Beurteilung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen ist aber auch auf Bebauungsplanebene gegeben. Allerdings ergeben sich maßstabsbedingte Grenzen hinsichtlich der Aussagekraft von Klimafunktions- und Bewertungskarte. Durch die Verwendung der Strukturtypenkartierung als bereits aggregierte Nutzungsinformation werden Gebäude oder Einzelstrukturen wie kleinere Baumgruppen innerhalb von Siedlungsflächen oder auch Dachbegrünung nicht explizit aufgelöst. Daher werden in den Karten bereits umgesetzte kleinräumige Maßnahmen zur Klimaanpassung möglicherweise nicht wiedergespiegelt. Um die stadtklimatischen Auswirkungen zukünftiger Bauflächen einschätzen zu können, sind gegebenenfalls vorhabenbezogene Detailuntersuchungen notwendig, um kleinskalige Aussagen z.B. zur Hinderniswirkung von Gebäuden auf den lokalen Luftaustausch treffen zu können.

## 2 Klimatische Bedingungen in München

Das Klima der Stadt München lässt sich als warmgemäßigt einordnen und liegt im Übergangsbereich zwischen dem feuchten atlantisch beeinflussten Klima und dem trockenerem Kontinentalklima. Abbildung 2.1 zeigt für die Klimastation München-Nymphenburg die durchschnittlichen Monatsmittelwerte von Niederschlag (in mm) und Lufttemperatur (in °C) für den meteorologischen Referenzzeitraum Zeitraum 1961 bis 1990. Sie weisen einen charakteristischen Verlauf für diese Klimazone auf, wobei die Lufttemperatur durchschnittlich 9,1°C beträgt und im Jahresmittel 959 mm Niederschlag gefallen sind.

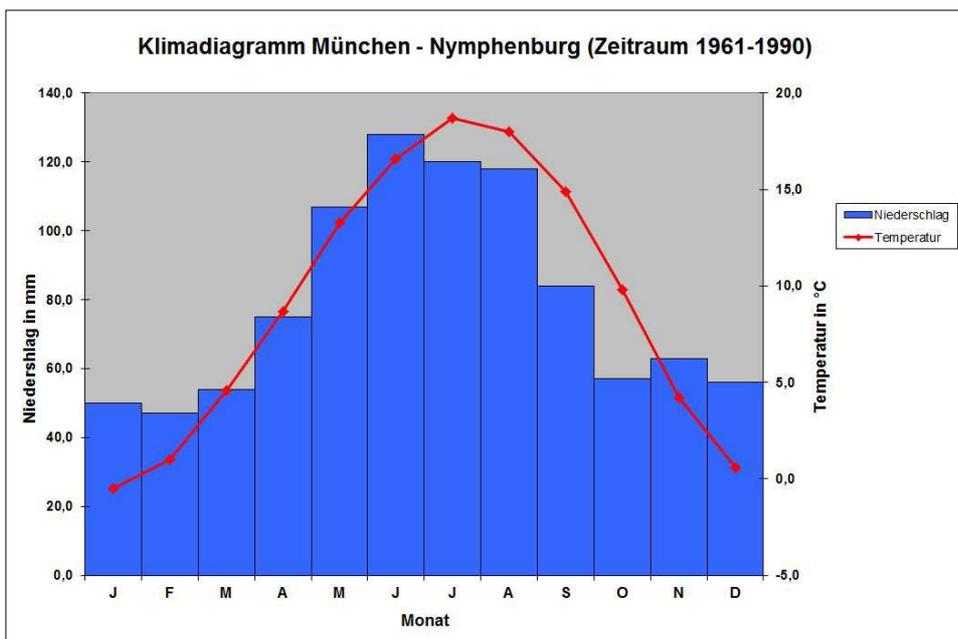


Abb. 2.1: Klimadiagramm München-Nymphenburg (Zeitraum 1961-1990).

Monatsmittelwerte der Niederschlagsmengen in mm (blaue Balken) und der Lufttemperatur in °C (rote Kurve). (Datengrundlage DWD, bereitgestellt durch die LH München, Statistisches Amt)

Ausgewählte Klimawerte für das Jahr 2013 sowie ihrer Abweichungen gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990 zeigt Tab. 2.1 für die Klimastation München-Stadt, welches mit einer Jahrestemperatur von 9,5°C als leicht zu warm eingeordnet werden kann.

Monat	Lufttemperatur						Niederschlagsmenge in mm
	Monats-durchschnitt	Abw. v. langj. Mittel	Abs. höchste (Maximum)		Abs. tiefste (Minimum)		
	°C	°C	°C	Datum	°C	Datum	
Januar	0,8	+1,3	15,0	30.	-6,7	27.	84
Februar	-1,2	-2,2	8,1	1./3.	-9,2	10.	84
März	2,3	-2,3	16,7	8.	-5,6	15.	49
April	9,7	+1	25,1	18./27.	-1,9	1.	24
Mai	12,1	-1,2	25,3	16.	3,9	28.	155
Juni	16,5	-0,1	35,2	18.	5,8	4./5.	173
Juli	21,5	+2,8	36,9	27.	11,2	14.	21
August	19,3	1,3	35,2	3.	9,7	30.	94
September	14,3	-0,6	28,1	7.	6	23.	89
Oktober	10,9	+1,1	24,1	23.	1,4	11.	94
November	4,7	+0,5	19,3	8.	-6,1	28.	57
Dezember	2,9	+2,3	16,7	26.	-5	31.	9
<b>Jahr 2013</b>	<b>9,5</b>	<b>+0,4</b>	<b>36,9</b>	<b>27.7.</b>	<b>-9,2</b>	<b>10.3.</b>	<b>930</b>

Tab. 2.1: Ausgewählte Klimawerte für das Jahr 2013 (Datengrundlage DWD; bereitgestellt durch die LH München, Statistisches Amt)

Die höchste Lufttemperatur wurde am 27.7. mit 36,7°C gemessen, während der kälteste Tag mit -9,7°C am 10.3. verzeichnet wurde. Die Niederschlagsmenge liegt mit 930 mm leicht unter dem langjährigen Mittel von 959 mm.

### Windverhältnisse

Die Windverhältnisse im Raum München werden im langjährigen Mittel vor allem von Windströmungen aus westlichen und östlichen Richtungen geprägt (Abb. 2.2). Während die windstarken Wettersituationen mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 5 m/s vor allem mit Westwetterlagen einhergehen, sind die windschwächeren Situationen mit vorherrschenden Winden aus Süden und Osten meist an Hochdruckwetterlagen gekoppelt (hellgrüne Farbstufe).

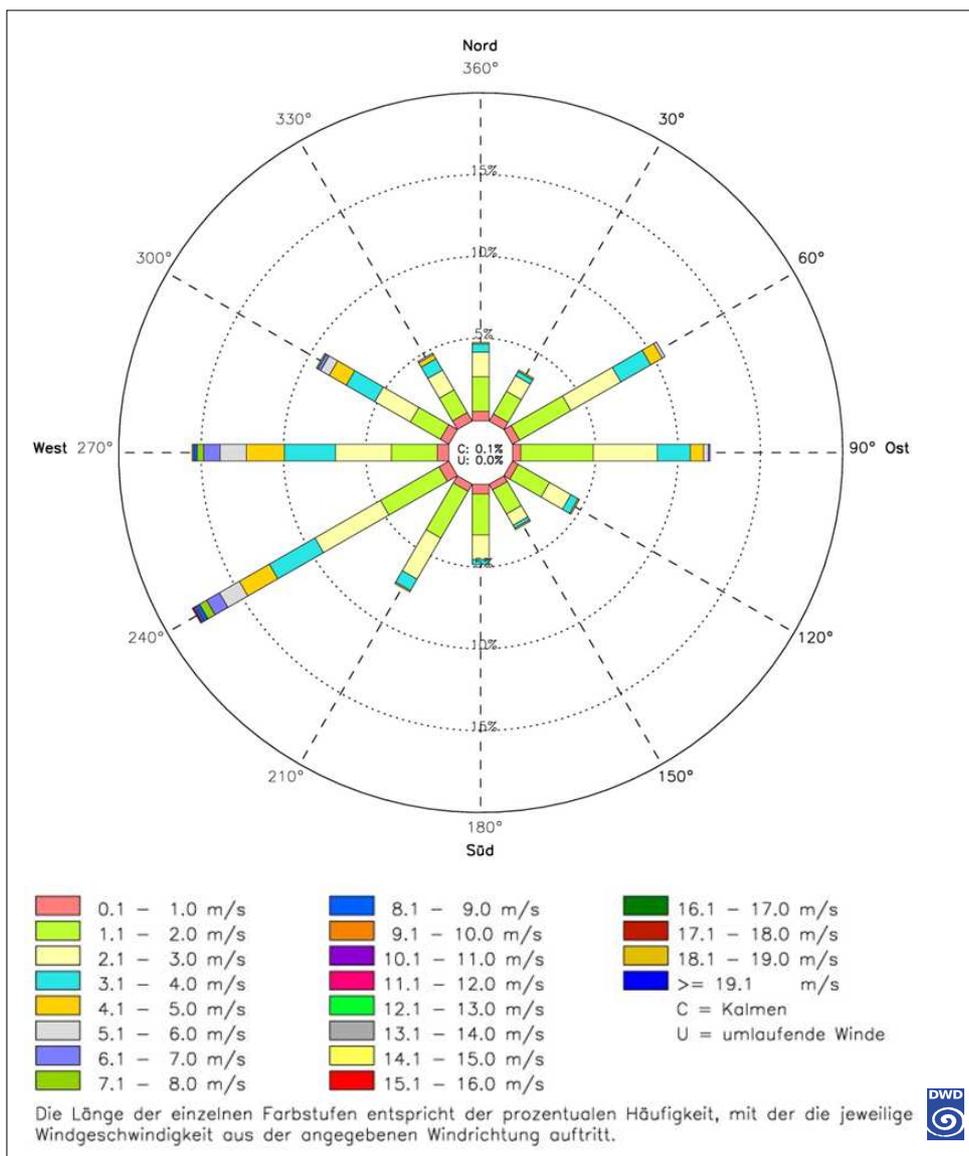


Abb. 2.2: Stärkewindrose in Prozent der Jahresstunden für die Station München-Stadt (Zeitraum 2003 bis 2012; Quelle: DWD)

In Ergänzung zur Stärkewindrose für die Station München-Stadt wurden weitere Auswertungen auf Grundlage von Stundenmittelwerten der Station München-Flughafen aus den Jahren 1992 bis 2013 durchgeführt. Wenngleich es sich um einen Umlandstandort handelt, liegen doch auch hier ähnliche Windverhältnisse vor. Auch hier zeigt sich, dass bei den windschwachen Wetterlagen mit weniger als 3,3 m/s bzw. 1,5 m/s zunehmend Windrichtungen aus Südwesten und Osten auftreten (Abb. 2.3).

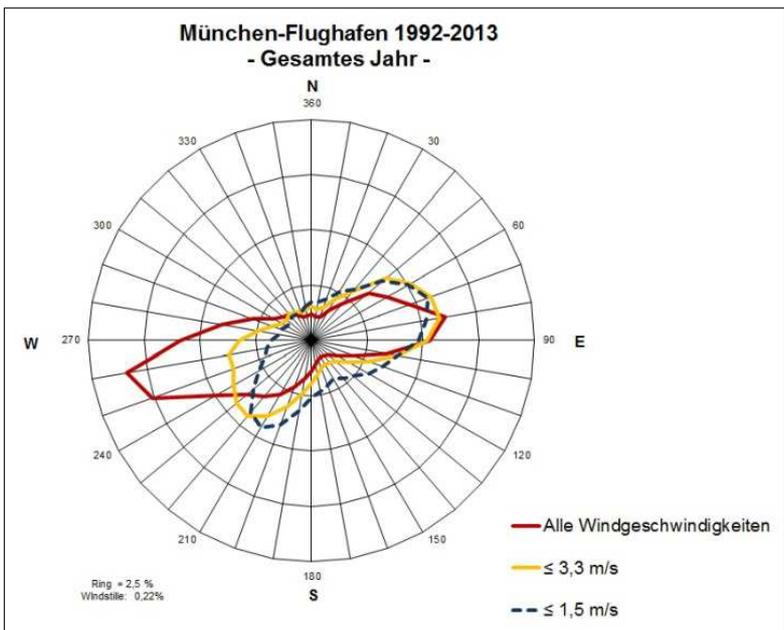


Abb. 2.3: Prozentuale Häufigkeiten der Windrichtungen für alle Windgeschwindigkeiten sowie Schwachwindlagen eines gesamten Jahres (Grundlage: Stundenmittelwerte von Windrichtung und –Geschwindigkeit an der Station München-Flughafen von 05/1992 bis 12/2013)

Dies ist ein Hinweis auf den Einfluss regionaler Windsysteme, welcher bei Betrachtung der Sommermonate Juni bis August noch deutlicher wird (Abb. 2.4). Stellt man die Stundenwerte der Windrichtungen am Tage denen der Nachtsituation gegenüber, erkennt man bereits eine Verschiebung von Westen nach Südwesten (gestrichelte Linie). Verengt man das Datenkollektiv auf die windschwache Situation mit  $\leq 3,3$  bzw.  $\leq 1,5$  m/s, zeigt sich bei den windschwachen Wetterlagen deutlich der Einfluss eines tagesperiodischen Strömungsgeschehens mit vorherrschender Südanströmung, welches von der synoptischen Strömung weitestgehend abgekoppelt ist (s.u. „Alpines Pumpen“).

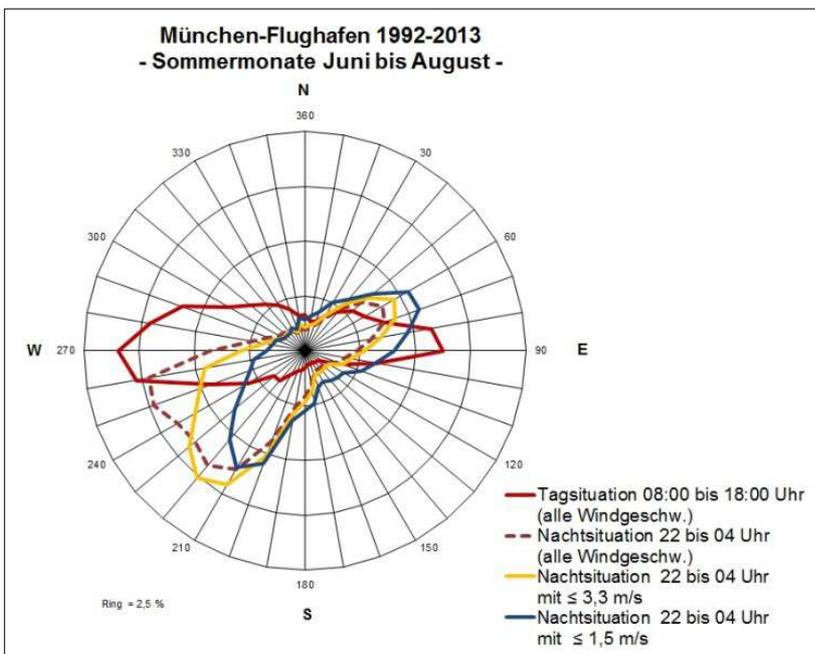


Abb. 2.4: Prozentuale Häufigkeiten der Windrichtungen in den Sommermonaten sowie während windschwacher Sommernächte (Grundlage: Stundenmittelwerte von Windrichtung und –Geschwindigkeit an der Station München-Flughafen von 05/1992 bis 12/2013)

Ein zweites Maximum zeigt sich aus Richtung Ostnordost. Nach MAYER (1987; zit. in MAYER & MATZARAKIS 1992) ist dies darauf zurückzuführen, dass bei Nebel auch in der Nacht der Wind aus

östlichen Richtungen weht, da der Temperaturgradient der Oberflächentemperatur zwischen den Alpen und dem Vorland zu gering für eine südliche Ausgleichsströmung ist. Die Windströmung wird dann vielmehr durch die Großwetterlage gesteuert, welche unter Hochdruckeinfluss meist mit östlichen Richtungen einhergeht. Die Auswertung der Stationsdaten München-Flughafen ergibt zudem, dass während der Sommermonate Juni bis August der Anteil windschwacher Wetterlagen mit  $\leq 3,3$  m/s etwa 71 % der Stunden beträgt. Bei austauscharmen Wetterlagen mit  $\leq 1,5$  m/s liegt er bei 32 %. Betrachtet man die nur Nachtstunden zwischen 22:00 und 04:00 Uhr, so steigt der Anteil auf ca. 87 % der Stunden mit weniger als 3,3 m/s bzw. 51 % der Nachtstunden mit weniger als 1,5 m/s an. Mit Blick auf die Lage der DWD-Messstation im weitgehend unbebauten Umfeld des Flughafens München kann davon ausgegangen werden, dass im Stadtzentrum von München und den übrigen dicht bebauten Siedlungsflächen die Häufigkeit einer herabgesetzten Durchlüftung noch größer ist.

### Alpines Pumpen

In Abhängigkeit von den großräumigen Geländebedingungen können sich auch regionale Windsysteme ausbilden, welche die im Umfeld einer Stadt lokal entstehenden Flurwinde beeinflussen oder auch überlagern können. Im Großraum München ist während wolkenarmer sommerlicher Wetterlagen das Phänomen des „Alpinen Pumpens“ bekannt, welches während sommerlicher Wetterlagen sowohl am Tage als auch in der Nacht einen Einfluss auf die Durchlüftung der Stadt haben kann (Abb. 2.5).

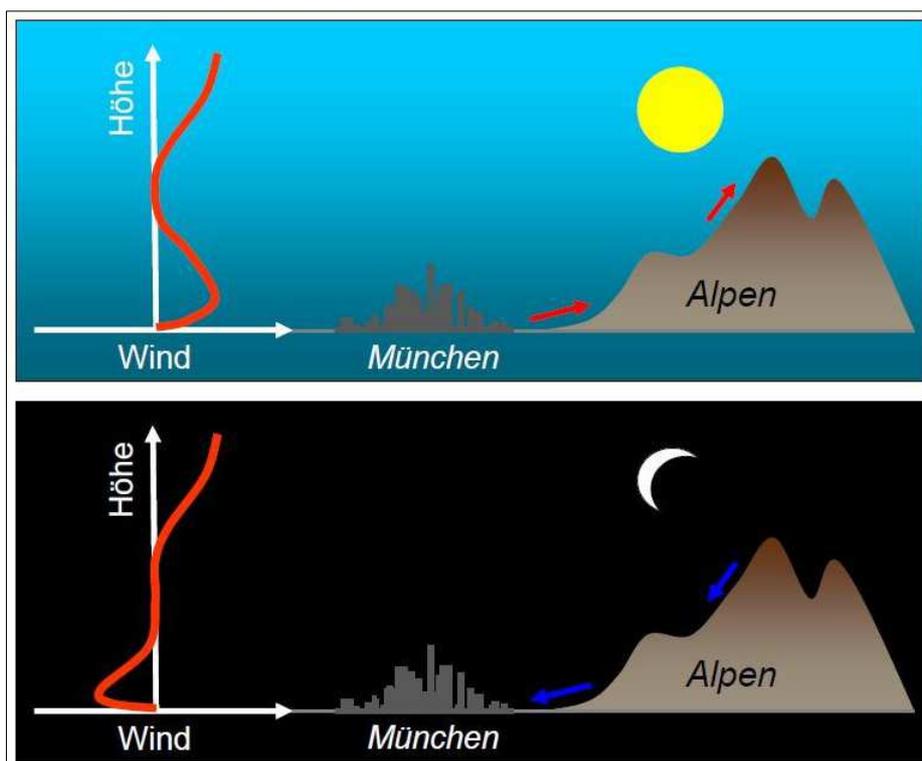


Abb. 2.5: Luftströmung im Voralpenraum während wolkenarmer sommerlicher Wetterlagen (Quelle: DWD; bereitgestellt durch die LH München)

Diese Windzirkulation ist dadurch gekennzeichnet, dass tagsüber der Wind in Richtung Alpen gerichtet ist und in den Nachtstunden kühle Luft aus den Alpen in Richtung Norden strömt. Zurückzuführen ist dieser Vorgang auf eine im Vergleich zur Münchner Schotterebene schnellere Erwärmung der Luft in den Alpen am Tage, während dort in der Nacht große Mengen an Kaltluft entstehen und in das Alpenvorland abfließen. Dieses regionale Zirkulationssystem kann sich jedoch nur ohne Nebel und bei fehlender Schneebedeckung im Alpenvorland ausbilden (MAYER & MATZARAKIS 1992).

Die Höhe dieser nächtlichen bodennahen Luftströmung wurde im Zuge des Forschungsvorhabens STADTKLIMA BAYERN (BRÜNDL et al. 1987) auf ca. 500 m beziffert. Dieser Prozess ist in den durchgeführten Modellsimulationen allerdings nicht explizit nachgebildet worden, da dies die Erfassung des Voralpenlandes vorausgesetzt hätte und so das Modellgebiet zu groß geworden wäre. Das modellierte Kaltluftströmungsfeld weist allerdings in der zweiten Nachthälfte zum Analysezeitpunkt 04:00 Uhr eine deutliche Südkomponente auf.

### Effekt der „Städtischen Wärmeinsel“

Im Ballungsraum München entstehen durch anthropogene Einflüsse spezielle Stadtklimate, die sich unter anderem durch Wärmeinseleffekte (Urban Heat Island – UHI) auszeichnen. Dabei handelt es sich allerdings nicht um eine „geschlossene“ städtische Wärmeinsel, sondern um ein kleinteiliges Mosaik von bebauten Bereichen, Grün- und Wasserflächen („Wärmeinselarchipel“; vgl. BRÜNDL 1987). Im Sommer führen sie u.a. durch verminderte Verdunstung 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 (s. Glossar). Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen von warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge dessen treten Ausgleichsströmungen auf, die bodennah zu einem Zuströmen von Luft aus dem Umland führen. Solche Strömungen sind auf einen überwärmten Bereich ausgerichtet und fließen bevorzugt über gering bebaute Flächen in die Stadt ein. Die neutralen bis labilen Temperaturschichtungen, die tagsüber während sommerlicher Hochdrucklagen vorliegen, bewirken, dass den bodennahen Winden häufig eine geringe Höhenströmung überlagert ist. Das Aufsteigen von Warmluftblasen verursacht zusätzlich eine Böigkeit der bodennah nachströmenden Luft, so dass die Ausgleichsströmungen am Tage insgesamt weniger sensibel auf Strömungshindernisse reagieren. Während der Tagsituation führen sie aufgrund des Temperaturniveaus zwar nicht zum Abbau von Wärmebelastungen in den Siedlungsflächen, tragen aber zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht und damit zur Verdünnung von Luftschadstoffen bei

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 (Abb. 2.6). Während der nächtlichen Abkühlung fließt dann kühlere

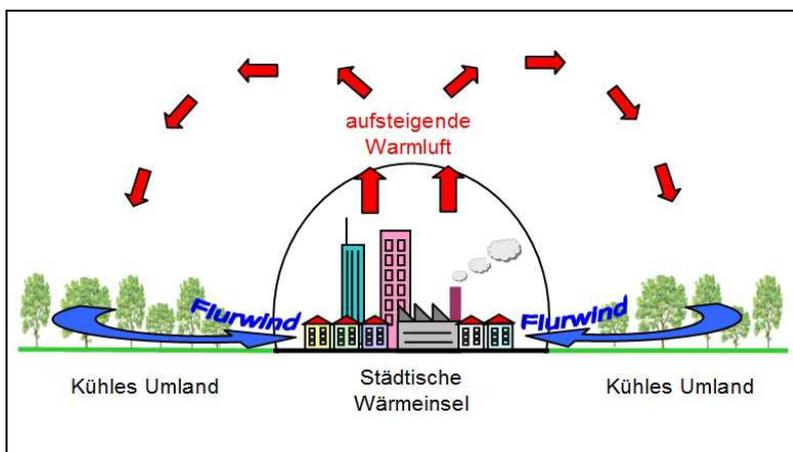


Abb. 2.6: Prinzipskizze Flurwinde

Umgebungsluft aus stadtnahen Grün- oder 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.

Die nächtlichen Ausgleichsströmungen können aufgrund ihrer insgesamt geringeren Dynamik leicht durch Hindernisse und Rauigkeiten abgeschwächt werden. Um die klimatischen Effekte der Stadtstrukturen besonders herausarbeiten zu können, ist eine sommerliche wolkenlose Wettersituation ohne übergeordnete Strömung als „Worst Case“-Fall angenommen worden, bei der sich thermische und lufthygienische Belastungen besonders stark in den Siedlungsflächen ausbilden können. Der Luftaustausch beruht damit im Wesentlichen auf den Temperaturunterschieden zwischen den jeweiligen Stadtstrukturen und kann darüber hinaus noch durch das regionale Strömungssystem des „Alpinen Pumpens“ (s.u.) beeinflusst werden. Damit unterscheidet sich das Modellszenario der Klimaanalyse deutlich von der eingangs beschriebenen mittleren Wettersituation, welche durch insgesamt höhere Windgeschwindigkeiten (v.a. aus westlichen Richtungen) und wesentlich geringerer Wärmebelastung gekennzeichnet ist. Mit der modellgestützten Klimaanalyse sollen die bioklimatischen Belastungen einzelner Bereiche der Stadt bestimmt sowie für das Stadtklima wichtigen Kaltluftproduktionsflächen und Kaltluftleitbahnen analysiert und hinsichtlich ihrer stadtklimatischen Bedeutung eingeordnet werden (s. Glossar).

Für die LH München sind in den vergangenen Jahren umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und veröffentlicht worden. Vor allem BRÜNDL et al. (1987) haben umfangreich den Einfluss von Bebauung und Bewuchs auf das Klima sowie die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten untersucht. Hervorzuheben ist das Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN mit den Teilprogrammen Thermalkartierung und Klimamessungen in München.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens STADTLUFT lag der Schwerpunkt auf den stadtklimarelevanten Luftströmungen in München (Teil II; MATZARAKIS und MAYER 1992). Betrachtet wurden dabei sowohl die austauschstärkeren als auch die windschwachen Wetterlagen. Als Ergebnis wurden u.a. die stadtklimatisch wirksamen Frischluftschneisen, Durchlüftungsachsen sowie kleinräumige Austauschzirkulationen ausgewiesen. Diese Bereiche wurden nachrichtlich in die Klimafunktions- und Bewertungskarte übernommen und ergänzen die auf Grundlage des modellierten Kaltluftströmungsfeldes abgeleiteten Kaltluftleitbahnen.

### **Stadtklimatisches Leitbild und Ziele der Leitlinie Ökologie der LH München**

Im strategischen Stadtentwicklungskonzept PERSPEKTIVE MÜNCHEN wurden Leitlinien für die zukünftige Stadtentwicklung erarbeitet. Im Rahmen der Leitlinie Ökologie (2001), fortgeschrieben durch den Teil Klimawandel und Klimaschutz (2012) wurde als Leitbild für den Bereich Klima und Luft folgendes definiert: „Ideales Stadtklima“ ist ein räumlich und zeitlich variabler Zustand der Atmosphäre in urbanen Bereichen, bei dem sich möglichst keine anthropogen erzeugten Schadstoffe in der Luft befinden und den Stadtbewohnern in Geknähne (charakteristische mittlere Länge ca. 150 m) eine möglichst große Vielfalt an Atmosphärenzuständen (=Vielfalt an urbanen Mikroklimaten) unter Vermeidung von Extremen geboten wird (nach MAYER 1989). Zudem wurden die folgenden stadtklimatischen Ziele formuliert:

- Reduzierung bzw. Minimierung bestehender lufthygienischer und thermischer Belastungen (Luftschadstoffe, thermische Belastung, belästigende Windflüsse)
- Vermeidung und Begrenzung neuer Belastungen bzw. Beeinträchtigungen
- Sicherung, Erhalt und Verbesserung klimatischer Ausgleichs- und Regenerationsflächen
- Sicherung und Verbesserung des groß- und kleinräumigen Luftaustausches sowie der Frischluftzufuhr
- Ausschöpfung kleinräumig wirksamer Maßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Aufenthaltsqualität der dort lebenden Menschen

### Sommer- und Hitzetage als Indikatoren für die sommerliche Wärmebelastung

Eine Wärmebelastung für Menschen ist mit dem Auftreten entsprechender Wetterlagen verbunden. Einen Hinweis auf deren Häufigkeit gibt, neben anderen meteorologischen Parametern, die Anzahl von Hitze- und Sommertagen. Als „Sommertag“ wird ein Tag bezeichnet, bei dem das Tagesmaximum mehr als 25°C beträgt. Bei einem „Hitzetag“ liegt das Maximum dagegen bei mehr als 30°C. Tabelle 2.1 zeigt die Jahressummen für den Bezugszeitraum 1981 bis 2010 für ausgewählte Stationen.

Station	Tage/Jahr im Zeitraum 1981-2010	
	Hitzetage	Sommertage
Karlsruhe	21,4	68,0
Freiburg	15,4	60,4
München	8,4	46,3
Hannover	6,2	32,5
Hamburg	4,5	26,5

Tab. 2.2: Jährliche Summen der Hitze- und Sommertage im Jahr (Quelle: DWD 2013)

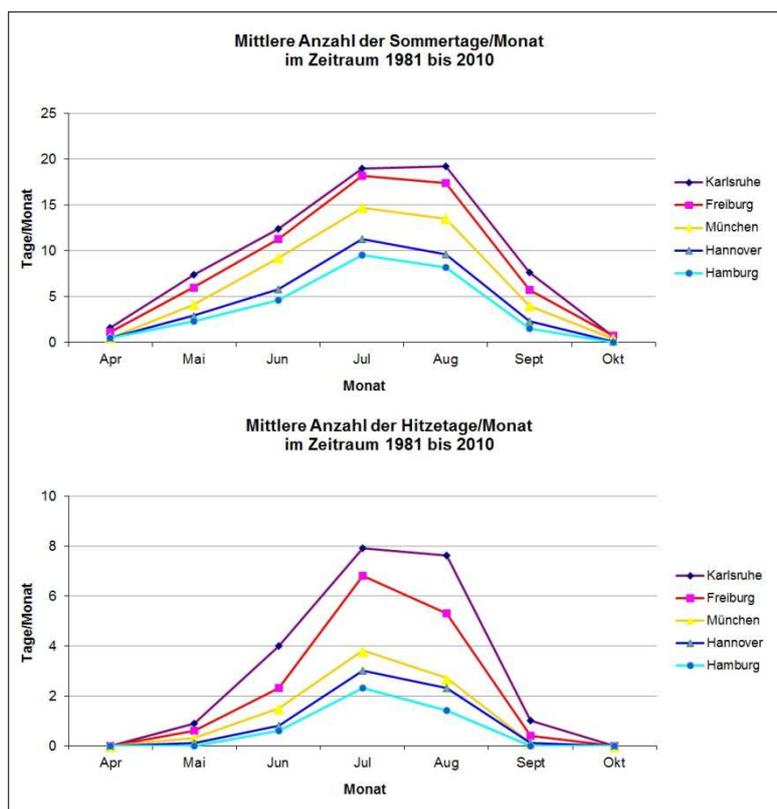


Abb. 2.7: Monatliche Summen der Hitze- und Sommertage (Quelle: DWD 2013)

Die Gegenüberstellung der Werte veranschaulicht das in der Region München vorliegende Belastungsniveau im Vergleich zu anderen Regionen in Deutschland. So ist die höchste Anzahl an Sommer- und Hitzetagen in Karlsruhe anzutreffen, während München mit durchschnittlich 8,4 bzw. 46,3 Tagen/Jahr ein eher mittleres Wertenniveau aufweist. Deutlich niedriger sind dagegen die Jahressummen in Norddeutschland. Sie betragen weniger als die Hälfte der entlang des Oberrheins gemessenen Werte. Die monatlichen Summen der Sommer- und Hitzetage im Bezugszeitraum 1981 bis 2010 zeigt Abb. 2.7. So sind bei allen Stationen die meisten Tage erwartungsgemäß in Juli und August anzutreffen. Gleichzeitig wird allerdings auch der Abstand der Werte zwischen denen von München und denen im Oberrheintal sichtbar.

Bei einem Vergleich der Werte der Referenzperiode 1961-1990 mit dem Zeitraum 1981-2010 ist eine deutliche Zunahme der Sommer- und Hitzetage in München um 10,5 bzw. 3,6 zu beobachten (Tab. 2.2).

Station	Sommertage		Hitzetage	
	Zeitraum 1960-1990	Zeitraum 1981-2010	Zeitraum 1960-1990	Zeitraum 1981-2010
München - Stadt	35,8	46,3	4,8	8,4

Tab. 2.3: Jährliche Summen der Hitze- und Sommertage in den Zeiträumen 1961-1990 und 1981-2010 (Quelle: DWD 2013)



Abb. 2.8: Anzahl der Sommertage an der Station München-Stadt im Vergleich zum langjährigen Mittel (Datengrundlage DWD, bereitgestellt durch die LH München, Statistisches Amt)

Die in Abb. 2.8 dargestellte Anzahl der Sommertage zeigt, dass zuletzt 1996 das langjährige Mittel von 36 Sommertagen im Jahr unterschritten wurde. Dem steht das Jahr 2003 mit 88 Sommertagen gegenüber. Aus den Messwerten der vergangenen 20 Jahre kann insgesamt gesehen der Trend einer Zunahme abgeleitet werden.

### Einfluss des Klimawandels

Auch die mögliche Entwicklung des Klimas in der Zukunft spielt vor allem für die Klimaanpassung eine bedeutende Rolle. Im Folgenden sollen kurz die Projektionen für verschiedene Klimavariablen dargestellt werden. Hierbei wird auf das Klimamodell WETTREG 2010<sup>1</sup>, Szenario A1B, zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um eines von vier regionalen Klimamodellen für Deutschland und ist ein statistisches Verfahren zur Berechnung von meteorologischen Parametern unter dem Einfluss des Klimawandels für bekannte Messstationen. In den Abb. 2.9 bis 2.13 werden für die Klimastation München-Stadt die projizierten Entwicklungen verschiedener Parameter bis zum Ende des Jahrhunderts dargestellt. Dabei stehen weniger die Einzelwerte im Vordergrund als vielmehr die Dynamik der zu erwartenden klimatischen Veränderungen. Abbildung 2.9 zeigt die mit WETTREG modellierte Jahresdurchschnittstemperatur an der Klimastation

<sup>1</sup> S. Glossar

München-Stadt für den Zeitraum 2015 - 2100. Projiziert wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen auf 13,4°C im Jahre 2100. Der höchste Jahresmittelwert von 13,6°C wird mehrere Male in den 2080er Jahren sowie für das Jahr 2098 berechnet. Mit Blick auf den Referenzzeitraum 1961-1990 bedeutet dies einen Anstieg der Jahresmitteltemperaturen um etwa 4,5°C bis zum Ende des Jahrhunderts.

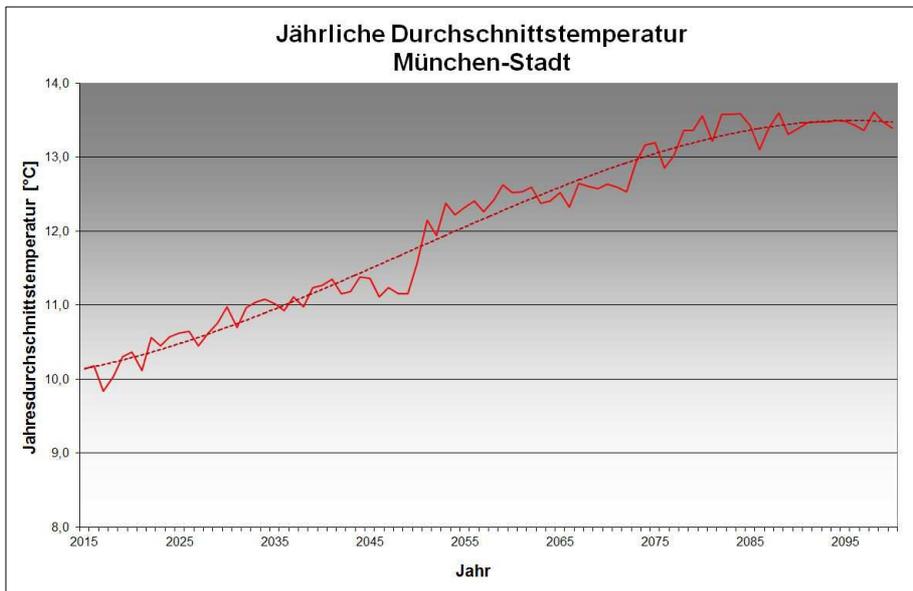


Abb. 2.9: Jahresdurchschnittstemperatur München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100 WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B, (gestrichelte Linie = polynomischer Trend)

Dies hat Auswirkungen auf die übrigen temperaturbezogenen Variablen wie die Häufigkeit des Auftretens von Sommertagen. Der bereits beschriebene Trend einer Zunahme verstärkt sich unter dem Einfluss des Klimawandels weiter (Tab. 2.10). Vor allem für die zweite Hälfte des Jahrhunderts wird ein verstärkter Anstieg der Sommertage beschrieben. Aus den WETTREG-Berechnungen geht hervor, dass das Maximum der Anzahl von Sommertagen pro Jahr mit bis zu 108 in den 2080er Jahren zu erwarten ist. Gegenüber Heute bedeutet dies mehr als eine Verdoppelung der jährlichen Sommertage.

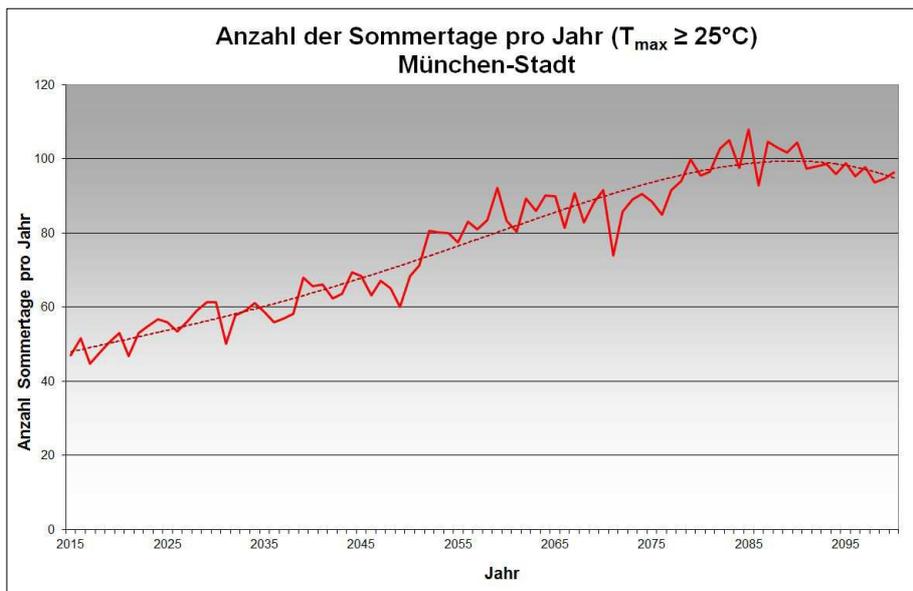


Abb. 2.10: Anzahl Sommertage pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100 WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B, (gestrichelte Linie = polynomischer Trend)

Diese Entwicklung der steigenden Temperaturen wird auch bei der Betrachtung der Entwicklung der Hitzetage in München deutlich. Für den menschlichen Organismus sind vor allem die besonders heißen

Tage mit Lufttemperaturen von mehr als 30°C und damit einhergehenden bioklimatisch ungünstigen Bedingungen in den Siedlungsflächen belastend. Davon betroffen sind insbesondere ältere oder sehr junge Menschen, aber auch Menschen, die schwere körperliche Arbeiten verrichten müssen. In Abbildung 2.11 wird die Anzahl der Hitzetage pro Jahr für den Zeitraum 2015 bis 2100 begleitet von einer polynomischen Trendlinie dargestellt. Analog zu den Sommertagen zeichnet sich ein markanter Anstieg der Hitzetage pro Jahr zur Mitte des Jahrhunderts ab. Im Jahr 2100 werden 44,4 Tage im Jahr mit einer Temperatur  $\geq 30^\circ\text{C}$  projiziert.

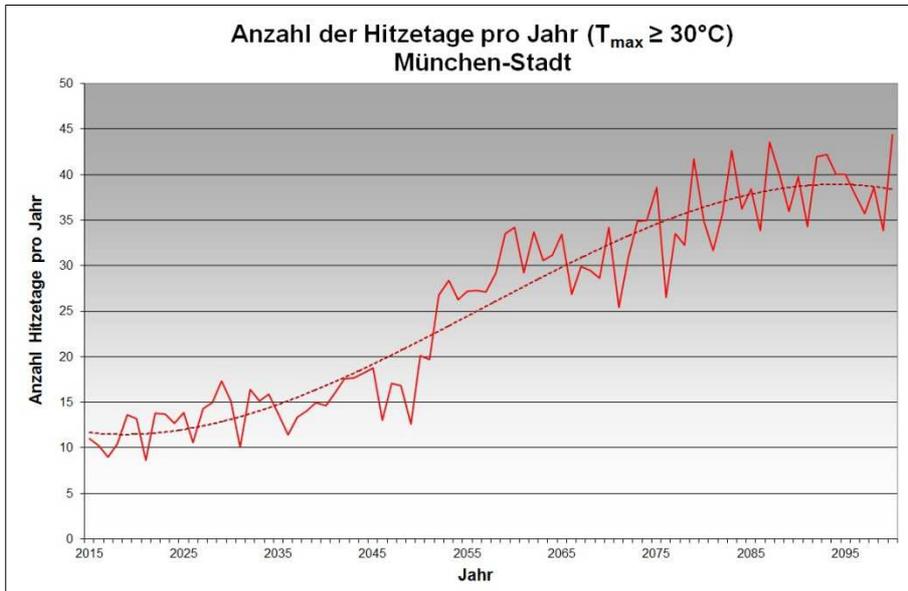


Abb. 2.11: Anzahl Hitzetage pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100 WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B, (gestrichelte Linie = polynomischer Trend)

Hinsichtlich der Gesundheitsgefahren ist die Betrachtung der Entwicklung von Hitzewellen von besonderem Interesse, denn je länger die hohen Temperaturen andauern, desto stärker ist auch die Belastung für den menschlichen Organismus. Für den Begriff Hitzewelle gibt es in Deutschland keine offizielle Definition. Er beschreibt ganz allgemein eine Witterungssituation, bei der mehrere Tage mit ungewöhnlich hohen Temperaturen aufeinander folgen. In Anlehnung an TINZ et al. (2008) werden hier mindestens 5 Tage mit Maximaltemperaturen über 30°C als Hitzewelle angesehen (Abb. 2.12).

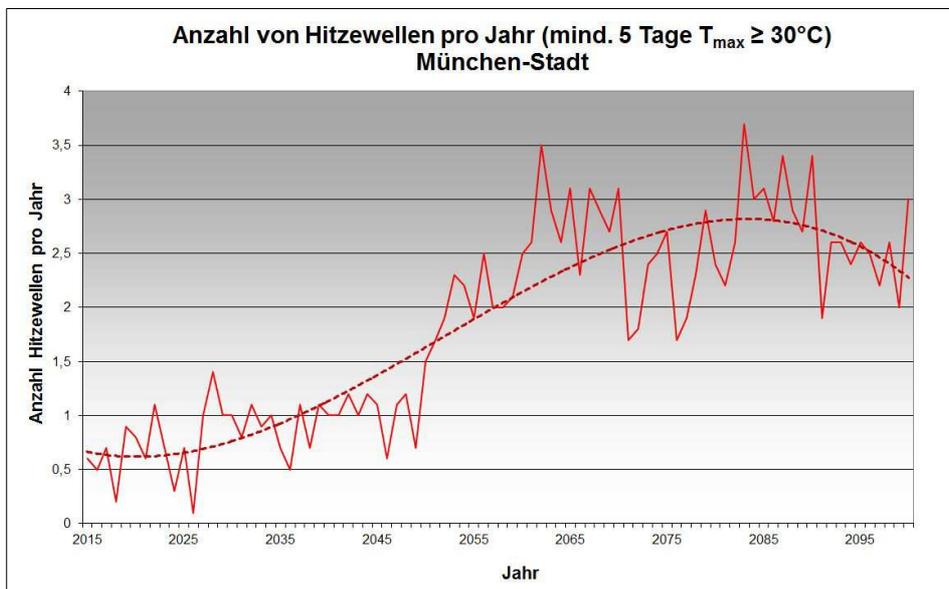


Abb. 2.12: Anzahl Hitzewellen pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100 WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B, (gestrichelte Linie = polynomischer Trend)

Abbildung 2.12 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Hitzewellen pro Jahr für die Station München-Stadt. Der zunächst noch moderate Anstieg verstärkt sich etwa ab dem Jahr 2050 deutlich. Werden bis 2020 noch weniger als eine Hitzewelle im Jahr projiziert, sind es im Jahr 2083 3,7 Hitzewellen. Für die 2090er Jahre deutet sich ein leichter Rückgang im Auftreten von Hitzewellen an.

Da der Klimaanalyse eine sommerliche Nachtsituation mit geringem Luftaustausch und starker Erwärmung der Siedlungsflächen zugrunde liegt, soll auch am Beispiel der Tropennächte die zukünftige Entwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts dargestellt werden. Als Tropennacht wird eine Situation bezeichnet, bei der die nächtliche Minimaltemperatur  $20^{\circ}\text{C}$  nicht unterschreitet. Damit geht eine erhebliche Wärmebelastung in den Siedlungsflächen einher. Die aus WETTREG abgeleitete Anzahl der Tropennächte/Jahr für die Station München-Stadt ist in Abb. 2.13 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Häufigkeit der Tropennächte von durchschnittlich weniger als 4 in der ersten Hälfte des Jahrhunderts ab 2060 stark zunimmt und dann ab 2075 auf einem Niveau von durchschnittlich mehr als 14 Tropennächten pro Jahr verbleibt. Der Höchstwert von 18,5 Tropennächten wurde für das Jahr 2094 berechnet.

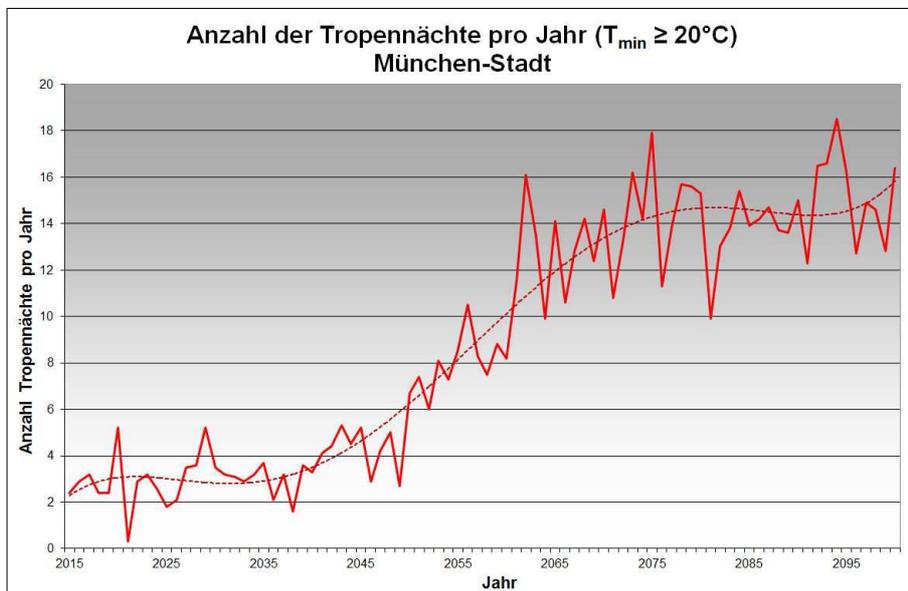


Abb. 2.13: Anzahl Tropennächte pro Jahr München-Stadt, Betrachtungszeitraum 2015- 2100  
WETTREG 2010-Simulation, Szenario A1B, (gestrichelte Linie = polynomischer Trend)

Es kann somit festgehalten, dass der sich bereits zwischen den meteorologischen Bezugsperioden 1961-1990 und 1981-2010 am Beispiel von Sommer-/Hitzetagen abzeichnende Trend einer zunehmenden sommerlichen Erwärmung weiter fortsetzen wird. Bereits die im Sommer 2003 auftretende Hitzewelle hat den Zusammenhang von Wärmebelastung und dem Anstieg der Mortalitätsrate deutlich gemacht (JENDRITZKY 2007). Angesichts der hier kurz dargestellten projizierten Entwicklung verschiedener meteorologischer Größen für die nächsten Jahrzehnte und der zunehmenden Häufigkeit von Extremtemperaturen wird deutlich, wie wichtig Maßnahmen zum Klimaschutz und Klimaanpassung für die Erhaltung gesundheitlich möglichst günstiger Lebensbedingungen in den Städten sind.

### 3 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei einer Gesamtgröße des Untersuchungsraums von ca. 567 km<sup>2</sup> geht die Abgrenzung des Untersuchungsraumes über das Stadtgebiet Münchens hinaus und zielt darauf ab, auch außerhalb des Stadtgebiets vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung verwendete Rasterzellenauflösung beträgt 50 m.

#### 3.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell des Großraums München mit einer Auflösung von 50 m zurückgegriffen werden (Stadt München 2012a). Die Reliefsituation ist durch die nach Norden hin abfallende Münchner Schotterebene gekennzeichnet, wobei sich deutlich der Einschnitt der Isarniederung abzeichnet (Abb. 3.1).

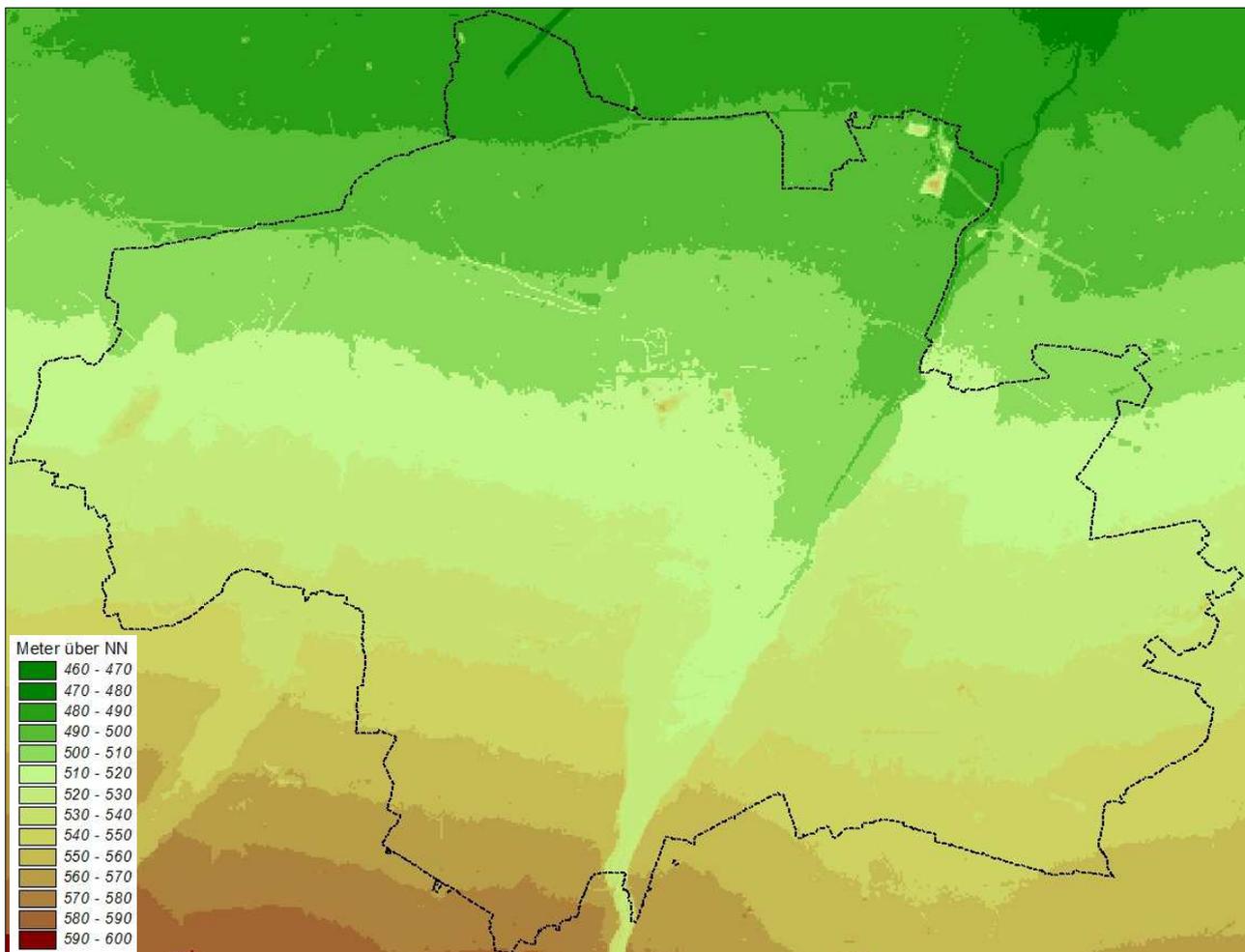


Abb. 3.1: Geländehöhe im Untersuchungsraum

Die höchste Erhebung ist mit ca. 579 m ü. NN im südlichen Stadtgebiet anzutreffen. Die niedrigste Geländehöhe beträgt etwa 480 m ü. NN im Bereich der Regattaanlage im Stadtteil Feldmoching-Oberschleißheim. Somit ergibt sich eine maximale Höhendifferenz von etwa 100 m innerhalb des Untersuchungsraumes.

### 3.2 Nutzungsstruktur

Die möglichst exakte Abbildung der Nutzungsstruktur ist für die Klimamodellierung von zentraler Bedeutung: Nutzungsbedingte Veränderungen des örtlichen Windfeldes und des Wärmehaushaltes sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ausbildung eines gegenüber dem Umland veränderten Stadtklimas (siehe Kapitel 5.1). Zahlreiche der vielen stadtklimatologisch relevanten Parameter lassen sich daher über die Strukturhöhe, die Bebauungsdichte und den Grad der Oberflächenversiegelung einer Fläche abschätzen. Die Ausprägung dieser Einflussgrößen ist nutzungsabhängig und nimmt bei gleichen Nutzungstypen ähnliche Werte an. Somit ermöglicht die Analyse der Nutzungen im Untersuchungsgebiet eine Abgrenzung von Gebieten ähnlicher stadtstruktureller Ausstattung und damit einhergehender stadtklimatischer Charakteristika. Für die Einordnung dieser Einflussgrößen wurden im vorliegenden Gutachten Nutzungsklassen definiert, die eine unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten sinnvolle Differenzierung der Oberflächenstruktur erlauben (s. Mosimann et al. 1999). Dabei wurde ein vereinfachter 14-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet, dessen Abgrenzung eine Zuweisung des Versiegelungsgrades und der Strukturhöhe auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen erlaubt (Tab. 3.1). Zur Aufbereitung der Nutzungsstrukturen für die Modellrechnung wurde die Strukturtypenkartierung der LH München verwendet (LH München 2012b) und deren Detailinformationen wie z.B. zum Versiegelungsgrad bei der Zuordnung der Nutzungskategorien berücksichtigt. Für die Areale außerhalb des Stadtgebietes, für die keine detaillierten Nutzungsdaten vorlagen, sind Corine-Landnutzungsinformationen zur Vervollständigung der Geodatenbasis herangezogen worden (DLR-DFD 2009). Die ausgewiesenen Nutzungskategorien zeigt Abb. 3.3.

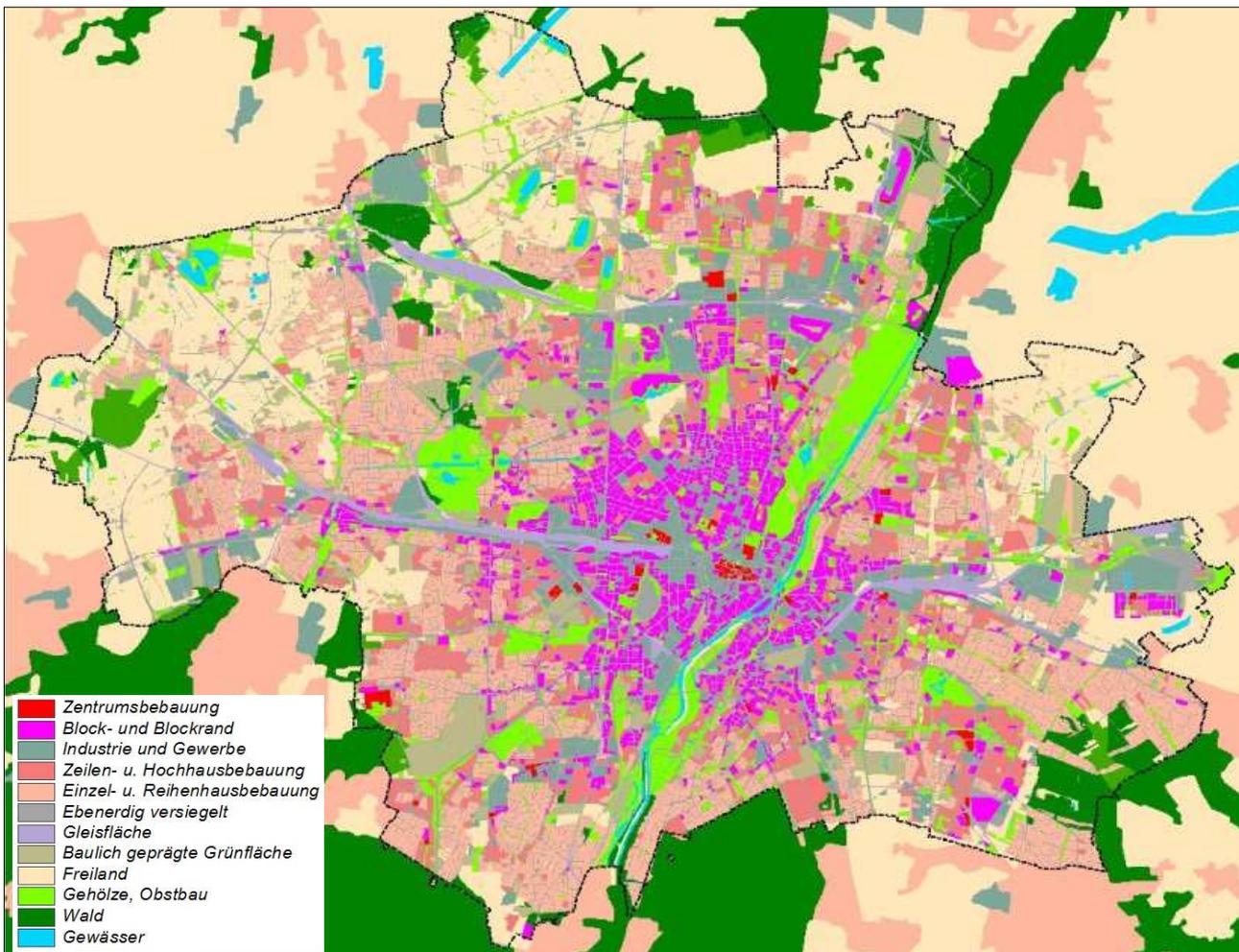


Abb. 3.2: Nutzungsstruktur im Stadtgebiet München

Klasse	Flächentyp	Beschreibung	Mittlerer Versiegelungsgrad (%)	Mittlere Strukturhöhe (m)
1	Zentrumsbebauung	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 Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt.	55	15,0
5	Einzel- und Reihenhausbebauung	Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbebauung und einer Zeilenbebauung ist fließend.	41	5,0
6	Straßenraum	Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.	95	0,0
7	Gleisfläche	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe.	25	0,5
8	Baulich geprägte Grünfläche	Unter diesem Flächentyp sind vegetationsgeprägte Flächen zusammengefasst, welche zugleich auch einen gewissen Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen) und/oder Bebauung aufweisen. Dazu zählen z.B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze. Es überwiegt aber letztlich die Eigenschaft als Grünfläche.	25	5,0
9	Freiland	Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.	5	1,0
10	Gehölz	Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün.	5	2,0
11-13	Wald	Waldflächen (unterschieden nach Laub-, Nadel- und Mischwald) sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.	5	12,5
14	Wasserfläche	Still- und Fließgewässer.	0	0

Tab. 3.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

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 50 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, Plätze, kleinere Baumgruppen) den einzelnen Rasterzellen mittels umfangreichem Abgleich auf Basis von Luftbildern (Stadt München 2012c) zugeordnet. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. In Tab. 3.2 werden die Strukturtypen der Stadt München sowie die ihnen zugewiesenen Nutzungskategorien der Modellrechnung gegenübergestellt.

Dabei handelt es sich um eine vorläufige Zuweisung auf Ebene der Blockstrukturen. Die tatsächliche Zuordnung der Nutzung auf Ebene des 50 m Rasters kann in Einzelfällen davon abweichen. Dies kann z.B. in baustrukturellen Übergangsbereichen erforderlich sein, wo zwei unterschiedliche Strukturtypen innerhalb der Rasterzelle direkt aneinandergrenzen. Hier gilt es dann eine Nutzungskategorie zu vergeben, welche die „mittleren“ Struktureigenschaften am besten repräsentieren kann.

Tab. 3.2: Strukturtypen München und zugewiesene Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Typ Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Nutzungskategorie FITNAH
10	Kleingartenanlagen	Bebauung mit kleinen Gartenlauben in Einzelgärten inkl. Grabeland sowie größeren Freizeitgärten am Stadtrand	8
21	Kleine, freistehende Einzelhäuser	In größeren Gartengrundstücken, meist einzeln	8
22	Einzel- und Doppelhausbebauung	Siedlungen kleinerer, freistehender Gebäude mit Hausgärten: von alten Villenbieten mit großen Gartengrundstücken bis zu modernen Einzelhausbebauung in kleinen Grundstücken.	5
30	Reihenhausbebauung	Zusammenhängende Ein-/Zweifamilienhausbebauung mit Gartengrundstücken (einschließlich verdichteter Flachbebauung)	5
41	Kleine, freistehende Geschossbauten	Einzelne, kleinere Wohn- oder Verwaltungsgebäude	4/5
42	Zeilenbebauung, Stadtrandbebauung	In der Regel niedrige (drei- bis sechsgeschossige) Wohnzeilen sowie Geschossbauten entlang der Straße	4
43	Punkthochhäuser, Scheibenhochhäuser und große, freistehende	Hohe, freistehende Geschossbauten	4
44	Kettenhausbebauung	Moderne Geschosswohnungsbau mit halboffener Grundrissform	4
45	Kleine Geschossbaukomplexe	Mehrere zusammenhängende, in der Regel niedrige Geschossbauten (z.B. Schulkomplexe mit Turnhalle)	3
46	Große Geschossbaukomplexe	Mehrere zusammenhängende, meist großvolumige Geschossbauten (Verwaltungsbauten)	1
47	Durchmischung unterschiedlicher Geschossbauformen	Mehrere der vorgenannten Geschossbautypen kleinräumig durchmischt, kein Typ dominiert	4/5
51	Blockrandbebauung	Weitständige, straßenseitig geschlossene Geschossbebauung, meist im Blockinnern Grünflächen	2/4
52	Blockbebauung	Dichte, straßenseitig geschlossene Geschossbebauung, z.T. auch Innenhofbebauung	2
61	Kleine Hallenbebauung und Lager	Kleinere Produktions- und Lagerstätten, Flachbebauung kleinerer Einkaufszentren	3
62	Große Hallenbebauung	Große Industriebebauung (Fabrikgebäude), große Flachbebauung (Supermärkte etc.)	3
71	Mischbebauung: kleine Geschoss- und Hallenbebauung	Meiste Industrie- und Gewerbegebiet mit kleinräumiger Durchmischung von Verwaltungsgebäuden und Produktionsstätten	3
72	Mischbebauung: große Geschoss- und Hallenbebauung	Wie vorhergehend, aber überwiegend große Verwaltungsgebäude und Lagerhallen, Tennishallen	3
81	Alte Dorfkerne	Mit kleinräumiger Durchmischung unterschiedlicher Bebauungstypen (Bauernhöfe, Kirchen, kleinere Geschossbauten, Einzelhausbebauung, Lagerhallen etc.)	5
82	Mischgebiete	Überwiegend kleinräumige Durchmischung von Wohnbebauung und Kleingewerbe (kleine Produktionsstätten, Lagerhallen)	4

90	Sonderbauten	Z.B. Kläranlagen, Umspannwerk, Einzelne Bebauungsstrukturen, nicht weiter klassifizierbar (Unikate)	5/8
101	Laubwälder	Geschlossene, ausgedehnte Laubbestände (auch kleinere Inselbestände in Nadelwäldern)	11
102	Nadelwälder	Geschlossene, ausgedehnte Nadelgehölzbestände (auch kleinere Inselbestände in Laubwäldern)	12
103	Mischwald (neu hinzugekommen)	Geschlossene, ausgedehnte Bestände von Laub- und Nadelholz	13
111	Hecken und Feldgehölze	Lineare Gehölzstrukturen und kleine Gehölzinseln überwiegend in der Feldflur	10
112	Große Alleen und Stadtgehölze	Große, straßenbegleitende Baumreihen und kleinere geschlossene Gehölzbestände im Siedlungsbereich	10
121	Kleine Grünflächen	Kleine, begrünte Stadtplätze	10
122	Parkanlagen	städtische Grünanlagen, bzw. parkähnlich gestaltetet Anlagen (z.B. Freibäder mit ausgedehnten Liegewiesen)	10
130	Friedhöfe	Einschließlich aufgelassener Anlagen	8
141	Sportgroßeinrichtungen	Z.B. Olympiagelände, Trab- und Galopprennbahn (inkl. Tribünenbauten)	8
142	Rasen- und Tennissportanlagen	Bezirks- und Schulsportanlagen mit Fußballplätzen, Tennisplätzen	8
150	Wiesen und Weiden	Wirtschaftsgrünland, größere Wiesen im Siedlungsbereich, soweit nicht erkennbar als Park oder Sportanlage gestaltet	9
160	Extensivgrünland und Brachen	Magerrasen, sonstiges Extensivgrünland, Streuwiesen und Verlandungsvegetation, Brachen	9
170	Ackerflächen	Feldfrüchte (Getreide, Hackfrüchte, Feldfutteranbau, Ölfrüchte)	9
181	Glashausbebauung	Ausgedehnte, gärtnerische Kulturen unter Glas	8
182	Sonderkulturen und Baumschulen	Gemüse, Gärtnereien und Baumschulen	10
191	Kiesflächen	Kiesplätze, Aufgrabungen/Abgrabungen	9
192	Großbaustelle	In Bebauung, derzeit keinem Strukturtyp zuordenbar	1-5
200	Großparkplätze	Größere Parkplatzflächen	6
211	Autobahnen	Bundesautobahnen	6
212	Mehrspurige Ausfallstraßen	Mindestens vierspurige Ausfall- und Ringstraßen	6
213	Zweispurige Straßen	Hauptstraßen, überwiegend zweispurig mit übergeordneter Funktion (keine Wohnsammel- und Wohnstraßen)	6
214	Autobahnkreuze	Große Kreuzungs- und Auffahrtbereiche mit Abstandsgrünflächen	6
215	Sonstige Erschließungsstraßen		6
220	Gleisanlagen	Schienenwege, Bahnhofsbereiche (ohne größere Bahnhofsgebäude, Lagerhallen)	7
230	Stillgewässer	Seen, Baggerseen, größere Teiche bzw. Teichkomplexe	14
240	Fließgewässer	Flüsse, Bäche, große Gräben und Kanäle (inkl. gewässerbegleitendem Grün)	14
250	Sonstige Freiflächen	Besondere Freiflächen, Entsorgungseinrichtungen (Müllberg)	8
251	Öffentliche Plätze	Versiegelte, meist für den Verkehr gesperrte Flächen	6

## 4 Methodik

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

#### Allgemeines

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst für die tägliche Wettervorhersage routinemäßig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten meso- (und) mikroskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt oder einer Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von einigen Metern bis hin zu Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene müssen diese in die Mikro- und Mesoskala eingeordnet werden. Beispiele für solche mesoskaligen Phänomene sind der Einfluss orographischer Hindernisse auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde oder auch Düseneffekte in Straßen, sowie das Phänomen der urbanen Wärmeinsel.

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

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

Die Verteilung der lokalklimatisch relevanten Größen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings immer nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Mesoskalige Modelle wie FITNAH können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen, die nicht gemessen wurden und Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln.

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

### Grundgleichungen

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Alle mesoskaligen Modelle basieren daher, wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik).

Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst noch erweitert werden um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung der stadtklimatologisch wichtigen Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom mesoskaligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst (vgl. Abb. 3).

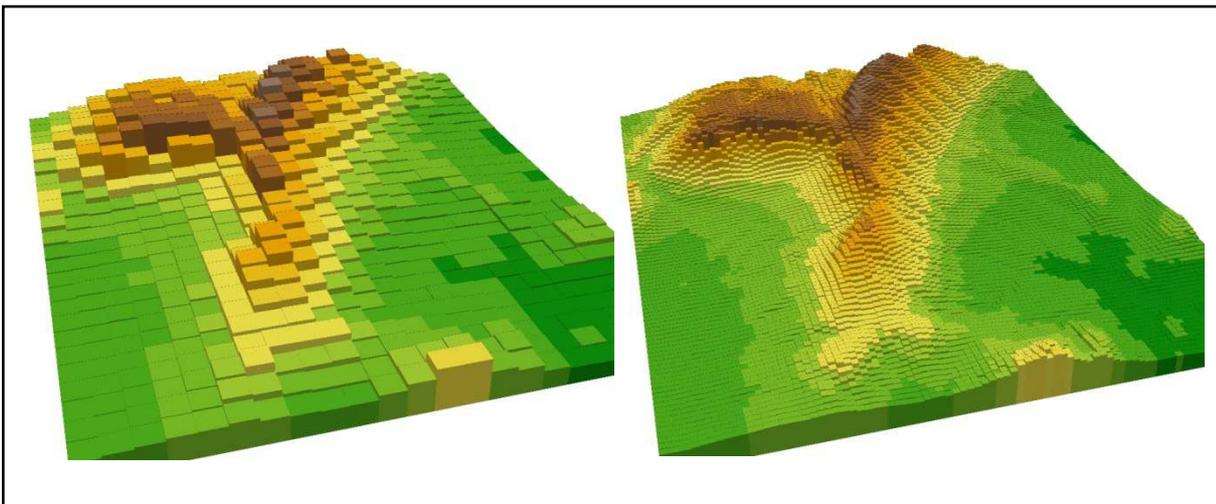


Abb. 4.1: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m) bei einem digitalem Geländehöhenmodell

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und an die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH verwendete räumliche Maschenweite 50 m x 50 m. Bei allen Modellrechnungen ist die vertikale Gitterweite nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre sind die Rechenflächen besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m. Nach oben hin wird der Abstand  $\Delta z$  immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen).

## Parametrisierungen

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

Die beiden wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude als Hindernisse dar und verzögern die Strömung. 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. 4.2). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

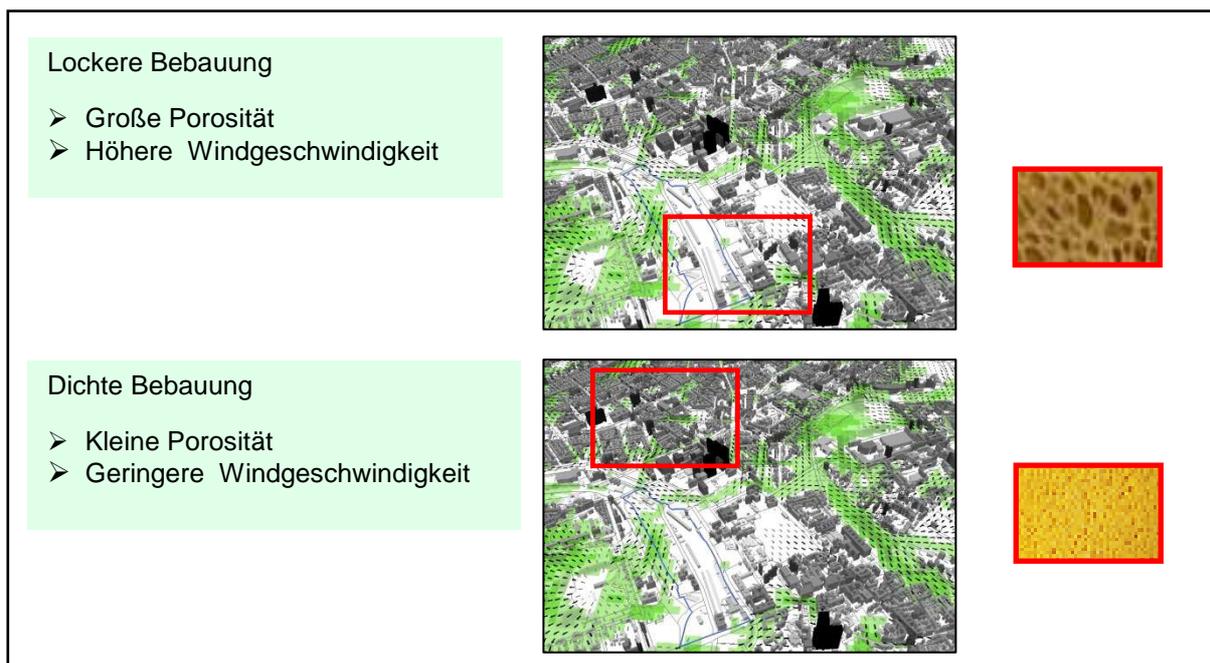


Abb. 4.2: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

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

Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind in der Regel so klein, dass sie nicht vom Raster des Modells aufgelöst werden können und damit parametrisiert werden müssen. Eine solche Parametrisierung muss in der Lage sein, die Windberuhigung im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im oberen Kronenraum und die nächtliche Abkühlung bzw. die mittägliche Erwärmung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erfassen (Abb. 4.3). Bei FITNAH werden zusätzliche Terme in das Gleichungssystem eingeführt, die zum einen über einen Widerstandsterm die Modifizierung des Windfeldes gewährleistet und zum anderen den Strahlungshaushalt im Bereich eines Baumbestandes modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß, 1993).

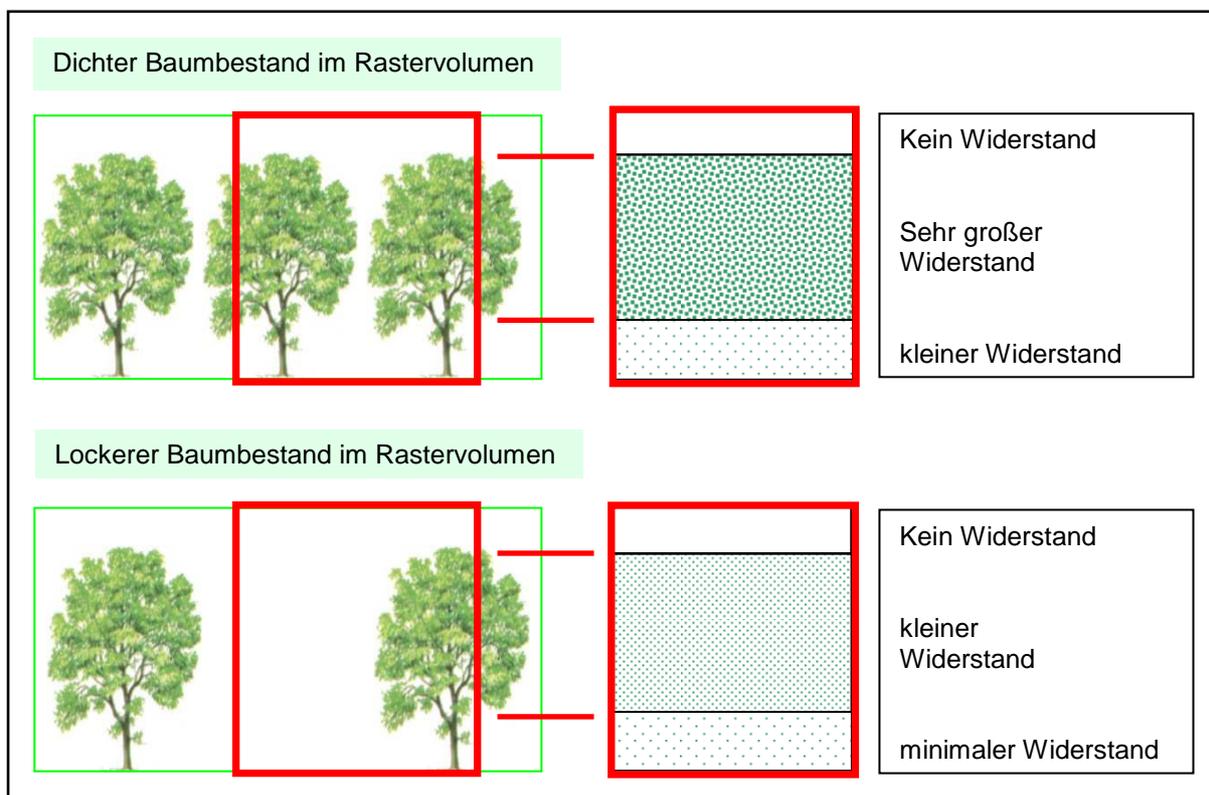


Abb. 4.3: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

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

## Eingangsdaten

Bei numerischen Modellen wie FITNAH muss zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten zur Verfügung stehen (Abb. 4.4). Diese müssen zum einen die Landschaft charakterisieren, für welche die lokalklimatische Studie durchgeführt werden soll, und zum anderen auch die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren.

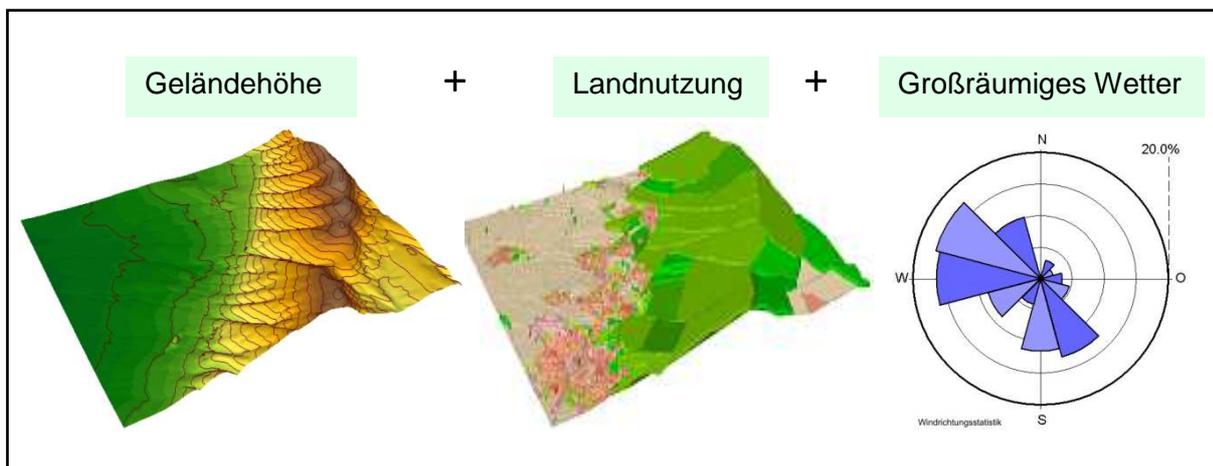


Abb. 4.4: Eingangsdaten für die Modellrechnung

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

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

## Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Die Häufigkeit des Auftretens von windschwachen Wettersituationen (Tagesmittel weniger als 2 Bft bzw. 1,6 m/s) in München kann, gemittelt über die Jahre 1993 bis 2012, auf durchschnittlich 18 % der Tage während der Sommermonate Juni bis August beziffert werden (Quelle: DWD Station München Flughafen). Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt:

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

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

In Abb. 4.5 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Lufttemperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

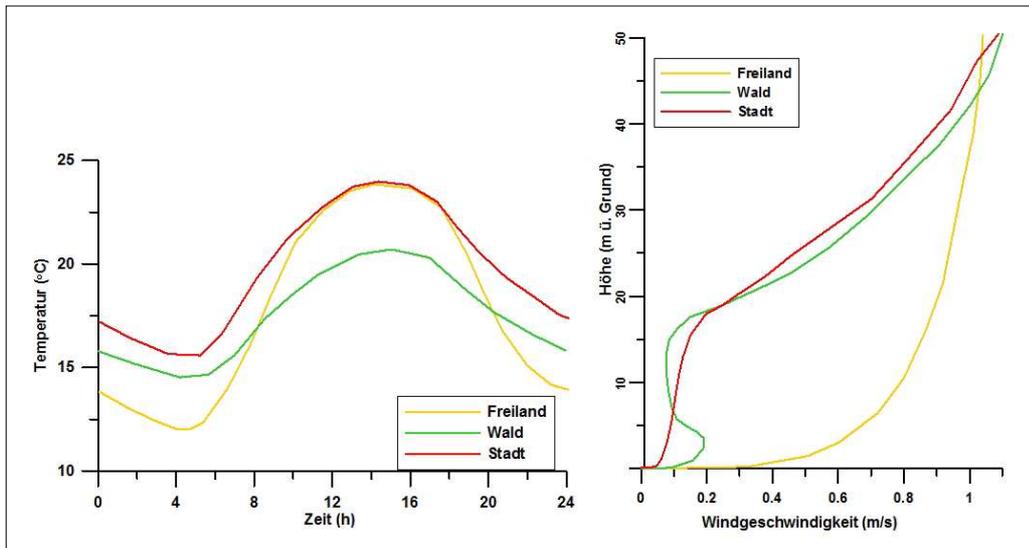


Abb. 4.5: Beispielhafter Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

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

## 4.2 Standardisierung der Parameter

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

Wünschenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, werden die Parameter über eine **z-Transformation** standardisiert<sup>2</sup>. Bei einer z-Transformation wird das arithmetische Gebietsmittel des Parameters zunächst gleich Null gesetzt, anschließend werden die Originalmaßeinheiten der um dieses Gebietsmittel streuenden Werte in Vielfache der Standardabweichung umgerechnet. Hieraus ergeben sich vier Bewertungskategorien, deren Abgrenzung

<sup>2</sup> Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt

durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (s. Abb. 4.6).

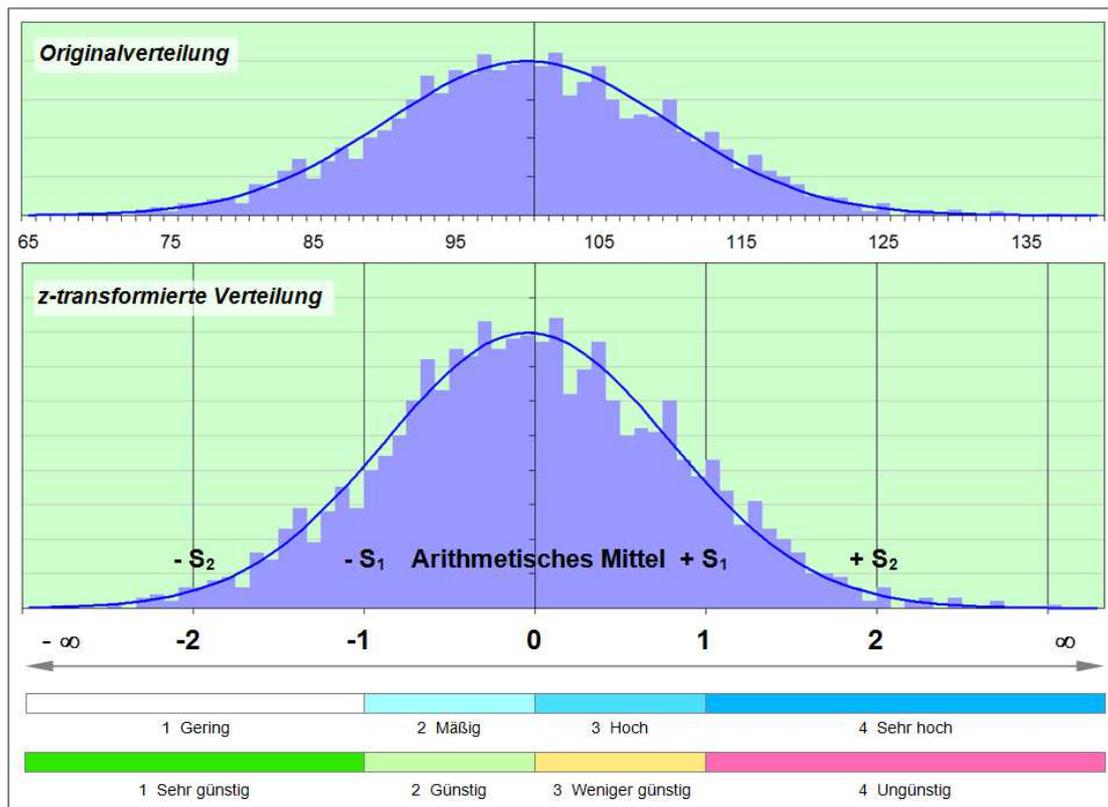


Abb. 4.6: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

Neben ihrem Einsatz für die Ermittlung und Beurteilung des Klimaparameters Kaltluftvolumenstrom (S. 24) wird die z-Transformation in dieser Untersuchung auch bei der Bewertung der bioklimatischen Situation (s. S. 14) verwendet.

### 4.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen

Um Aussagen über die Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen auch untereinander abgrenzbar sein. Das bedeutet, dass die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und bei den Siedlungsflächen die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren kann. Um diese Heterogenität in der Klimafunktions- bzw. Bewertungskarte darstellen zu können, wurde den Blockflächen der verwendeten digitalen Strukturtypenkartierung (vgl. Kap. 3), die relevanten Klimaparameter wie z.B. Windgeschwindigkeit oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Diese Parameter liegen als rasterbasierte Felder in einem Geographischen Informationssystem als 50 m Raster vor. Umfasst ein Baublock mehrere Rasterzellen eines Parameters, wird aus den Zelleneinzelwerten ein Mittelwert gebildet. Somit steht für jede Blockfläche (bebaute als auch unbebaute Freiflächen) eine Reihe von Klimaparametern bereit. Darauf basierend werden den Teilflächen Bewertungsindices zugewiesen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

#### 4.4.1 Grün- und Freiflächen

Während in der Klimafunktionskarte die Grünflächen vor allem hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert werden, steht in der Bewertungskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Daraus ergibt sich eine unterschiedliche Vorgehensweise bei der Bewertung der Grünareale, auf die in Kap. 7.1 (S. 47) genauer eingegangen wird. Die Darstellung und Bewertung der Siedlungsflächen bleibt hingegen in Klimafunktions- und Bewertungskarte gleich.

Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten *vegetationsgeprägte Freiflächen* wie z.B. Ackerflächen, Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der Klimafunktionskarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kap. 5.1.3, S. 23).

Die Einstufung des innerhalb von Grünflächen auftretenden Kaltluftvolumenstrom orientiert sich an dem in der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) beschriebenen Verfahren zur Z-Transformation (Kap. 4.2, S. 11). Dieses Vorgehen legt allgemein das lokale/regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde und bewertet die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen in einem Untersuchungsraum. Während diese Methode vor allem für die Ermittlung der bioklimatischen Situation geeignet ist, wird sie in dieser Untersuchung darüber hinaus auch für die Bewertung des Klimaparameters Kaltluftvolumenstrom herangezogen.

Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier Bewertungskategorien (s. Tab. 4.1), welche durch den Mittelwert sowie die obere und untere  $S_1$ -Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen  $>0$  bedeuten überdurchschnittliche Werte, woraus sich die Bewertung in hoch und sehr hoch ergibt. Negative Ausprägungen von  $<0$  bedeuten hingegen ein unterdurchschnittliches Niveau (entsprechend mäßig). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung eines Klimaparameters und die daraus resultierende Vergleichbarkeit der Variablen untereinander oder mit anderen Untersuchungen.

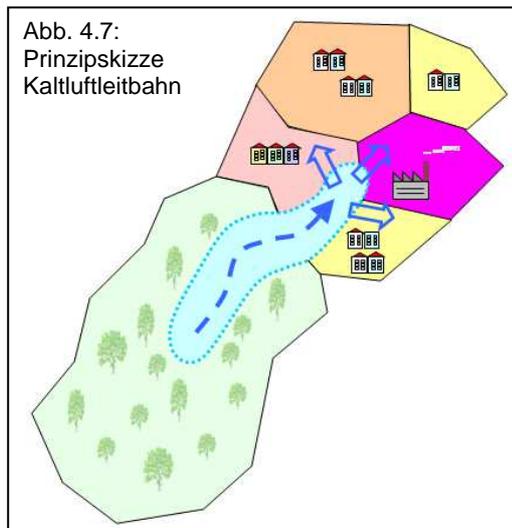
Die qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms zeigt Tabelle 4.1, wobei der Wertebereich  $< 0$  zu mäßig zusammengefasst wird. Die Bewertung des Kaltluftvolumenstroms orientiert sich somit an den Kategorien der Z-Transformation, wobei für jede Grünfläche ein mittlerer Z-Wert zugewiesen wurde. Da in der Klimafunktionskarte die Kaltluftlieferung von Grünarealen beurteilt wird, bezieht sich die statistische Analyse auf die Wertausprägung *innerhalb der Grünflächen*. Daher weicht die Klassifizierung von der des flächendeckenden rasterbasierten Volumenstroms ab (vgl. Kap. 5.3).

Mittlerer Z-Wert pro Grünfläche	Kaltluftvolumenstrom in $m^3/s$	Bewertung
$> 1$ (obere $S_1$ -Schranke)	$> 1500$	Sehr hoch
1 bis 0	1500 bis $\geq 900$	Hoch
0 bis $< -1$ (untere $S_1$ -Schranke)	$< 900$	Mäßig

Tab. 4.1: Bewertung der Kaltluftlieferung innerhalb von Grünflächen

Die Darstellung der der Grünflächen erfolgt als abgestufte Flächenfarbe. Zudem erhalten Grünflächen  $> 1,5$  Hektar mit einem mindestens hohen Kaltluftvolumenstrom eine Pfeilsignatur mit der Hauptströmungsrichtung innerhalb einer Fläche.

## Kaltluftleitbahnen



*Leitbahnen* verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 4.7). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird sowohl in der Klimafunktionskarte als auch der Bewertungskarte dargestellt. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Straßenräume.

Die Leitbahndarstellung wird im Kartenbild um eine Signatur von Flächen mit Luftaustauschpotential ergänzt, welche von

MAYER & MATZARAKIS (1992) im Stadtgebiet von München ausgewiesen wurden (vgl. Kap. 6.3).

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

### 4.4.2 Bioklima in den Siedlungsflächen

Die Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der *Kaltlufteinwirkungsbereich* kennzeichnet das Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer sommerlichen Strahlungswetternacht. Um die Strömung als klimaökologisch relevant einordnen zu können, sollte sie eine Strömungsgeschwindigkeit von mehr als 0,1 m/s erreichen. Damit geht einher, dass die im Einwirkungsbereich befindliche Bebauung überwiegend günstige bioklimatische Verhältnisse aufweist. Letztendlich sind für die menschliche Gesundheit die bioklimatischen Bedingungen in der Nacht bedeutender als die Tagesmaxima der Lufttemperatur, da gerade die nächtlichen Erholungsphasen für den Körper besonders wichtig sind. Für die Bewertung der human-bioklimatischen Situation können verschiedene Beurteilungskriterien herangezogen werden.

Für die Beurteilung der *bioklimatischen Belastung* eines Baublockes ist in dieser Untersuchung der Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die Wärmebelastung herangezogen worden, welcher nach der VDI Richtlinie 3785 Bl. 1 (VDI 2008) in diesem Zusammenhang die häufigste Anwendung findet. Nach JENDRITZKY et al. (2009) besteht eine enge Korrelation zwischen dem PMV und dem Universellen Thermischen Klimaindex UTCI. Der PMV ist somit gut geeignet, auf mesoskaliger Ebene die bioklimatische Situation der Stadtstrukturen abzubilden. 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. Bei der Berechnung des PMV-Wertes müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, der Dampfdruck und die Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein.

Diese meteorologischen Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Vegetationsanteil) und der Charakterisierung der Wettersituation (z.B. Wind, Luftmasseneigenschaften), können mit Hilfe des mesoskaligen Modells FITNAH diese Verteilungen innerhalb von München detailliert berechnet werden. Der nächtlichen Wärmebelastung, wie sie in der Klimafunktions- bzw. Bewertungskarte dargestellt ist, liegt die Werteausprägung in der zweiten Nachthälfte um 4 Uhr zugrunde. Es handelt sich um den PMV-Wert für eine typische *Sommernacht* mit geringem Luftaustausch und ungehinderter langwelliger Ausstrahlung bei einem wolkenlosen Himmel. Die Belastung ist in den dicht bebauten Bereichen mit ausgeprägtem Wärmeinsel-Effekt am stärksten ausgebildet. Dabei wirken lokal auftretende Kaltluftströmungen modifizierend auf die räumliche Ausprägung des PMV. Anhand der exemplarischen Bewertung dieser Situation, in der sich thermische und lufthygienische Belastungen ausbilden, werden Planungshinweise aus stadtklimatischer Sicht abgeleitet.

### Beurteilung der bioklimatischen Situation

Es wurde, analog zum Kaltluftvolumenstrom, eine statistische Analyse des PMV-Ergebnisrasters durchgeführt und den (in der Klimafunktions- und Bewertungskarte dargestellten) Blockflächen der Siedlungsräume Flächenmittelwerte für die Belastung zugewiesen. Über das in der VDI-RL 3785 Blatt 1 beschriebene Verfahren zur Ermittlung der bioklimatischen Situation wird mittels der Z-Transformation das Modellgebiet in günstige und ungünstige Areale untergliedert. In der Nachtsituation ist dabei die Abweichung von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum ausschlaggebend.

Bei der Zuordnung eines Baublocks ist die jeweilige durchschnittliche Ausprägung des Z-Wertes des PMV innerhalb der Fläche relevant (als Rasterzellenmittelwert), aus welchem sich die Zuordnung zu den Bewertungskategorien ergibt (vgl. Tabelle 4). Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier qualitative Einstufungen, welche durch den Mittelwert sowie die obere und untere S1-Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen > 0 bedeuten überdurchschnittliche Werteausprägungen und resultieren in den Kategorien „Weniger günstig“ und „Ungünstig“. Negative Ausprägungen von < 0 repräsentieren ein unterdurchschnittliches Belastungsniveau und werden entsprechend als „Günstig“ und „Sehr günstig“ kategorisiert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung eines Klimaparameters und der sich daraus ergebenden Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen. Bei der Belastungsklasse 4 "Ungünstig" liegt eine überdurchschnittliche Wärmebelastung mit einem Z-Wert von mehr als 1 vor. Eine gewisse bioklimatische Belastung ist auch noch bei der Belastungsklasse 3 „Weniger günstig“ gegeben. Günstige Verhältnisse liegen hingegen bei den Klassen 2 und 1 vor und können aus bioklimatischer Sicht als positiv beurteilt werden. In Tab. 4.2 sind den jeweiligen Klassen außerdem charakteristische Bebauungstypen zugeordnet.

Belastungsstufe	Mittlerer Z-Wert pro Baublock	Darstellung in Klimafunktions-/Bewertungskarte
1 Sehr günstig	> -1 (untere S <sub>1</sub> -Schranke)	 <i>dörflich geprägte Siedlungstypen</i>
2 Günstig	-1 bis 0	 <i>Einzel- und Reihenhausbebauung</i>
3 Weniger günstig	0 bis 1	 <i>Zeilen- und Blockrandbebauung</i>
4 Ungünstig	< 1 (obere S <sub>1</sub> -Schranke)	 <i>verdichteter Siedlungsraum</i>

Tab. 4.2: Klassifizierung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen während einer windschwachen Sommernacht

Es kann festgehalten werden, dass die Belastungssituation zwar im Wesentlichen mit Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad einhergeht, kleinräumig aber noch durch den Einfluss von Grünflächen und lokalem Einwirken von Kaltluft deutlich variieren kann. Die für die Nacht dargestellte Flächenkulisse der bioklimatischen Situation lässt sich auf die Tagsituation übertragen, da der Anteil von Schatten spendender Vegetation mit zunehmender baulicher Dichte zurückgeht.

## 5 Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu verschiedenen meteorologischen Parametern für die zweite Nachthälfte (04 Uhr) erläutert, welche gleichzeitig die Grundlage der Analyse- und Bewertungskarte darstellen. Zu diesem Zeitpunkt haben sich auch die Luftaustauschprozesse am Stadtrand voll ausgebildet. Darüber hinaus liegen auch für den Beginn der Nacht (22 Uhr) Ergebnisse zum Kaltlufthaushalt vor. Diese sowie die übrigen Ergebniskarten sind dem separaten Kartenanhang zu entnehmen. Die Simulation der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung am Beispiel der Komponente Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) ergänzt den Umfang der Ergebnisse. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die nächtlichen stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen.

Im weiteren Text werden häufig die Begriffe „Kalt-“ bzw. „Frischluffproduktion“ sowie „Kaltluftproduktionsflächen“ verwendet. Aus physikalischer Sicht ist dies nicht korrekt, da streng genommen keine Luft „produziert“ werden kann sondern über die Energieumsätze an der Bodenoberfläche eine Abkühlung der Luft erfolgt. Diese Bezeichnungen haben sich aber als Fachbegriffe in der Stadt- und Landschaftsplanung etabliert (vgl. auch BRÜNDL et al. 1987). Im Glossar werden die jeweiligen Begrifflichkeiten erläutert.

### 5.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld

#### Allgemeines:

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmaß der Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- und Oberflächeneigenschaften – große Unterschiede aufweisen, so dass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit mehr als 6°C Temperaturabweichung einstellen kann.

Besonders auffällig dabei ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume. Die in Städten gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnisse lassen sich auf einige wesentliche Faktoren zurückführen. Hierzu gehören

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

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

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im Wald beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, wobei hier sauerstoffreiche, staubfreie und wenig belastete Luft entsteht. Während tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen, treten nachts, im Vergleich zu nicht mit Gehölz bestandenen Grünflächen, eher milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können daher in begrenztem Maße auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen.

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

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung und Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Im Folgenden werden die Ergebnisse zum Temperaturfeld für den Zeitpunkt 04 Uhr morgens erläutert (Abb. 5.2). Für den Ausschnitt München-Innenstadt wird das Ergebnis in Abb. 5.3 dargestellt.

### **Ergebnisse Temperaturfeld Tagsituation – 04 Uhr morgens:**

Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 13,6°C und Maximalwerten von bis zu 20,5°C eine Spannweite von etwa 7°C. Die mittlere Temperatur des Untersuchungsgebietes liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17,1°C.

Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weisen die Münchner Innenstadt, Gewerbeflächen sowie großvolumige Geschossbaukomplexe die höchsten Temperaturen von mehr als 20°C auf, was mit der hohen Baumasse und der hohen Oberflächenversiegelung von bis zu 95% einher geht (Abb. 5.1). Diese nehmen vor allem im Norden des Stadtgebietes größere Areale ein. Im Bereich der Stadtteilzentren sind meist geringere Temperaturen zwischen 19°C und 20°C zu beobachten.

Große Teile des Siedlungsraumes sind durch Zeilen- sowie Reihen- und Einzelhausbebauung geprägt, in der mit 17°C bis 19°C deutlich niedrigere Lufttemperaturen vorliegen. Von den Wohnbauflächen weist die Einzelhausbebauung vor allem an den Siedlungsrändern das geringste Temperaturniveau auf, wobei dort

18°C selten überschritten werden. Darüber hinaus zeigen die Verkehrsflächen, abhängig vom Versiegelungsgrad und Lage im Stadtgebiet, Temperaturen zwischen 18°C und 20°C.

Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor, wobei auf ihre Rolle als Kaltluft produzierende Areale auch in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

Flächenhaft niedrige Temperaturen von weniger als 15°C sind vor allem über den landwirtschaftlich genutzten Flächen am Stadtrand zu beobachten, was in der starken langwelligen Wärmeausstrahlung nach Sonnenuntergang begründet liegt. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als 14°C am westlichen und südlichen Stadtrand anzutreffen. Die Waldareale besitzen dagegen ein vergleichsweise höheres Temperaturniveau von 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 Freiflächen des Umlandes weisen die innerstädtischen Grünflächen, abhängig von ihrer Größe und Form, ein höheres Wertespektrum auf, welches meist zwischen 17°C und 19°C beträgt. In den übrigen, kleineren Grünflächen sinkt die Temperatur nur noch selten auf weniger als 18°C ab. Hier wird deutlich, dass diese Flächen in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind und daher die vergleichsweise geringen Temperaturen des Umlandes nicht mehr erreicht werden.

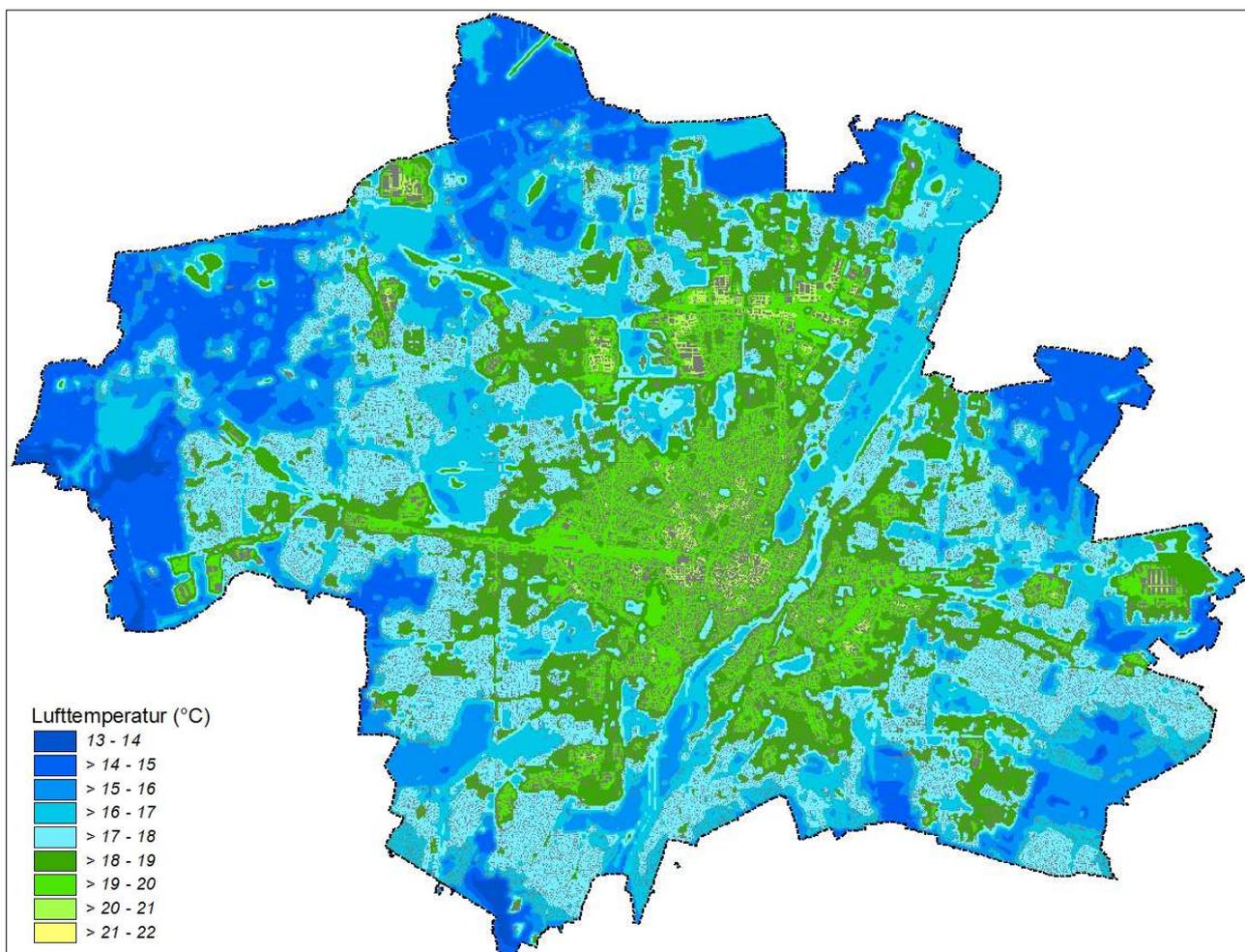


Abb. 5.1: Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

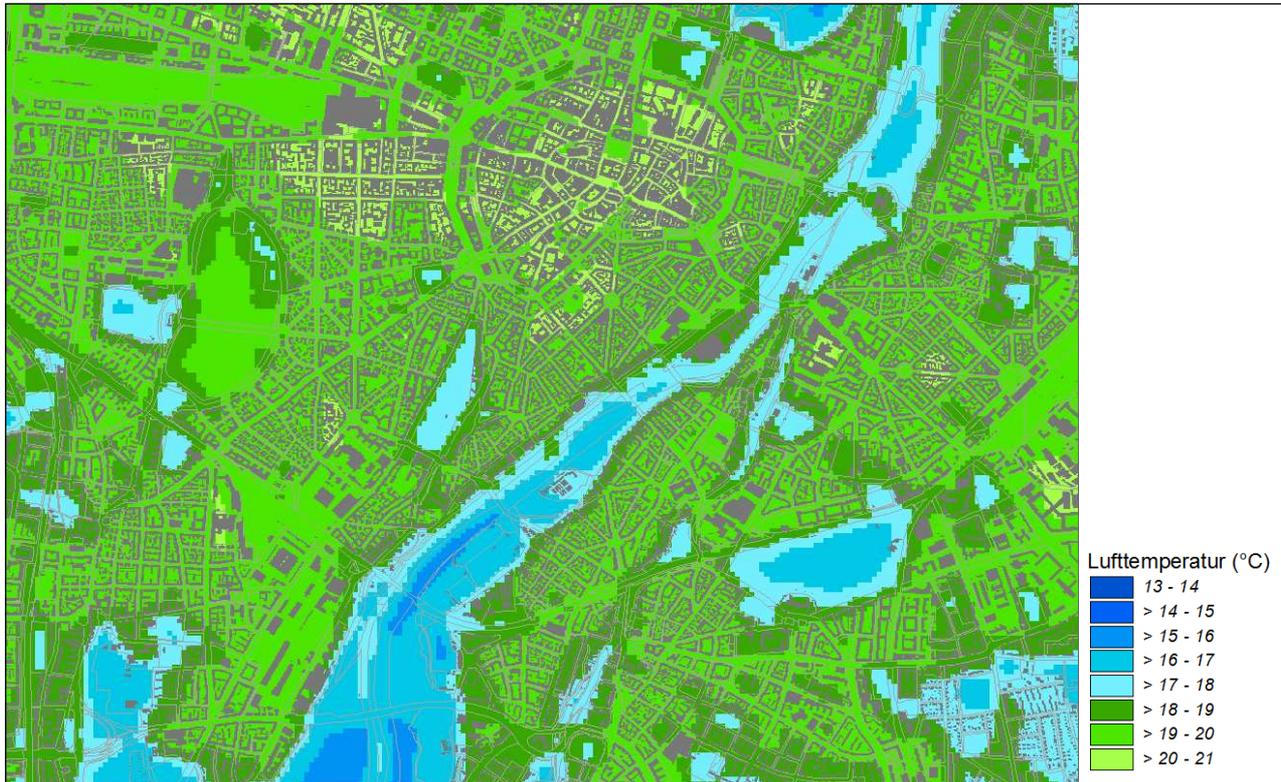


Abb. 5.2: Lufttemperatur in 2 m Höhe im Vertiefungsraum München-Stadtmitte

### Lufttemperatur - Beispiel München-Stadtmitte

Einen Ausschnitt mit dem Bereich München-Stadtmitte sowie der Isarauen zeigt Abb. 5.2. Die stärkste Abkühlung ist mit weniger als 16°C innerhalb des Isartals südlich der Innenstadt zu beobachten (Blau). In der direkt angrenzenden Bebauung ist ein Temperaturniveau von 18°C bis 19°C anzutreffen (Dunkelgrün).

Mit steigendem Überbauungsgrad nehmen die Temperaturen zu und betragen innerhalb der ausgedehnten Block- und Blockrandbebauung bis zu 20°C, während sie in der Innenstadt auch darüber hinausgehen können (Hellgrün). Gleichzeitig zeichnen die innerhalb der Bebauung lokalisierten Grünflächen mit niedrigeren Temperaturen ab und vermindern die Ausbildung einer zusammenhängenden nächtlichen „Wärmeinsel“. In dieser Hinsicht leisten vor allem die Isarniederung aber auch innerstädtische Grünzüge wie Bavariapark, Hofgarten sowie Süd- bzw. Ostfriedhof einen wertvollen Beitrag. Im betrachteten Ausschnitt lässt sich zwischen dem Isartal (<15°C; blaue Farbe) und der Innenstadt (>20°C; hellgrüne Farbe) ein maximaler Temperaturgradient von bis zu 5°C auf einer Entfernung von etwa 900 m beobachten.

## 5.2 Autochthones Windfeld

### Allgemeines:

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

Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Kap. 2). Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. KIESE et al. 1992).

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 Oberflächeneigenschaft und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden. Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den großen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen.

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

### **Ergebnisse Strömungsfeld:**

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung neben dem Kaltluftvolumenstrom ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der nächtlichen Luftaustauschprozesse, 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 im Kartenanhang enthaltenen Ergebniskarten stellen das sich zu den Analysezeitpunkten 22 und 04 Uhr 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 100 m x 100 m Kantenlänge (entspricht 4 Rasterzellen) aggregiert worden sind. Die unterlegten Rasterzellen stellen zudem die Windgeschwindigkeit flächenhaft in Farbstufung dar. Die Werte beziehen sich auf eine Analysehöhe von 2 m über Grund. Abgebildet sind alle Zellen des ursprünglichen 50 m Rasters, für die aufgrund einer modellierten Mindestwindgeschwindigkeit von  $\geq 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann. Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Untersuchungsraums reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von  $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  im westlichen Stadtgebiet von München (Dunkelblau). Abbildung 5.3 zeigt die räumliche Ausprägung der Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr als Raster im Stadtgebiet.

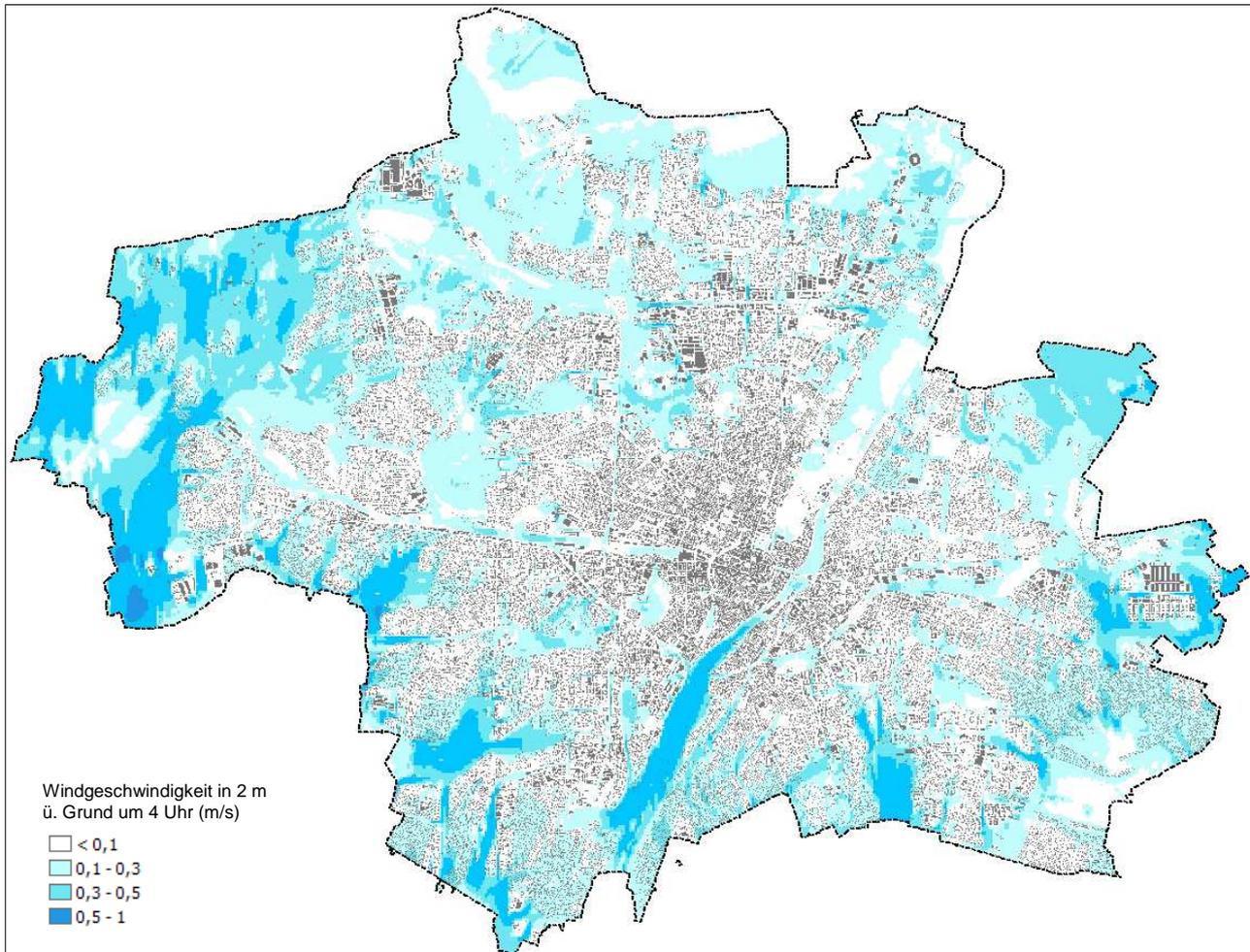


Abb. 5.3: Windgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Windgeschwindigkeiten von mehr als  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sind vor allem im Bereich der Regionalen Grünzüge wie dem Pasinger Stadtpark, der südlichen Isarniederung oder dem Südpark anzutreffen. Diese Grünstrukturen sind als Kaltluftleitbahnen einzuordnen, da sie das Eindringen von Kaltluft in den Siedlungskörper durch eine gering überbaute und grüngerprägte Oberflächenstruktur begünstigen.

Das Gelände im Simulationsgebiet fällt von Süden nach Norden hin kontinuierlich leicht ab, wodurch sich großräumige Kaltluftbewegungen aus südlicher Richtung ergeben und vor allem im westlichen Stadtgebiet zu einer hohen Kaltluftdynamik führen. Diese werden nördlich vom Germering über der vorgelagerten und meist landwirtschaftlich genutzten Fläche kaum verzögert (wenige Bauwerke bzw. andere Hindernisse) und gelangen in den Einflussbereich der Aubinger Lohe. Der Kaltluftstrom wird aufgrund der Hinderniswirkung der Aubinger Lohe einerseits sowie den gegenüberliegenden Siedlungsflächen von Puchheim im Nordwesten sowie Aubing im Südosten kanalisiert. Da dem Kaltluftvolumen ein geringerer Durchströmungsquerschnitt zur Verfügung steht, bewirkt diese Einengung einen lokalen Anstieg von Strömungsgeschwindigkeit und Kaltluftvolumenstrom. Die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten von  $0,5 \text{ m/s}$  bis  $1,0 \text{ m/s}$  entsprechen damit einem Wertenniveau, wie es auch im südlichen und östlichen Umland von München anzutreffen ist. Über den landwirtschaftlich genutzten Flächen im nördlichen Stadtgebiet sind dagegen etwas geringere Werte zwischen  $0,1 \text{ m/s}$  und  $0,3 \text{ m/s}$  zu beobachten.

Die Eindringtiefe der Kaltluft in die Siedlungsräume und damit auch das Maß der bioklimatischen Gunstwirkung während sommerlicher Hochdruckwetterlagen hängt ab von der Bebauungsstruktur und der Intensität der Kaltluftdynamik. Ganz allgemein wird eine vergleichsweise gering überbaute Einzel- und

Reihenhausbebauung besser durchströmt als eine Block- und Blockrandbebauung. Die Spanne der Eindringtiefe variiert deutlich und beträgt, abhängig von den baustrukturellen Bedingungen, zwischen 100 m und 700 m. Eine intensive Durchlüftung von durchgrünten Siedlungstypen bewirkt hier die sehr günstigen bioklimatischen Bedingungen (vgl. Kap. 6.2, S. 30). Große Teile der Innenstadt, Gewerbeflächen sowie der verdichteten Stadtteilzentren werden hingegen nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die zunehmende Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung allmählich abschwächen.

### Kaltluftströmungsfeld - Beispiel München-Stadtmitte

Einen detaillierten Ausschnitt zeigt Abb. 5.4, wobei das Strömungsfeld der Kaltluft als Pfeilsignatur und die Windgeschwindigkeit als flächenhaftes Raster für den Zeitpunkt 4 Uhr dargestellt sind. Dabei treten die südliche Isaraue sowie die Bahntrasse Hauptbahnhof - Pasing als Kaltluftleitbahnen hervor. Gleichzeitig sind die im Bereich von nördlicher Isaraue, Ostfriedhof oder Altem Südlichen Friedhof entstehenden Flurwinde zu beobachten. Aufgrund der meist dicht ausgeprägten Randbebauung dringt die Kaltluft nur über breitere Straßenräume oder Abstandsflächen weiter in die Bebauung ein.

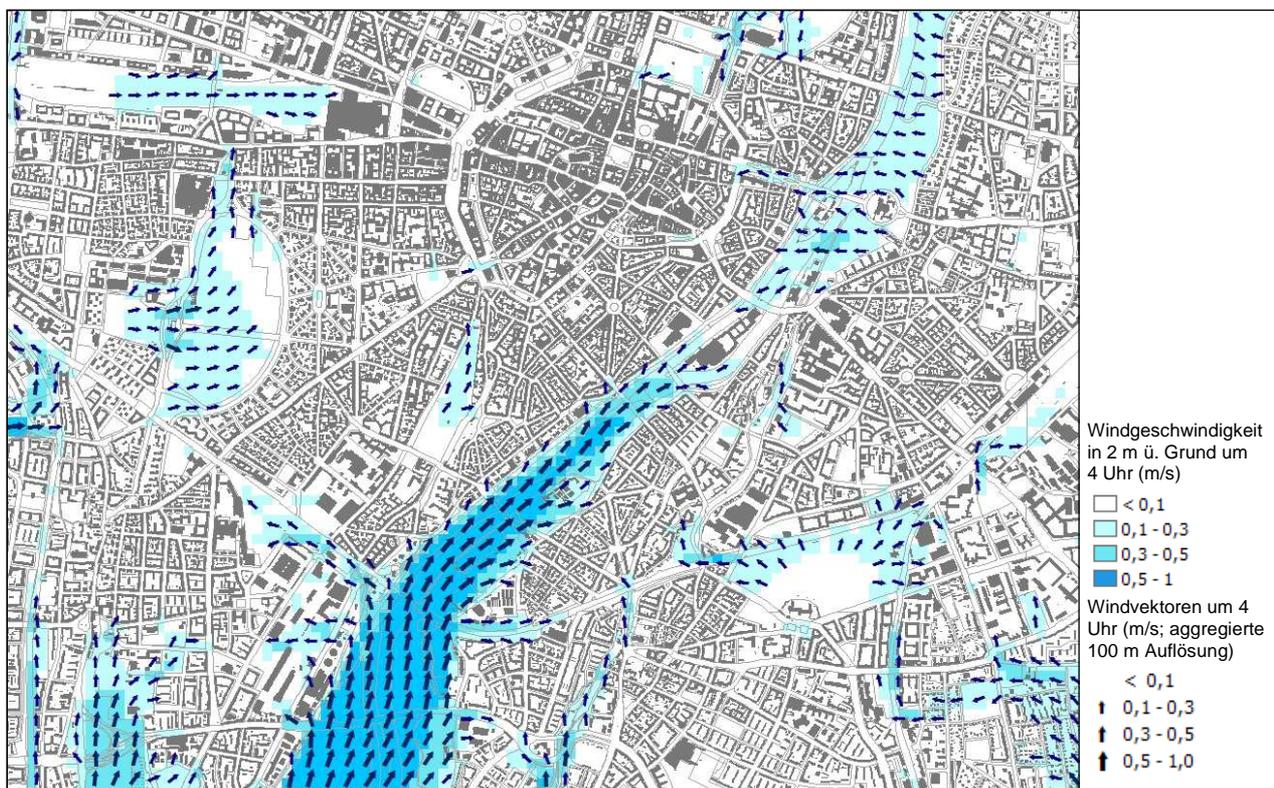


Abb. 5.4: Kaltluftströmungsfeld und Windgeschwindigkeit im Vertiefungsraum München-Stadtmitte

Die höchsten Windgeschwindigkeiten von mehr als 0,5 m/s sind innerhalb der Isaraue anzutreffen (dunkelblaue Farbe). Ansonsten liegen verbreitet Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,1 m/s und 0,3 m/s vor. Durch die abbremsende Wirkung der Bebauung sowie das höhere Temperaturniveau in den Siedlungsflächen geht die Strömungsgeschwindigkeit allmählich auf weniger als 0,1 m/s zurück.

### 5.3 Kaltluftvolumenstrom

**Allgemeines:** Wie bereits im vorigen Kapitel zum autochthonen Windfeld eingehender erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die *Höhe* der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Parameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 04 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist.

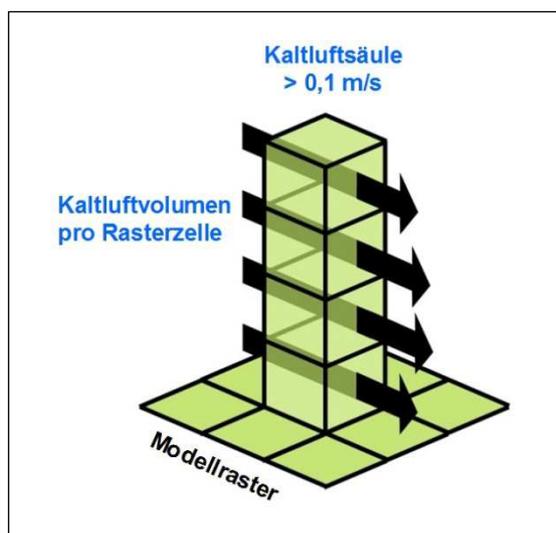


Abb. 5.5: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m<sup>3</sup>, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*dichte*

aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 50 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>3</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 5.5). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den *Zustrom von Kaltluft* und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials. Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich am auftretenden Wertespektrum innerhalb des gesamten Untersuchungsgebietes und weicht daher von der in Kap. 4.4.1 dargestellten Klassifizierung des Volumenstroms innerhalb von Grünflächen ab. Die qualitative Bewertung dieser meteorologischen Größe zeigt Tab. 5.1.

Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in m <sup>3</sup> /s
Sehr hoch	> 1400
Hoch	1400 bis ≥ 750
Mittel	750 bis ≥ 150
Gering	< 150

Tab. 5.1: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

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

Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mehr als 150 m<sup>3</sup>/s angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen bis mäßigen Volumenstrom aufweisen.

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher. Abbildung 5.6 zeigt den Kaltluftstrom für das gesamte Stadtgebiet München in einer qualitativen Abstufung. Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte vor allem über den großen Kaltluft produzierenden Flächen, den regionalen Grünzügen bzw. Kaltluftleitbahnen auf. Innerhalb von Straßenschluchten können die Werte durch eine Strömungskanalisation 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 wie der Kernstadt liegt dagegen ein geringer Kaltluftvolumenstrom vor. Die Eindringtiefe des von Kaltluft produzierenden Flächen ausgehenden Volumenstroms entspricht in etwa der des Kaltluftströmungsfeldes. Damit zeigt sich die Funktion der in Kap. 5.2 angesprochenen Flächen als Kaltluftschneisen und ihre Bedeutung für den nächtlichen Luftaustausch während sommerlicher, windschwacher Wettersituationen.

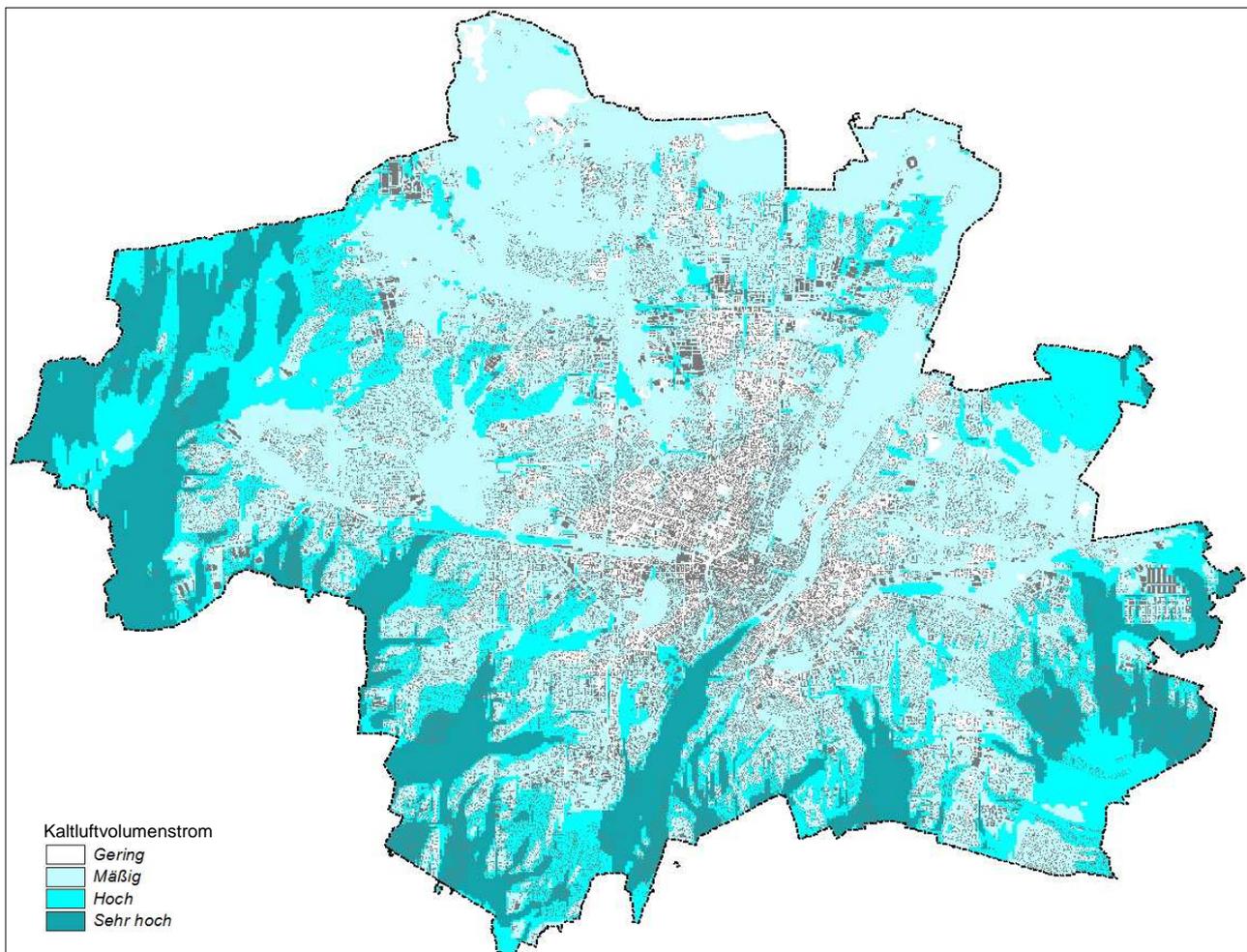


Abb. 5.6: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

#### Kaltluftvolumenstrom - Beispiel München-Stadtmitte

Den Kaltluftvolumenstrom im Bereich München Stadtmitte ist in Abb. 5.7 dargestellt, wobei der Verlauf der Isar mit sehr hohen Werten hervortritt. Südlich der Isarvorstadt zeigt sich ein tiefes Eindringen von Kaltluft über die Gleisfläche entlang der Thalkirchner Straße, was zum einen auf den hohen Temperaturgradienten

als „Antrieb“ für den Luftaustausch und zum anderen auf die große Menge an zur Verfügung stehender Kaltluft zurückzuführen ist. Die Siedlungsfläche wird im gezeigten Ausschnitt, ausgehend vom Isartal, unterschiedlich weit mit einem mäßigen Volumenstrom versorgt. Im bodennahen Bereich kann dann die Strömungsgeschwindigkeit schon auf weniger als 0,1 m/s abgesunken sein, während auf Dachniveau noch ein gewisser Luftaustausch stattfindet.

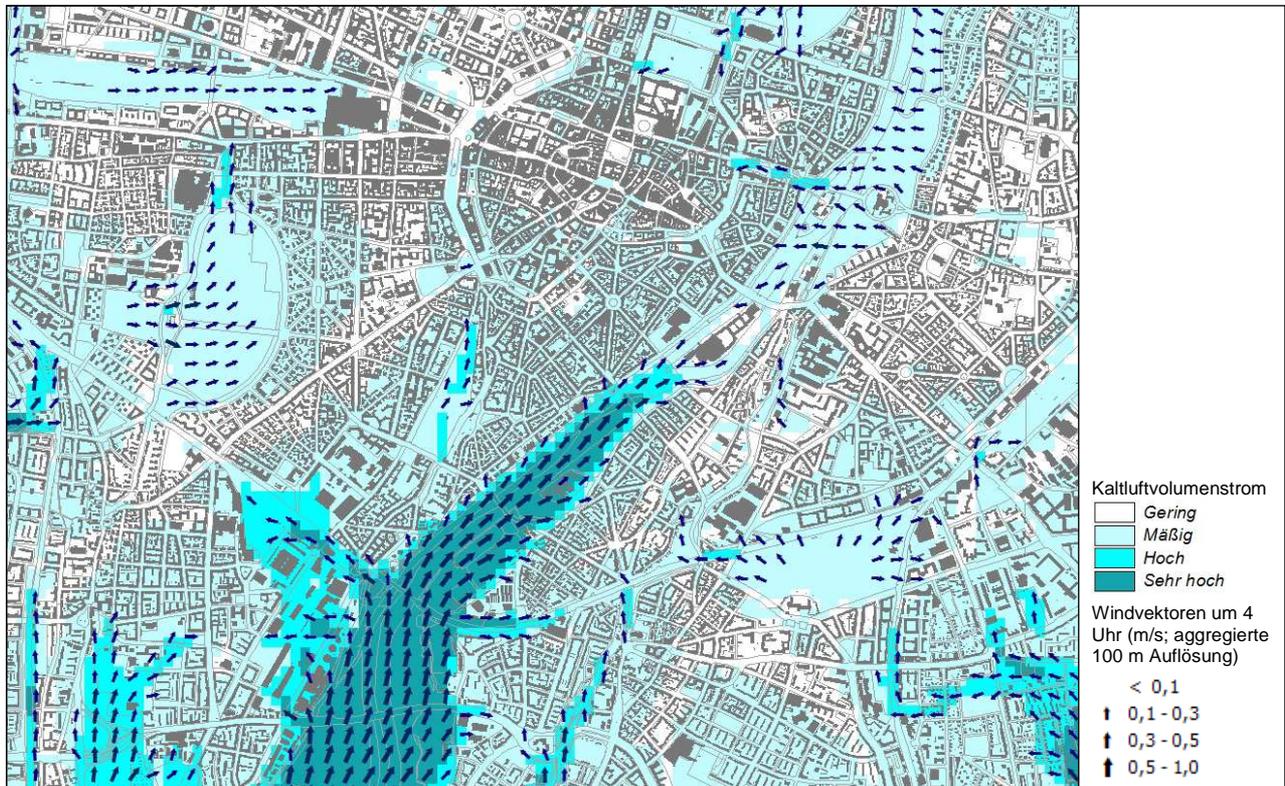


Abb. 5.7: Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens im Vertiefungsraum München-Stadtmitte

#### 5.4 Ermittlung der lufthygienischen Belastung durch die Quellgruppe Verkehr

Die im Rahmen der Klimaanalyse durchgeführte lufthygienische Untersuchung wurde ebenfalls mit dem Modell FITNAH durchgeführt. Anhand des Luftschadstoffs Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) wurden durchschnittliche Emissionen aus dem Straßenverkehr mit dem Strömungsfeld, das sich im Laufe einer sommerlichen Strahlungsnacht ausbildet, verdriftet. Das dem Transport der Luftbeimengungen zugrunde gelegte bodennahe autochthone Strömungsfeld wurde in den vorangegangenen Kapiteln bereits analysiert.

Die Emissionsprognose beruht auf mittleren täglichen Verkehrszahlen. Während der Nacht sind in der Regel deutlich geringere Verkehrsbelastungen zu erwarten. Die Verwendung durchschnittlicher Verkehrsemissionen für eine nächtliche Ausbreitungssituation darf somit als eine pessimistische Abschätzung eingestuft werden. Die Simulationsrechnungen für die Schadstoffausbreitung erfolgten in dem in Kapitel 2 beschriebenen Untersuchungsgebiet. Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die bodennahe Schicht der Atmosphäre (= 2 m über Grund), die mit dem Aufenthaltsbereich des Menschen gleichzusetzen ist. Bei der Interpretation der vorliegenden Modellergebnisse sollte allerdings berücksichtigt bleiben, dass sich diese bei einer Rasterzellenweite von 50 m x 50 m immer noch auf der Mesoskalenebene bewegen und z.B. Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst wurden. Bei der Bewertung der Modellergebnisse muss bedacht werden, dass mikroskalige Sondersituationen wie z.B. eine Straßenschlucht innerhalb der angewandten Rasterauflösung nur begrenzt wiedergespiegelt werden können.

## Datengrundlage und Emissionsprognose

Zur Abschätzung der Luftschadstoffbelastung an Straßen ist es notwendig, die Kausalbeziehung Emission-Transmission-Immission modellhaft möglichst exakt nachzubilden. Eine wichtige Grundlage zur Modellierung der Schadstoffausbreitung ist die Kenngröße „Verkehrsemission“. Zur Durchführung der dafür notwendigen Emissionsberechnungen sollten folgende Eingabedaten bekannt sein:

- Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV = Fahrzeuge/24h gemäß VDI-RL 3782 Blatt 7),
- LKW-Anteil (leichte und schwere Nutzfahrzeuge),
- Anteil Linienbusverkehr,
- Verkehrssituation je Straßenabschnitt entsprechend HBEFA 4.1 (UBA 2010),
- Auslastungsgrad der Straßenabschnitte,
- Längsneigung der Straßenabschnitte.

Den Emissionsberechnungen liegen die Daten der Verkehrsmengenkarte für die LH München (Stand 2010) zugrunde (LH München 2012d). Die Informationen beinhalten Angaben zum durchschnittlichen werktäglichen Verkehrsaufkommen der betrachteten Streckenabschnitte, aufgeteilt auf Fahrten von PKW sowie schweren Nutzfahrzeugen.

Auf Grundlage der Verkehrsmengen wurden entsprechend der jeweiligen Verkehrssituation mit Hilfe des Handbuches für Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes HBEFA 4.1 (UBA 2010) die Emissionsraten für Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) als lufthygienische Leitkomponente für verkehrsbedingte Emissionen ermittelt. Entsprechend der örtlichen Gegebenheiten werden die Emissionsfaktoren für das Bezugsjahr 2010 bestimmt und gemäß den Verkehrsmengen zu tatsächlichen Emissionen verrechnet.

Für die Klimafunktions- und Bewertungskarte sind alle Straßenabschnitte mit einer  $\text{NO}_2$ -Konzentration  $> 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sowie  $> 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erfasst worden und als potentieller lufthygienischer Belastungsbereich mit einer eigenen Signatur dargestellt (Abb. 6.1). Es handelt sich somit um eine exemplarische „Worst Case“-Situation mit stark herabgesetzter Durchlüftung, welche nicht mit den gesetzlichen Grenzwerten verglichen werden kann.

## 6 Klimaökologische Funktionen

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

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

Die Klimafunktionskarte beinhaltet die klimaökologisch wichtigen Elemente und konzentriert die Darstellung auf Elemente und Bereiche, die sich über landschaftsplanerische Maßnahmen positiv beeinflussen lassen (Maßnahmen zum Schutz, zur Sicherung und zur Entwicklung der Schutzgüter Klima und Luft). Somit steht ein Instrument zur Beurteilung von klimatischen Beeinträchtigungen bereit, die bei einer Nutzungsänderung auftreten können. Darüber hinaus stellt sie die Grundlage für ein räumliches Handlungskonzept für den Bereich Stadtklima in der Landschaftsplanung bereit. Der Aufbau der Kartenlegende folgt dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, wobei im Folgenden auf die Inhalte eingegangen wird.

### 6.1 Grün- und Freiflächen

Vegetationsbestandene Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion stellen klimaökologische Ausgleichsräume dar und können über Flurwinde die Wärmebelastung in den Siedlungsflächen verringern. Eine hohe langwellige nächtliche Ausstrahlung während austauscharmer Hochdruckwetterlagen führt zu einer starken Abkühlung der bodennahen Luftschicht. Aufgrund der Reliefsituation mit Hangneigungen von verbreitet weniger als 1° dominieren in München Flurwinde, wenn die Flächeneigenschaften betrachtet werden, während austauscharmer Wetterlagen. Die Gesamtfläche der Kaltluft produzierenden Grünflächen beziffert sich auf etwa 13.218 Hektar, was einem Flächenanteil von rund 39 % des Stadtgebietes entspricht.

Dabei werden vor allem die ausgedehnten Freiflächen als Zonen einer *sehr hohen Kaltluftlieferung* sichtbar. Dies ist auf die intensive Abkühlung zurück zu führen, die mit entsprechenden Kaltluftvolumina einhergehen. Besonders im westlichen und südlichen Stadtgebiet von München ist eine intensive Kaltluftdynamik mit großem Einfluss auf Siedlungsflächen anzutreffen.

Grünflächen *hoher Kaltluftlieferung* sind häufig mit den zuvor beschriebenen Arealen vergesellschaftet. Mit einer Gesamtfläche von ca. 3.402 ha für die sehr hohe und 4.323 ha für die hohe Kaltluftlieferung beträgt der Flächenanteil dieser Kategorie an der Gesamtgrünfläche ca. 19,9 % bzw. 26,8 %.

Die Ausgleichsleistung von Flächen, die eine *mäßige Kaltluftlieferung* aufweisen, ist ebenfalls als klimaökologisch relevant einzuschätzen. Dies betrifft vor allem die größeren innerstädtischen Parkareale. Die Flächensumme dieser mittleren Kategorie beträgt ca. 7.493 Hektar, was einem Anteil von ca. 53,5 % an der Gesamtgrünfläche entspricht.

Darüber hinaus sind die kleineren Grünflächen, zusammenhängende Hausgärten und nicht überbauten Ruderalflächen mit niedriger Größe und geringen Kaltluftvolumenstrom zu nennen. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkungsbereich aus, da sie in eine insgesamt wärmere Bebauung eingebettet sind. Durch die isolierte Lage in der Bebauung weisen sie zudem keine Anbindung an vorhandene Leitbahnen auf.

Innerhalb von Belastungsbereichen können aber auch diese Flächen eine bedeutsame Funktion als klimaökologische Komfortinseln erfüllen, sofern sie ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten wie beispielsweise beschattete und besonnte Bereiche oder sogar kühlenden Wasserflächen aufweisen (Mikroklimavielfalt). Durch solche Eigenschaften sind diese im Allgemeinen frei zugänglichen Flächen insbesondere an Sommertagen mit einer hohen Einstrahlungsintensität und damit einher gehenden Wärmebelastung im Innenstadtbereich wichtig. Sie werden – unterschieden nach Wald- sowie Grün- und Parkflächen – separat in der Klimafunktionskarte gekennzeichnet. Tabelle 6.1 fasst die ausgewiesenen Kategorien zusammen:

Kaltluftlieferung	Gesamtgröße der Klasse in Hektar	Anteil am Grünflächenbestand
Sehr hoch	3.402	19,9 %
Hoch	4.323	26,8 %
Mäßig	7.493	53,5 %

Tab. 6.1: Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet München

Somit führen unterschiedliche Struktureigenschaften der Grünflächen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Kaltluftdynamik. Die einzelnen (Teil-) Areale besitzen in ihrer Summenwirkung eine Entlastungsfunktion für benachbarte und weiter entfernte Siedlungsräume.

## 6.2 Siedlungsräume

Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse der Wohnungen in der Nacht im Wesentlichen nur durch den Luftwechsel modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologischen Belastung. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider, als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

Wie in Kap. 4.4.2 (S. 14) beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke auf Basis des PMV-Wertes (Predicted Mean Vote; FANGER 1972) als Maß für die Wärmebelastung in einer Sommernacht ausgewiesen worden. Damit ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits (Abb. 6.1). Letztere sind, durch von Kaltluft produzierenden Grünflächen ausgehende *Kaltlufteinwirkbereiche*, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Kaltlufteinwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Am Ende einer warmen Sommernacht werden bis 04 Uhr ca. 30 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Wie in Kap. 5.2 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, abhängig von der Bebauungsstruktur, zwischen ca. 100 m und bis zu 700 m. Darüber hinaus spielt auch die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle. In den peripheren, vergleichsweise gering überbauten dörflichen Ortsteilen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum. Mit Blick auf die gesamtstädtische Situation ist die bioklimatische Belastung bei einer Einzel- und 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 die Stadtmitte sowie Stadtteilzentren, in denen bioklimatisch weniger günstige bzw. ungünstige Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung. Dabei treten auch die größeren Gewerbe- und Industrieareale mit einer Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie eine Zentrumsbebauung aufweisen.

Abbildung 6.1 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte den Bereich München-Innenstadt, wobei die bioklimatische Situation der Siedlungsräume mit einer Farbabstufung dargestellt ist. Dabei ist ein Großteil der Innenstadt sowie der westlichen Kernstadt als bioklimatisch ungünstig anzusprechen (Magenta). Auch südlich der Lindwurmstraße sowie entlang der Rosenheimer Straße sind weitere Siedlungsflächen dahingehend einzuordnen. Die übrige Bebauung ist insgesamt durch weniger günstige Bedingungen (Orange) gekennzeichnet, wobei sie gleichzeitig auch ein Defizit an Durchlüftung aufweist. Bioklimatisch günstige Bedingungen sind hingegen nur kleinräumig in unmittelbarer Nähe zu größeren Grünflächen anzutreffen.

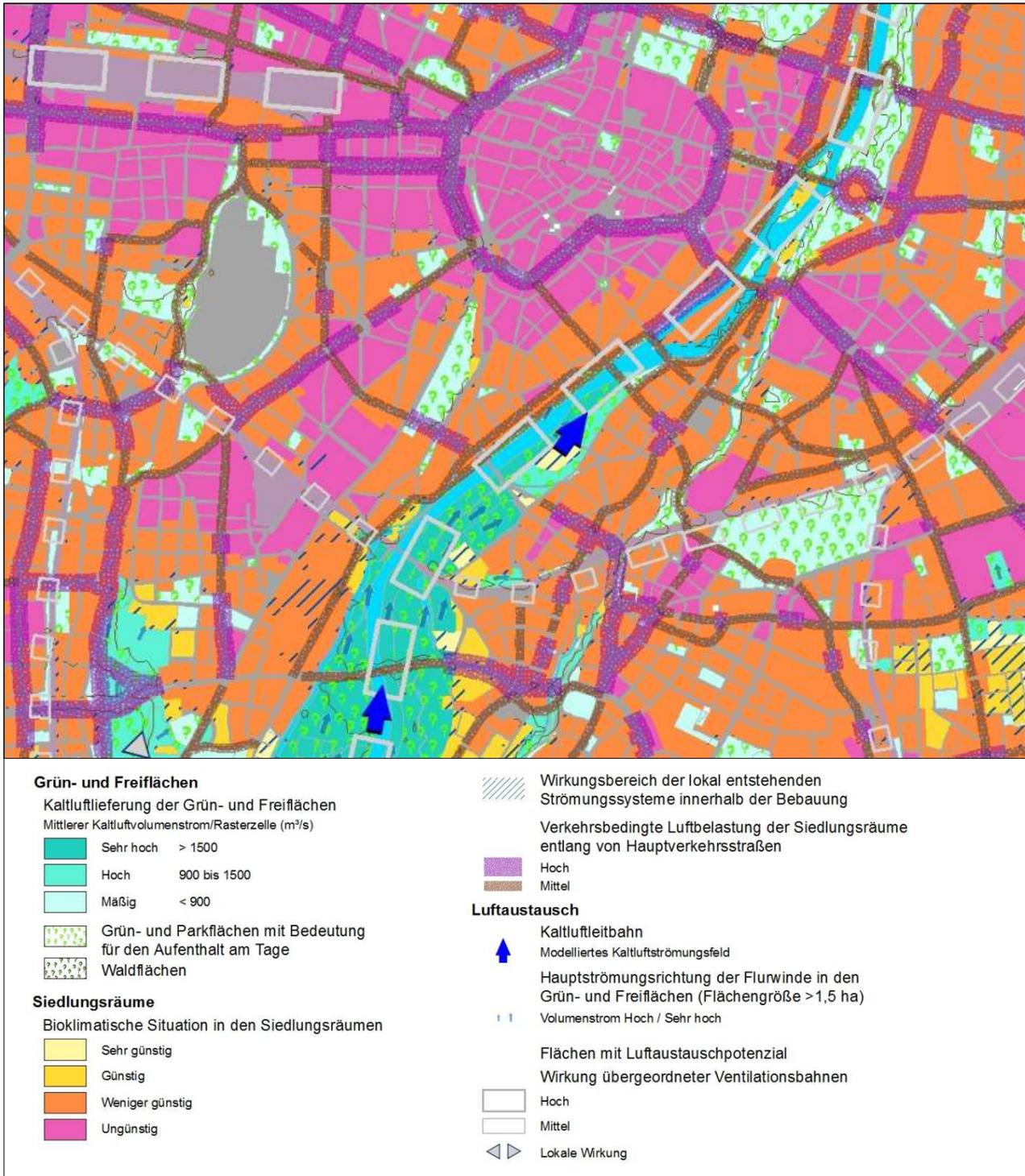


Abb. 6.1: Klimafunktionen im Bereich München-Stadtmitte

### 6.3 Luftaustausch

*Kaltluftleitbahnen*, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranzuführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Sie sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf Wirkungsräume ausgerichtet sein. Grundsätzlich kommen Tal- und Niederungsbereiche, größere Freiräume aber auch ausgedehnte Gleisareale als geeignete Strukturen in Frage. In Abb. 6.1 sind

die aus der Modellierung abgeleiteten Kaltluftleitbahnen mit einer blauen Pfeilsignatur dargestellt. Die Ausweisung erfolgte nach den folgenden Kriterien:

- Stadtstrukturtyp mit geringer Überbauung (Gewässer, Grün- bzw. Gleisfläche)
- Ausgeprägtes Einströmen des modellierten Windfeldes über diese Struktur in die Siedlungsfläche
- Eine der Maßstabsebene angemessene Breite von mind. 100 m

In Ergänzung zu den aus der Windfeldmodellierung abgeleiteten Kaltluftschneisen sind die von MAYER & MATZARAKIS (1992) ausgewiesenen gering überbauten und rauigkeitsarmen Flächen mit Luftaustauschpotential nachrichtlich übernommen worden. Diese Areale wurden nach den folgenden Anforderungen abgegrenzt:

- Rauigkeitsparameter als Maß für die aerodynamische Oberflächenrauigkeit kleiner als 0,5 m
- Hinsichtlich des vertikalen Windprofils über der zu untersuchenden Fläche vernachlässigbare Nullpunktverschiebung
- Ausreichend große Länge in einer Richtung, anzustreben sind mind. 1000 m, grundsätzlich aber mehr als 500 m
- Ausreichend große Breite mit mind. 1,5-fache Höhe der seitlichen Bahnbegrenzung (z.B. Gebäude oder Waldbestände). Anzustreben ist das 2- bis 4-fache, bei Bahnen mit Hindernissen sogar das 10-fache. Die Bahnbreite sollte stets größer als 30 m sein, wobei mind. 50 m anzustreben sind
- Die Ränder der Flächen sollten möglichst keine Unebenheiten aufweisen
- Die Breite von einzelnen Hindernissen (z.B. Gebäude) in den als Luftleitbahnen vorgesehenen Flächen sollte nicht mehr als 10 % der Breite der jeweiligen Luftleitbahn betragen.
- Die Höhe eines einzelnen Hindernisses sollte 10 m nicht übersteigen
- Ein einzelnes Hindernis in einer Luftleitbahn sollte so orientiert sein, dass seine größte Breite parallel zur Achse der Luftleitbahn verläuft, d.h. die effektive Breite eines einzelnen Hindernisses, die auf die Luftströmung in der Luftleitbahn wirkt, ist minimiert
- Sind innerhalb einer Luftleitbahn mehrere einzelne Hindernisse vorhanden, sollte das Verhältnis von Hindernishöhe zu horizontalem Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hindernissen für Gebäude 0,1 und für Bäume 0,2 betragen

Damit werden über die durchgeführten Modellrechnungen hinaus auch Areale gekennzeichnet, welche eine Funktion als Luftleit- und Ventilationsbahnen auch bei austauschstärkeren Wetterlagen ausüben können. Dargestellt werden diese als graue Balken-Schraffur. Es zeigt sich, dass die Luftaustauschbahnen, die aus dem Windfeld modelliert wurden und jene, die über die Oberflächenrauigkeit ermittelt wurden zum Großteil decken.

Im Rahmen der vorliegenden Klimaanalyse wurden insgesamt 15 Leitbahnen ausgewiesen:

- Freifläche östlich Aubinger Lohe
- Würmaue
- Grünzug Am Durchblick
- Gleisdreieck Pasing
- Lochhamer Schlag – Feldflur Pasing - Blumenau

- Gleistrasse Rangierbahnhof – Güterbahnhof – Allacher Lohe
- Freifläche Feldmochinger Anger – Dreiseenplatte – Bezirkssportanlagen Hasenberg
- Freifläche südlich Großlappen
- Freifläche im Bereich Lilienthalallee/Lindberghstraße
- Südliche an die Innenstadt angrenzende Isaraue
- Freifläche am Salzsenderweg
- Gleistrasse Trudering - Ostbahnhof
- Riemer Park / Riemer Friedhof
- Grünflächen zwischen Truderinger Wald und Ostpark
- Perlacher Wald – Bezirkssportanlagen Neuperlach
- Perlacher Feld – neuer südlicher Friedhof
- Grünflächen zwischen Forstenried und Solln / Warnberger Riedl / Forstenrieder Feld
- Weichselgarten - Waldfriedhof

Weitere übergeordnete Ventilationsbahnen bzw. Flächen mit Luftaustauschpotenzial – bei entsprechender Windrichtung sind:

- Bahntrasse Hauptbahnhof – Laim – Pasing
- Nördliche an die Innenstadt angrenzende Isaraue

Es erfolgt hingegen keine Leitbahnausweisung für Bereiche, wo Kaltluft von Grünflächen direkt in die Bebauung strömt. In diesen Fällen grenzen Ausgleichs- und Wirkungsraum direkt aneinander, so dass eine Leitbahnausweisung nicht sinnvoll ist. Dies ist häufig bei den innerstädtischen Grünflächen gegeben. Die Klimafunktionskarte für das gesamte Stadtgebiet ist dem separaten Kartenanhang zu entnehmen.

## 7 Bewertungskarte Stadtklima

Innerstädtische und siedlungsnahen Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Die Bewertungskarte Stadtklima stellt eine integrierende Beurteilung der in der Klimafunktionskarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihr lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

klimaökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen. Die zugeordneten Planungshinweise geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Maßnahmen für die räumliche Planung ableiten lassen.

Dabei besteht inhaltlich eine enge Verzahnung mit weiteren übergeordneten Planungen der LH München. So zielt das *Landschaftsentwicklungskonzept* ab auf die Sicherung und Entwicklung regionaler Grünzüge und Freiflächenkorridore sowie die Aufwertung von beeinträchtigten Landschaftsräumen und Freiflächen. Darüber hinaus sollen regionale Defizite identifiziert und Vorschläge zu deren Abbau erarbeitet werden. In der Bewertungskarte werden die regionalen Grünzüge mit einer eigenen Signatur dargestellt. Da sich die Bewertungskarte Stadtklima auf das Stadtgebiet München bezieht, wurden, um regionale Beziehungen aufzuzeigen, die regionalen Grünzüge nachrichtlich übernommen.

Das Leitprojekt „*Münchner Klimagrüngürtel*“ sieht vor, die insbesondere am Stadtrand von München und im Übergangsbereich zu den Nachbargemeinden lokalisierten Grünflächen vor weiterer Bebauung zu schützen, qualitativ aufzuwerten und in ein stadtübergreifendes Landschaftskonzept einzubinden. Ein Hauptanliegen des Münchner Grüngürtel-Projektes ist es, die vorherrschende landwirtschaftliche Nutzung in einer zukunftsverträglichen Form beizubehalten und ein gleichberechtigtes Nebeneinander von Landwirtschaft, Erholung und Naturschutz zu ermöglichen.

### 7.1 Grün- und Freiflächen

#### Allgemeines zur stadtklimatischen Bedeutung von Stadtgrün

Städtische Grün- und Freiflächen haben unterschiedliche Funktionen am Tage und in der Nacht: Über Wiesen oder Ackerflächen treten am Tage durch die intensive Einstrahlung und dem Mangel an Verschattung ähnlich hohe Werte wie in den verdichteten Siedlungsflächen auf. Allerdings ist dort in der Nachtsituation die stärkste Abkühlung zu erwarten: Hier kann nachts eine ungehinderte (langwellige) Ausstrahlung verbunden mit starker Abkühlung der darüber lagernden Luftmasse erfolgen. Am Tage ist andererseits ein hoher (kurzwelliger) solarer Strahlungsinput mit starker Erwärmung der Bodenoberfläche die Folge (vgl. Temperaturverlauf Abb. 4.5).

Durch Bäume und Gehölze geprägten Flächen weisen an wolkenlosen Sommertagen mit starker Sonneneinstrahlung aufgrund der Schattenspende und der Verdunstung von Wasser das geringste Belastungspotential auf. Insbesondere in den stärker überbauten Quartieren kommt den innerstädtischen Grünflächen eine wichtige Rolle zu.

Damit wird aus bioklimatischer Sicht die unterschiedliche Funktion von Grünflächen am Tage bzw. in der Nacht deutlich. Einerseits sollen sie eine gute Aufenthaltsqualität am Tage gewährleisten, andererseits könne nächtliche Flurwinde die Wärmebelastung in den Siedlungsräumen reduzieren. Die Mindestgröße zur Ausbildung einer Kaltluftströmung lässt sich auf etwa 1 ha beziffern (SCHERER 2007). Abgesehen von der Flächengröße wird dies aber auch durch die grünplanerische Ausgestaltung mitbestimmt. Sofern ein bedeutsamer Luftaustausch durch Flurwinde stattfinden kann, sollte dieses (eigenbürtige) Luftaustauschsystem Grünfläche – angrenzende Bebauung und die damit verbundene klimaökologische Wohlfahrtswirkung aufrechterhalten werden. Abbildung 7.1 zeigt einen Ausschnitt aus der Bewertungskarte für den Bereich München-Stadtmitte.

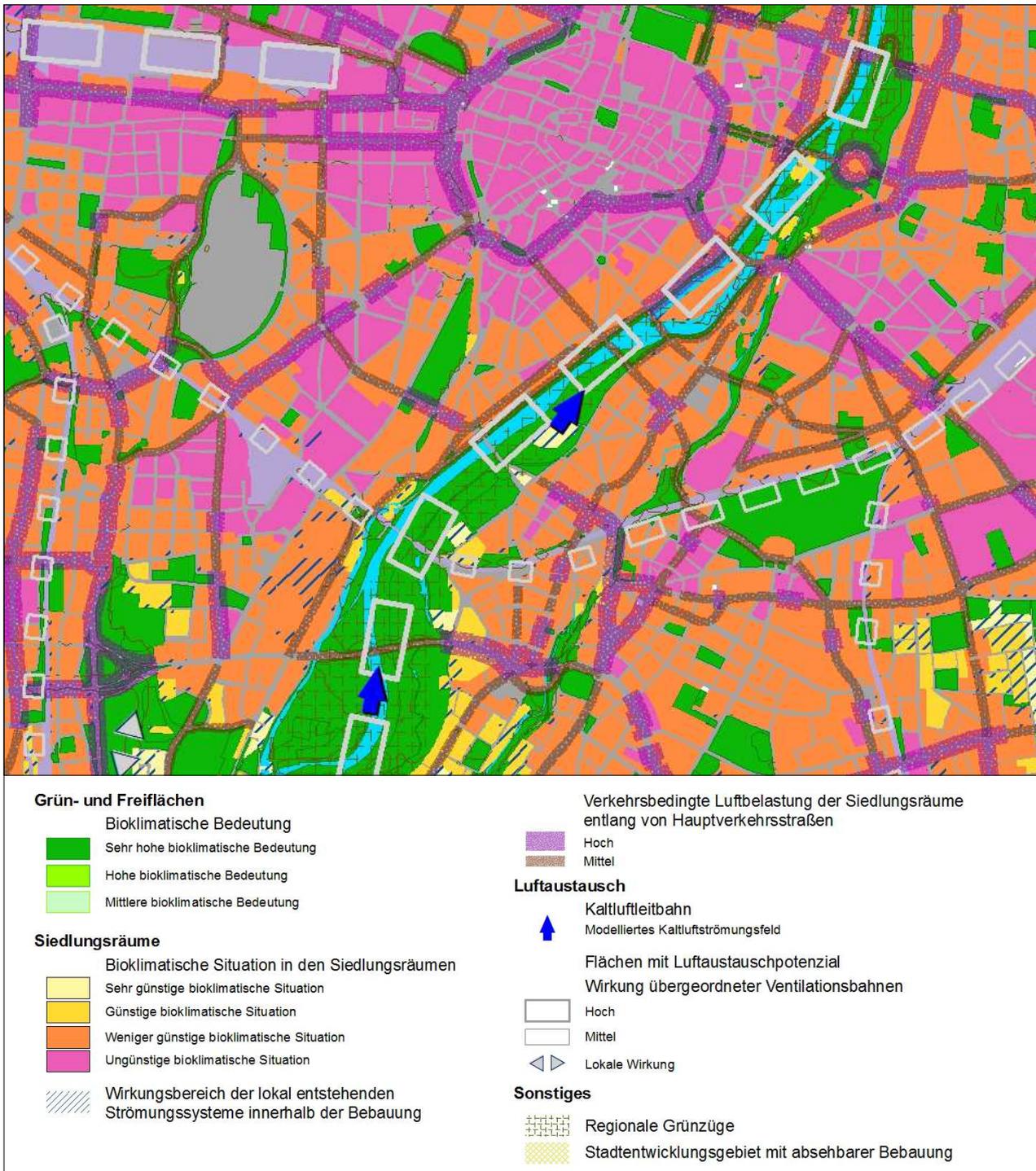


Abb. 7.1: Bewertungskarte Stadtklima im Bereich München-Stadtmitte

Die stadtklimatische Bewertung von Grünflächen vollzieht sich auf zwei Maßstabsebenen: Um die großräumigen Effekte der regionalen nächtlichen Luftaustauschprozesse abzubilden wird in einem mesoskaligen gesamtstädtischen Ansatz auch das Umland mit einbezogen. Die Aufenthaltsqualität am Tage wird dagegen vor allem durch die kleinräumigen Einflüsse einzelner Strukturelemente wie z.B. die Schattenwirkung einer Baumgruppe bestimmt. Aufgrund dieser lokalen Wirkungen ist der Aspekt der Aufenthaltsqualität im Wesentlichen auf der mikroskaligen Ebene angesiedelt.

In Folgendem wird auf die planerische Einordnung der klimaökologisch relevanten Elemente in München eingegangen. Basis für die Beurteilung und Abgrenzung der Räume hinsichtlich ihrer planerischen Prioritäten sind die Simulationsergebnisse der Klimaparameter für eine austauscharme sommerliche Strahlungswetterlage.

### Planerische Einordnung der Grünflächen

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika der Grünflächen<sup>4</sup> im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen wird ein teilautomatisierbares Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt (vgl. Abb. 7.2, S. 37):

#### Sehr hohe bioklimatische Bedeutung:

1. Ermittlung von Siedlungsräumen mit „*bioklimatisch ungünstigen*“ Verhältnissen
2. Ermittlung der an (1) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 1000 m).  
Grünflächen im Umfeld von bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräumen kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Sie sind geeignet, unabhängig von ihrem Kaltluftliefervermögen ausgleichend auf das thermische Sonderklima in ihrem meist dicht bebauten Umfeld zu wirken. Mit einem Radius von 1000 m sind zudem die noch fußläufig zu erreichenden Grünflächen erfasst worden.
3. Ermittlung von *Leitbahnen*  
Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgt manuell und orientiert sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation.
4. Allen Grünflächen aus (2) und (3) wird eine **sehr hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.

#### Hohe bioklimatische Bedeutung

5. Ermittlung von Siedlungsräumen mit „*bioklimatisch weniger günstigen*“ Verhältnissen
6. Ermittlung der an (5) *angrenzenden Grünflächen* (Toleranz = 250 m).  
Wie unter (2) erfolgt die Einstufung auch dieser Flächen unabhängig von der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter
7. Ermittlung der an (2), (3) und (6) direkt *angrenzenden Grünflächen (Umfeldflächen)*.
8. Grünflächen aus (6) sowie Wald- und Parkflächen sowie Friedhöfen wird generell eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.  
Wald kommt generell eine von der Stärke des nächtlichen Kaltluftliefervermögens unabhängige bioklimatische Ausgleichsleistung als Frischluftproduzent und Erholungsraum zu.
9. Grünflächen aus (7) wird eine **hohe bioklimatische Bedeutung** zugesprochen, wenn sie einen hohen Kaltluftvolumenstrom (Karte 4) aufweisen

<sup>4</sup> Als „Grünfläche“ werden hier unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung all jene Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal etwa 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

### Mittlere bioklimatische Bedeutung

10. Freiflächen, die keinem der oben genannten Kriterien entsprechen, wird eine **mittlere bioklimatische Bedeutung** zugesprochen.

Die nach diesem vereinfachten Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Freiräume basiert zum einem auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d.h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermaßen aussagekräftig sind. Zudem wurde auch die Aufenthaltsqualität am Tage aus bioklimatischer Sicht berücksichtigt.

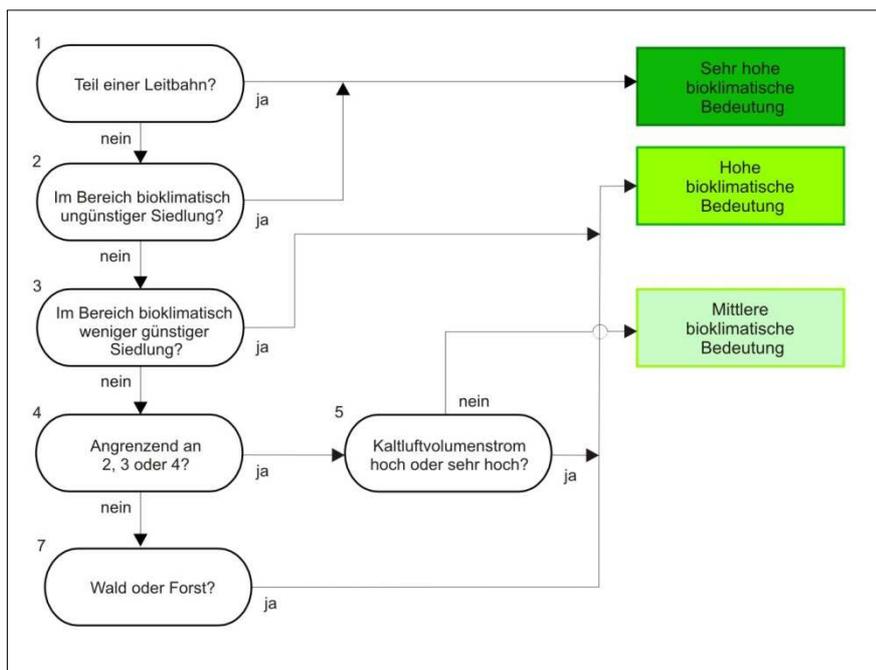


Abb. 7.2: Verknüpfungsmodell zur Ermittlung der bioklimatischen Bedeutung der Grünflächen

So kann eine Grünfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Freiräume im direkten Umfeld von Siedlungsbereichen mit ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen generell eine hohe bioklimatische Bedeutung zugesprochen. Somit verfügt eine in ihrer bioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Grünfläche über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch stark belasteten Wirkungsraum.

Eine als „Hoch“ eingestufte Grünfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch belasteten Wirkungsraum, weist ein überdurchschnittliches Kaltluftliefervermögen auf und ist damit als Ausgleichsraum oder Kaltluftquellgebiet einzustufen oder die Fläche weist eine hohe Aufenthaltsqualität am Tage in fußläufiger Erreichbarkeit auf. Darüber hinaus werden in der Bewertungskarte die Grünflächen mit Bezug zu bioklimatisch belasteten Wohngebieten über eine eigene Signatur ausgewiesen.

### Bilanzierung der Grünflächen für das Stadtgebiet München

Eine *sehr hohe stadtklimatische Bedeutung* erlangen die Grün- und Freiflächen mit Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsräumen bzw. in einer Funktion als Kaltluftleitbahn (vgl. Kap. 6.3, S. 31). Diese Kategorie ist im innenstadtnahen Raum mit der Isaraue, den großen zusammenhängenden Grünflächen (z.B. Englischer Garten, Nymphenburg, Olympiapark, Westpark) sowie den kleineren innenstadtnahen Grünflächen anzutreffen, wobei letztere einen hohen Stellenwert für den Aufenthalt am Tage aufweisen. Die Gesamtgröße dieser Teilflächen beziffert sich auf ca. 6.225 Hektar.

Eine *hohe Bedeutung* kommt vor allem den peripheren Grün- und Freiflächen zu, welche z.B. eine Funktion als Kaltluftquellgebiete mit hohem Kaltluftliefervermögen für Kaltluftleitbahnen aufweisen. Die Gesamtfläche von Grünflächen hoher Bedeutung beträgt 1.789 ha.

Eine *mittlere stadtklimatische Bedeutung* weisen vor allem die meist siedlungsfernen Freiflächen auf, welche keinen nennenswerten Einfluss auf – derzeit belastete - Siedlungsbereiche ausüben. auf. Diese Kategorie ist mit insgesamt 4.205 ha am gesamten Grünflächenbestand vertreten. Tabelle 7.1 fasst die Flächenanteile der ausgewiesenen Kategorien zusammen:

Bewertung	Anteil am Grünflächenbestand
Sehr hoch	50,9 %
Hoch	14,7 %
Mittel	34,4 %

Tab. 7.1: Bilanzierung der Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht

Somit lassen sich ca. 51 % des Grünflächenbestandes der höchsten planerischen Priorität zuordnen, während etwa 15,0 % eine hohe Bedeutung aufweisen. Grün- und Freiflächen mit einer mittleren Bedeutung haben einen Anteil von 34 % am Gesamtbestand.

Innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Aus größeren, zusammenhängenden Grünflächen ergibt sich das klimatische Regenerationspotenzial. Durch ihre Entlastungswirkungen resultiert eine Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung. Diese korrespondiert mit der bioklimatischen Bedeutung, wobei sich die folgenden Planungsempfehlungen ableiten lassen:

- Erhalt und Sicherung von stadtklimatisch bedeutsamen Grün- und Freiflächen
- Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen.
- Schaffung vielfältiger mikroklimatischer Bedingungen (Aufenthaltsqualität im ganzen Jahr).
- Reduzierung von derzeitigen Emissionen.
- Vernetzung mit benachbarten Freiflächen.
- Ermöglichung des Luftaustausches in Leitbahnen (s. Kap. 7.3).

Zur Aufwertung der Aufenthaltsqualität sollten vor allem innerhalb der Quartiere ausreichend große beschattete Areale ausgebildet werden. Insbesondere das Gehen/Radfahren im Schatten sollte möglich sein. Dabei sind vor allem lockere, hochstämmige Baumgruppen und Baumalleen als Beschattungselemente sinnvoll. Darüber hinaus sollten größere Grünflächen auch ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten wie beispielsweise beschattete und besonnte Bereiche oder kühlende Wasserflächen aufweisen, um den unterschiedlichen Bedürfnissen der Menschen hinsichtlich des Aufenthaltes im Freien entgegen zu kommen (Mikroklimavielfalt).

## 7.2 Siedlungsräume

Das Stadtgebiet zeichnet sich durch unterschiedliche Bebauungsdichten und -strukturen aus. Daraus resultieren unterschiedliche **bioklimatische Bedingungen**, die während sommerlicher, windschwacher Strahlungswetterlagen durch lokale Luftaustauschprozesse mitbestimmt werden. Daraus folgt auch eine differenzierte planerische Betrachtung.

Eine Wohnbebauung, welche **sehr günstige** oder **günstige bioklimatische Bedingungen** aufweist, ist meist durch eine offene Bebauungsstruktur, einen überdurchschnittlich hohen Grünflächenanteil sowie eine wirksame Kaltluftströmung gekennzeichnet.

Diese Räume weisen am ehesten ein Potenzial zur weiteren maßvollen, baulichen Verdichtung auf, da sie lediglich **gering** bzw. **nicht belastet** sind. Um das günstige Bioklima zu erhalten, sollten die folgenden planerischen Aspekte berücksichtigt werden:

- Bei nutzungsintensivierenden Eingriffen die Baukörperstellung im Hinblick auf Kaltluftströmungen berücksichtigen. Daher Neubauten parallel zur Kaltluftströmung ausrichten.
- Bauhöhen möglichst gering halten.
- Grün- und Freiflächenanteil erhalten.

**Belastungsbereiche** weisen hingegen einen Durchlüftungsmangel, eine überdurchschnittliche Wärmebelastung und lokal auch eine lufthygienische Belastung auf. Unterschieden werden Siedlungsräume mit weniger günstigen bioklimatischen Bedingungen sowie ungünstigen Verhältnissen als höchste Belastungskategorie.

Für diese Gebiete können die folgenden Empfehlungen gegeben werden:

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

Diese Bereiche weisen daher gegenüber einer weiteren Nutzungsintensivierung eine **hohe** (bioklimatisch weniger günstig) bzw. die **höchste Empfindlichkeit** (bioklimatisch ungünstig) auf.

## 7.3 Luftaustausch

**Kaltluftleitbahnen** stellen die Verbindung zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen her, wobei Niederungsbereiche, größere Grünflächen sowie Bahnareale als geeignete Strukturen in Frage kommen. In diesem Zusammenhang dienen Leitbahnen im Stadtgebiet von München für die Zufuhr von Kaltluft aus dem stadtnahen Umland, sofern kein flächenhaftes Einströmen in den Siedlungsraum erfolgt. In Rahmen der Klima- und Windfeldmodellierung sind die in Kap. 6.3 genannten Leitbahnen ermittelt worden.

Für alle Leitbahnen gelten die folgenden Planungshinweise:

- Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.

- Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten.

Falls Bebauung nicht vermeidbar:

- Bauhöhe möglichst gering halten.
- Neubauten parallel zur Kaltluftströmung ausrichten.
- Geschlossene Randbebauung möglichst vermeiden; anzustreben ist eine „perforierte Bebauung“.

Als potentielle Leitbahnen kommen gering bebaute Tal- und Auenbereiche, größere zusammenhängende Grünflächen Gleisareale sowie breite Ausfallstraßen in Frage. In Bezug auf die nächtliche Kaltluftproduktion weisen Kaltluftbahnen, die vorwiegend durch Wiese geprägt sind, die besten Eigenschaften auf. Da auch von dichteren Vegetationselementen eine Hinderniswirkung für den Luftaustausch ausgehen kann, sollte der Übergangsbereich zur Bebauung von Grünstrukturen wie dichten Baumgruppen, Gehölzen oder hohen Hecken weitestgehend frei gehalten werden.

Neben den aus dem modellierten Windfeld abgeleiteten Kaltluftleitbahnen werden auch die von MAYER & MATZARAKIS (1992) ausgewiesenen gering überbauten und rauigkeitsarmen Flächen mit Luftaustauschpotential dargestellt (s. Kap. 6.3). Diese Areale haben über die modellierte austauscharme Wettersituation hinaus eine wichtige Durchlüftungsfunktion bei windstärkeren Wetterlagen und ermöglichen das „Eingreifen“ der übergeordneten Strömung bis zum bodennahen Bereich und können dort zur Verdünnung von Luftschadstoffen beitragen. Daher kommt sowohl den Kaltluftleitbahnen als auch den übergeordneten Ventilationsbahnen eine wichtige stadtklimatische Bedeutung zu.

### **Lufthygienische Situation**

Im Rahmen des Luftaustausches wird auch der Aspekt der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung mit einbezogen (Bezugsjahr 2010; vgl. Kap. 5.2). Dargestellt werden Straßenabschnitte, die eine erhöhte Konzentration von mehr als  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bzw.  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  während austauscharmer Wetterlagen aufweisen, wie sie auch der Klimaanalyse zugrunde liegen.

### **7.4 Nutzungshinweise für die Bauleitplanung**

Die Bewertungskarte stellt die stadtklimatisch relevanten Strukturen mit ihrer jeweiligen Bedeutung dar und erlaubt im Falle einer Nutzungsänderung die Ersteinschätzung der Empfindlichkeit von Grün- und Siedlungsflächen. Aufgrund ihrer wichtigen lokalklimatischen Funktionen sowie der Rolle im Stadtökosystem insgesamt sollte die Überbauung von Grünflächen sorgfältig abgewogen werden. Sind dennoch konkrete Eingriffe vorgesehen, können entsprechende zu berücksichtigende Maßnahmen aus der jeweiligen Empfindlichkeit im Plangebiet abgeleitet werden, gleiches gilt für die Siedlungsflächen. Mit der durchgeführten Analyse der klimaökologischen Funktionen stehen flächendeckend aktuelle Informationen zu den Schutzgütern Klima und Luft für das gesamte Stadtgebiet München zur Verfügung. Damit wird eine fundierte klimatische Ersteinschätzung von Planungsvorhaben ermöglicht und kann anschließend in die Detailplanung von Flächennutzungsänderungen einfließen. Bei konkreten Planungsvorhaben wie z.B. Bebauungsplänen ist auf Basis der vorliegenden Karten im Einzelfall zu prüfen, ob Aussagen in detaillierterer räumlicher Auflösung und Schärfe und eine entsprechende vertiefende Untersuchung nötig sind. Dies betrifft klimatisch empfindliche Bereiche, welche sich z.B. Räumlich hochauflösende Aussagen z.B. zu Wirkungen einzelner Gebäude und zur Verschattung durch Bäume an konkreten Standorten sind auf Basis dieser Analyse nicht möglich.

## Allgemeine Maßnahmen zur Verringerung der Wärmebelastung im Siedlungsraum

Während am Tage die direkte, kurzwellige Strahlung der Sonne wirksam ist, geben nachts Bauwerke und versiegelte Oberflächen die tagsüber gespeicherte Energie als langwellige Wärmestrahlung wieder ab. Durch die Verringerung des Wärmeinputs am Tage wird gleichzeitig weniger Strahlungsenergie in der Baumasse gespeichert und in der Nacht auch weniger Wärme an die Luft abgegeben. Die für die belasteten Bereiche abzuleitenden Hinweise zielen deshalb vor allem darauf ab, einerseits durch zusätzliche Verschattung die Aufenthaltsqualität im Freien zu steigern und andererseits den Gebäudebestand hitzeangepasst zu gestalten:

- Bei der Entwicklung neuer Stadtquartiere sollte die Wirkung auf den Bestand und auf die mikroklimatische Aufenthaltsqualität berücksichtigt werden.
- Bei Nachverdichtung sollte die Wirkung auf den Bestand minimiert, Freiräume mit hoher Aufenthaltsqualität erhalten und geschaffen werden.
- Erhaltung bzw. Erhöhung des Vegetationsanteils
- Vernetzung von Grünräumen sollte erhalten und falls möglich ausgebaut werden
- Besonders in Siedlungsflächen mit ungünstigen bzw. weniger günstiger bioklimatischer Situation sollten Maßnahmen zur Begrünung umgesetzt werden.
- Entsiegelung von Blockinnenhöfen und Straßenraum
- Straßenbäume erhalten und Lücken schließen
- Verbesserung der wohnungsnahen Grünflächenversorgung
- Luftaustauschbahnen sollten gesichert und in geeigneter Form weiterentwickelt werden.
- Maßnahmen zur Senkung von Emissionen sollten umgesetzt werden (vgl. Luftreinhalteplan für die LH München).

Zudem lässt sich über die Verwendung von hellen Baumaterialien die Reflexion des Sonnenlichtes (Albedo) erhöhen, so dass ebenerdig versiegelte Flächen oder auch Fassaden stärker zurückstrahlen. Dadurch bleiben sie am Tage kühler und nehmen damit insgesamt weniger Wärmeenergie auf.

## Bedeutung von Dach- und Fassadenbegrünung

Zu den weiteren effektiven Maßnahmen, die Erwärmung der Gebäude am Tage abzuschwächen, zählen Dach- und Fassadenbegrünung. Letztere wirkt zweifach positiv auf einen Gebäudebestand ein, da einerseits durch die Schattenspende die Wärmeeinstrahlung am Tage reduziert wird und andererseits über die Verdunstungskälte des Wassers Wärme abgeführt wird. Eine Fassadenbegrünung ist insbesondere an West- und Südfassaden wirksam, da hier die stärkste Einstrahlung stattfindet. Darüber hinaus mindert eine Begrünung die Schallreflexion und damit die Lärmbelastung und kann zu einem gewissen Grad Stäube und Luftschadstoffe binden. Bei der Dachbegrünung wirkt die Vegetation zusammen mit dem Substrat dämmend und verringert damit das Aufheizen darunter liegenden Wohnraums. Zudem senkt die Dachbegrünung die Oberflächentemperatur des Daches aufgrund der Verdunstung von Wasser ab und verringert die Temperatur in der oberflächennahen Luftschicht. Voraussetzung dafür ist allerdings ein ausreichendes Wasserangebot für die Vegetation. Sollte bei längeren Hitzeperioden die Vegetation austrocknen, steigen die Temperaturen wieder auf das Niveau eines normalen Daches an und können sogar darüber hinausgehen. Der Kühlungseffekt für die Innenräume bleibt dabei aber erhalten. Im Winter isoliert ein Gründach zusätzlich und kann zur Senkung des Heizbedarfes beitragen. Ein weiterer Vorteil von Dachbegrünung ist im Retentionsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird.

## 8 Fazit

Die vorliegende Untersuchung hat die klimaökologischen Funktionszusammenhänge im Stadtgebiet München während austauscharmer, sommerlicher Hochdruckwetterlagen dargelegt. Durch die Zufuhr von frischer und kühlerer Luft können klimaökologische Ausgleichsleistungen für die Belastungsräume erbracht werden. In diesem Rahmen sind bioklimatisch belastete Siedlungsräume einerseits sowie entlastende, Kaltluft produzierende Flächen andererseits ausgewiesen worden. Insgesamt gesehen ist das klimatische Ausgleichspotenzial der umgebenden Freiflächen als hoch anzusehen. Jedoch weisen Teilräume des Untersuchungsgebietes ein erhöhtes bioklimatisch-lufthygienisches Belastungspotenzial auf. Des Weiteren befinden sich etwa 30 % der Siedlungsfläche bis 04:00 Uhr morgens im Einwirkungsbereich von Flurwinden, während auf ca. 55 % des Stadtgebietes München eine klimatisch wirksame Kaltluftströmung vorliegt.

Mit der Bewertungskarte liegt eine Stadtklimaanalyse vor, die klimatische Aussagen auf Ebene der Flächennutzungsplanung für die räumliche Planung ermöglicht. Basierend auf den Empfindlichkeiten von Siedlungsbereichen einerseits und Kaltluft produzierenden Freiflächen andererseits lassen sich planungsbezogene Aussagen treffen. Als klima- und immissionsökologisches Qualitätsziel ergibt sich die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung wichtiger Oberflächenstrukturen zur Verbesserung bzw. Erhaltung bioklimatisch günstiger Verhältnisse sowie der Luftqualität. Durch die Kenntnis der wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie Kaltluftentstehungsflächen, Luftleitbahnen und Komforträumen sowie ihrer qualitativen Einordnung steht mit der vorliegenden Untersuchung eine wichtige Grundlage zur Umsetzung dieser Ziele bereit.

Im Hinblick auf weitere Nutzungsintensivierungen im Stadtgebiet München sollten die Funktionen der klima- und immissionsökologisch wichtigen Strukturen möglichst wenig beeinträchtigt werden. Bei konkreten Planungsvorhaben wie z.B. Bebauungsplänen ist auf Basis der vorliegenden Karten im Einzelfall zu prüfen, ob Aussagen in detaillierterer räumlicher Auflösung und Schärfe und eine entsprechende vertiefende Untersuchung nötig sind. Räumlich hochauflösende Aussagen z.B. zu Wirkungen einzelner Gebäude und zur Verschattung durch Bäume an konkreten Standorten sind auf Basis dieser Analyse nicht möglich. Dazu ist es erforderlich, geeignete mikroskalige Modellansätze zu verwenden. Die Karte bewertet den Ist-Zustand aus klimatischer Sicht, wobei die Berücksichtigung klimatischer Aspekte in der räumlichen Planung im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel vermehrt an Bedeutung gewinnt. Dies soll auch im Maßnahmenkonzept Anpassung an den Klimawandel in der LH München aufgenommen werden.

## 9 Literatur

- BAUMGARTNER A., Mayer, H., Noack, E.-M. (1985): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten – STADTKLIMA BAYERN. Abschlussbericht zum Teilprogramm Thermalkartierungen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien 89, München.
- BRÜNDL, W., Mayer, H., Baumgartner A. (1987): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten – STADTKLIMA BAYERN. Abschlussbericht zum Teilprogramm Klimamessungen in München. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien 43, München.
- DLR-DFD (2009): Coordination of Information on the Environment CORINE Land Cover CLC2006; Umweltbundesamt, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2009.
- DWD DEUTSCHER WETTERDIENST (2013): Mittelwerte 30-jähriger Perioden. Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de) (Zugriff: 09.01.2013)
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-73.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 6., S. 701-710.
- EUROPEAN COMMISSION (1994): EUR 12585 - CORINE Landcover project - Technical guide. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg.
- JENDRITZKY, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher, W., Gerstengrabe, F.-W. (Hrsg): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Berlin, Potsdam, S. 108-118.
- JENDRITZKY, G. et al. (2009): Der Thermische Klimaindex UTCI. In: Deutscher Wetterdienst Klimastatusbericht 2009. S. 96-101.
- KIESE, O. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992
- MAYER, H. (1987): Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. Mitt. Geogr. Gesellsch. München 72, S. 119-160.
- MAYER, H. (1989): Workshop „Ideales Stadtklima“ am 26. Oktober 1988 in München. DMG.Mitt. 3/89, S. 52-54.
- MAYER, H. & MATZARAKIS, A. (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet. – Forschungsvorhaben Stadtluft, Abschlussbericht, Lehrstuhl für Bioklimatologie u. Meteorologie Univ. München. 96 S.
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-276.
- NATIONAL GEOSPATIAL INTELLIGENCE AGENCY (2004): Digital Terrain Elevation Data.
- RÖCKLE, R. und C.-J. RICHTER (1995): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. PEF-Bericht 136, Forschungszentrum Karlsruhe.
- RODI, W. (1980): Turbulence models and their application in hydraulics. IAHR Section on Fundamentals of Division II: Experimental and mathematical fluid dynamics, Delft.
- SCHÄDLER, G. et al. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. PEF Bericht 138, Forschungszentrum Karlsruhe.
- SCHERER, D. (2007): Viele kleine Parks verbessern Stadtklima. Mit Stadtplanung Klima optimieren. In: TASPO Report. Die Grüne Stadt. Oktober 2007.
- TINZ, B., E. FREYDANK UND P. HUPFER (2008): Hitzeepisoden in Deutschland im 20. und 21. Jahrhundert, in: J. Lozán u.a.: Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen, Hamburg, S. 141-148

- LH MÜNCHEN (2012a): Digitales Geländehöhenmodell für das Gebiet der LH München.
- STADT MÜNCHEN (2012b): Strukturtypenkartierung für das Gebiet der LH München.
- LH MÜNCHEN (2012c): Digitale Orthofotos für das Gebiet der LH München.
- LH MÜNCHEN (2012d): Gebäudegeometrien der Stadtgrundkarte für das Gebiet der LH München.
- UBA (2010): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 4.1/Januar 2010. INFRAS AG, Bern Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin.
- ULRICH, W. (1987): Simulationen von thermisch induzierten Winden und Überströmungssituationen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 57.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (2008): Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1997): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf.

## 10 Glossar

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

**Ausgleichsraum:** Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen Wirkungsraum angrenzt oder mit diesem über wenig raue Strukturen (→ Leitbahnen) verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen und lufthygienischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

**Austauscharme Wetterlage:** → Strahlungswetterlage

**Autochthone Wetterlage:** → Strahlungswetterlage

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

**Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (=atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf Menschen.

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

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

**Frischluftrömung:** → Kaltluft mit geringer lufthygienischer Vorbelastung.

**Frischluftrömungsgebiete:** → Kaltluftentstehungsflächen ohne nennenswerte Emissionen.

**Gunsträume:** Klimatisch günstige Siedlungsräume: häufig locker bebaute und durchgrünte Siedlungen mit einem geringen Versiegelungsgrad, hohem Vegetationsanteil und relativ hoher nächtlicher Abkühlungsrate. 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.

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

**Kaltluft:** Bodennahe Luftschicht, die sich bei nächtlicher (Wärme-) Ausstrahlung der Erdoberfläche besonders stark abkühlt, da aus dem Boden nur wenig Wärme in Richtung Oberfläche nachgeliefert wird.

**Kaltluftströmung:** → Flurwind

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

**Kaltluftvolumenstrom:** Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $m^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*dichte* aufzufassen. Dies kann man so veranschaulichen, indem man sich ein quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>5</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom.

**Kaltluftproduktion:** Physikalisch nicht korrekter, aber in der Stadt- und Landschaftsplanung gebräuchlicher Begriff für die Abkühlung der über einer Bodenoberfläche lagernden Luft. Die Kaltluftproduktion wird vom vorherrschenden Vegetationstyp, den Bodeneigenschaften (Bodenfeuchte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeichervermögen des Substrates) sowie der Größe des → Kaltluftliefergebietes bestimmt.

**Kaltluftentstehungsflächen:** Vegetationsgeprägte Flächen, welche im Vergleich zu den bebauten Arealen in der Nacht stärker abkühlen und → Kaltluft bilden. Sie werden auch als → Ausgleichsräume bezeichnet.

**Kaltluftliefergebiete:** → Kaltluftentstehungsflächen

**Kaltlufteinwirkungsbereich:** → Eindringtiefe

**Kaltlufthaushalt:** Oberbegriff für die Gesamtheit der sich in einem Untersuchungsraum vollziehenden nächtlichen Luftaustauschprozesse und deren Quantitäten.

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

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

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

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

---

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

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

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

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

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

**Reichweite:** → Eindringtiefe

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

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

**Ungunsträume:** Klimatisch belastete Siedlungsräume, die einen Durchlüftungsmangel und eine 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 den Gradientwind aufnimmt und zur Be- und Entlüftung des Wirkungsraumes beiträgt.

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

**Wärmeinsel:** Derjenige städtische Lebensraum, der gegenüber der Umgebung vor allem abends und nachts eine höhere Lufttemperatur aufweist. Es bilden sich i.d.R. mehrkernige Wärmeinseln in einer Stadt aus. Die Jahresmitteltemperaturen sind in diesen Räumen um 0,5 bis 1,5 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:** Bebaute (oder zur Bebauung vorgesehener), bioklimatisch und/oder lufthygienisch belasteter Raum (Belastungsraum), der an einen oder mehrere Ausgleichsräume angrenzt oder über wenig raue Strukturen angebunden ist. Durch lokale Luftaustauschprozesse erfolgt eine Zufuhr von Kalt-/Frischlufte aus dem → Ausgleichsraum, die zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen beiträgt.