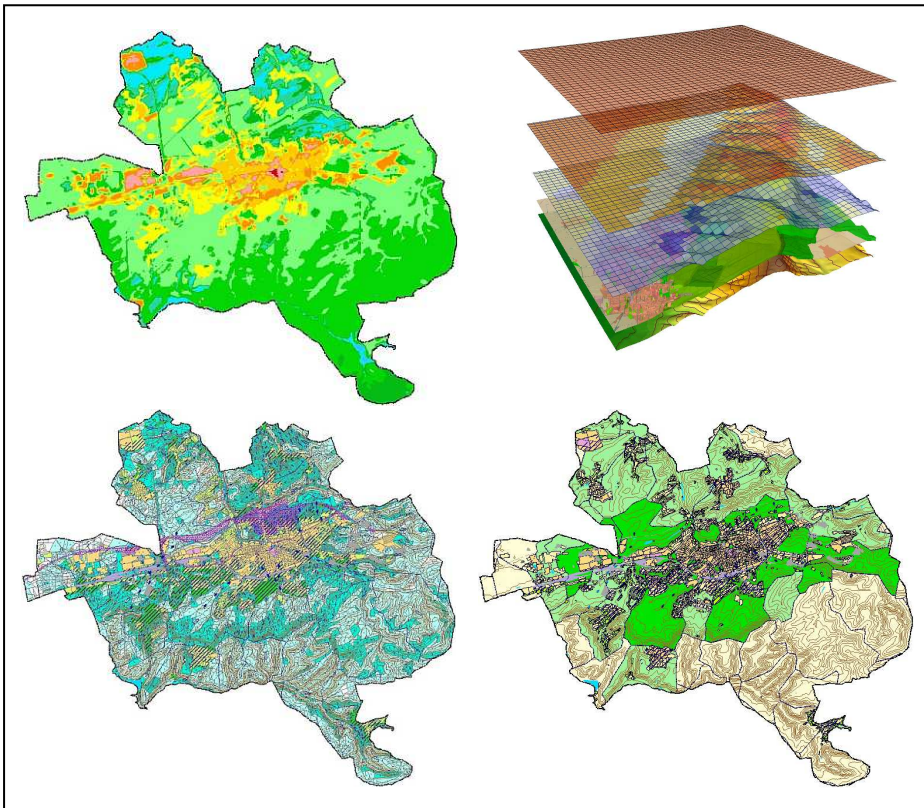


# Aktualisierung der gesamtstädtischen Klimaanalyse und deren planungsrelevante Inwertsetzung für die Stadt Kaiserslautern



Auftraggeber:

**Stadtverwaltung Kaiserslautern**  
Referat Umweltschutz  
67653 Kaiserslautern



**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**

Große Pfahlstraße 5a

3 0 1 6 1 Hannover

Tel. (0511) 3887200

FAX (0511) 3887201

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

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

Hannover, April 2012

**Auftrag:** Aktualisierung der gesamtstädtischen Klimaaanalyse und deren planungsrelevante Inwertsetzung für die Stadt Kaiserslautern

**Standort:** Stadt Kaiserslautern  
Bundesland: Rheinland-Pfalz  
Deutschland

**Auftraggeber:** Stadtverwaltung Kaiserslautern  
Referat Umweltschutz  
67653 Kaiserslautern


**Projektnummer:** 2\_10\_013


**Berichtsnummer:** 2\_10\_013\_KL\_Klima\_Rev01

**Version:** 2

**Datum:** 18. April 2012

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

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

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

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

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

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

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

Amtsgericht Hannover  
HRB 61218

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



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

**Inhaltsverzeichnis**

Seite:

**Inhaltsverzeichnis..... I**

**Abbildungsverzeichnis..... II**

**Tabellenverzeichnis..... III**

**1. Aufgabenstellung ..... 1**

**2. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen ..... 3**

2.1 Geländehöhe.....3

2.2 Nutzungsstruktur .....4

**3. Methodik..... 6**

3.1 Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH.....6

3.2 Modellierung der verkehrsbedingten und gewerblichen Luftschadstoffausbreitung ..... 11

3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen..... 12

3.3.1 Grün- und Freiflächen ..... 12

3.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen..... 14

**4. Ergebnisse der Klimamodellierung ..... 16**

4.1 Kaltlufthaushalt..... 16

4.1.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld..... 16

4.1.2 Autochthones Windfeld ..... 19

4.1.3 Kaltluftvolumenstrom.....23

4.2 Ermittlung der lufthygienischen Belastung durch die Quellgruppen Verkehr und Gewerbe.....24

4.2.1 Mittlere Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)-Immission.....25

4.2.2 Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)-Immission während austauscharmer Wetterlagen .....26

**5 Klimaökologische Funktionen ..... 29**

5.1 Grün- und Freiflächen .....29

5.2 Siedlungsräume .....31

5.3 Luftaustausch.....33

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>Planungshinweiskarte Stadtklima .....</b>  | <b>34</b> |
| 6.1      | Grün- und Freiflächen .....                   | 36        |
| 6.2      | Siedlungsräume .....                          | 37        |
| 6.3      | Luftaustausch .....                           | 38        |
| 6.4      | Nutzungshinweise für die Bauleitplanung ..... | 39        |
| <b>7</b> | <b>Fazit .....</b>                            | <b>41</b> |
| <b>8</b> | <b>Literatur .....</b>                        | <b>43</b> |
| <b>9</b> | <b>Glossar .....</b>                          | <b>44</b> |

### Abbildungsverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Abb. 1:  | Geländehöhe im Untersuchungsraum .....  | 3  |
| Abb. 2:  | Nutzungsstruktur im Untersuchungsraum .....   | 4  |
| Abb. 3:  | Unterschiedliche Rasterweiten bei einem digitalem Geländehöhenmodell .....  | 7  |
| Abb. 4:  | Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit .....   | 8  |
| Abb. 5:  | Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle .....   | 9  |
| Abb. 6:  | Eingangsdaten für die Modellrechnung .....  | 10 |
| Abb. 7:  | Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit für verschiedene Landnutzungen .....                       | 11 |
| Abb. 8:  | Prinzipskizze Kaltluftleitbahn .....  | 10 |
| Abb. 9:  | Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund) .....   | 18 |
| Abb. 10: | Lufttemperatur in 2 m Höhe im Raum Kaiserslautern-Nordost .....   | 19 |
| Abb. 11: | Prinzipskizze Flurwind .....  | 20 |
| Abb. 12: | Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens .....  | 21 |
| Abb. 13: | 3D-Geländemodell mit Kaltluftabflüssen sowie Strömungsfeld und Windgeschwindigkeit im Raum Kaiserslautern-Nordost ..... | 22 |
| Abb. 14: | NO <sub>2</sub> -Immissionsfeld im Bereich Innenstadt/Rotenberg (Jahresmittelwert) .....                                | 26 |
| Abb. 15: | NO <sub>2</sub> -Immissionsfeld im Bereich Innenstadt/Rotenberg (austauscharme Wetterlage) .....                        | 27 |
| Abb. 16: | Klimafunktionen im Raum Kaiserslautern-Ost .....  | 31 |
| Abb. 17: | Planungshinweise im Raum Kaiserslautern-Ost .....   | 35 |
| Abb. 18: | Flächenanteile der bioklimatischen Situation (Nachtsituation) .....   | 41 |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung.....   | 5  |
| Tab. 2: Bewertung der Kaltluftlieferung innerhalb von Grünflächen .....   | 13 |
| Tab. 3: Klassifizierung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen während einer<br>windschwachen Sommernacht ..... | 15 |
| Tab. 4: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms .....  | 23 |
| Tab. 5: Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Kaiserslautern.....                     | 30 |
| Tab. 6: Bilanzierung der planerisch relevanten Grünflächen .....  | 37 |
| Tab. 7: Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen .....  | 39 |

## 1. Aufgabenstellung

Das Schutzgut Klima/Luft 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 über das in einer Stadt vorherrschende Lokalklima, die dadurch mitbestimmte lufthygienische Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen sind Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft abzuleiten. 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.

Im Auftrag der Stadt Kaiserslautern wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Groß (Universität Hannover) im Jahr 2011 eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen und lufthygienischen Funktionen für das Stadtgebiet Kaiserslautern durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen („städtische Wärmeinsel“) sowie lufthygienischen Belastungen einhergehen. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Das Windfeld der Stadt und damit auch die bioklimatische/lufthygienische Situation wird dann im Gegensatz zu einer windstarken „Normallage“ durch regionale und lokale Luftzirkulationen wie z.B. Talabwinde, Hangabwinde und Luftaustausch zwischen Freiräumen (klimaökologische Ausgleichsräume) und Bebauung (klimaökologische Wirkungsräume) bestimmt.

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 Kaiserslautern geführt. Die durchgeführten Untersuchungen haben darüber hinaus zum Ziel, die unterschiedlichen Teilflächen der Stadt Kaiserslautern nach ihren klimatischen Funktionen, d.h. ihrer Wirkungen auf andere Räume, abzugrenzen und die klimaökologisch wichtigen Raumstrukturen herauszuarbeiten.

Dieser Untersuchung geht eine im Jahr 2009 durchgeführte Analyse voraus, bei der die Modellrechnungen durch umfassende messwertgestützte Auswertungen zur klimatischen Situation im Raum Kaiserslautern sowie der Durchführung von Temperaturmessfahrten zur Modellvalidierung ergänzt wurden (GEO-NET 2009). Mit der vorliegenden Aktualisierung der Klimaanalyse war es nun möglich, aktuelle Daten einer Laserscanner-Befliegung in die Modellrechnungen einzubinden. Diese Daten bilden die Oberflächenstruktur von Bebauung und Grünflächen mit einer hohen räumlichen Auflösung ab. Da die nächtliche Luftzirkulation und das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung stark von den Nutzungsstrukturen beeinflusst werden, erhöht sich damit die Aussagegenauigkeit der Klimaanalyse insgesamt.

### **Analyse der stadtklimatischen Zusammenhänge**

Das Ergebnis ist eine aktuelle, komplexe und hochauflösende Karte der klima- und immissionsökologischen Funktionen (Klimafunktionskarte). Als Grundlage für die Bewertung dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse. Im Hinblick auf die verkehrsbedingten Luftbelastung wurde ein flächendeckendes Immissionsfeld für eine windschwache Wettersituation modelliert.

In diesem Zusammenhang findet das Ausbreitungsfeld für die verkehrstypische Komponente Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) als lufthygienischer Belastungsbereich Eingang in die Klimafunktionskarte. Die städtische Hintergrundbelastung wurde bei der Modellrechnung durch gewerbliche NO<sub>2</sub>-Emissionen ergänzt.

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

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

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

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

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

Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt fundierte Aussagen für den Maßstabsbereich 1 : 50 000 bis 1 : 15 000 (F-Plan-Ebene). Eine abschätzende Beurteilung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen ist aber auch auf Bebauungsplanebene gegeben.

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

Bei einer Gesamtgröße des Untersuchungsraums von ca. 361 km<sup>2</sup> geht die Abgrenzung des Untersuchungsraumes deutlich über das Stadtgebiet Kaiserslautern hinaus und zielt darauf ab, auch außerhalb des Stadtgebiets vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren (vgl. Abb. 12, S. 19). Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 20 m x 20 m.

### 2.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell der Stadt Kaiserslautern mit einer Auflösung von 5 m zurückgegriffen werden. Für das nähere Umland wurde das Geländemodell durch DTED-Höhendaten ergänzt (Digital Terrain Elevation Data - NGA 2004). Darauf basierend wurde das für die Modellrechnung erforderliche Raster mit einer Auflösung von 20 m erzeugt (Abb. 1).

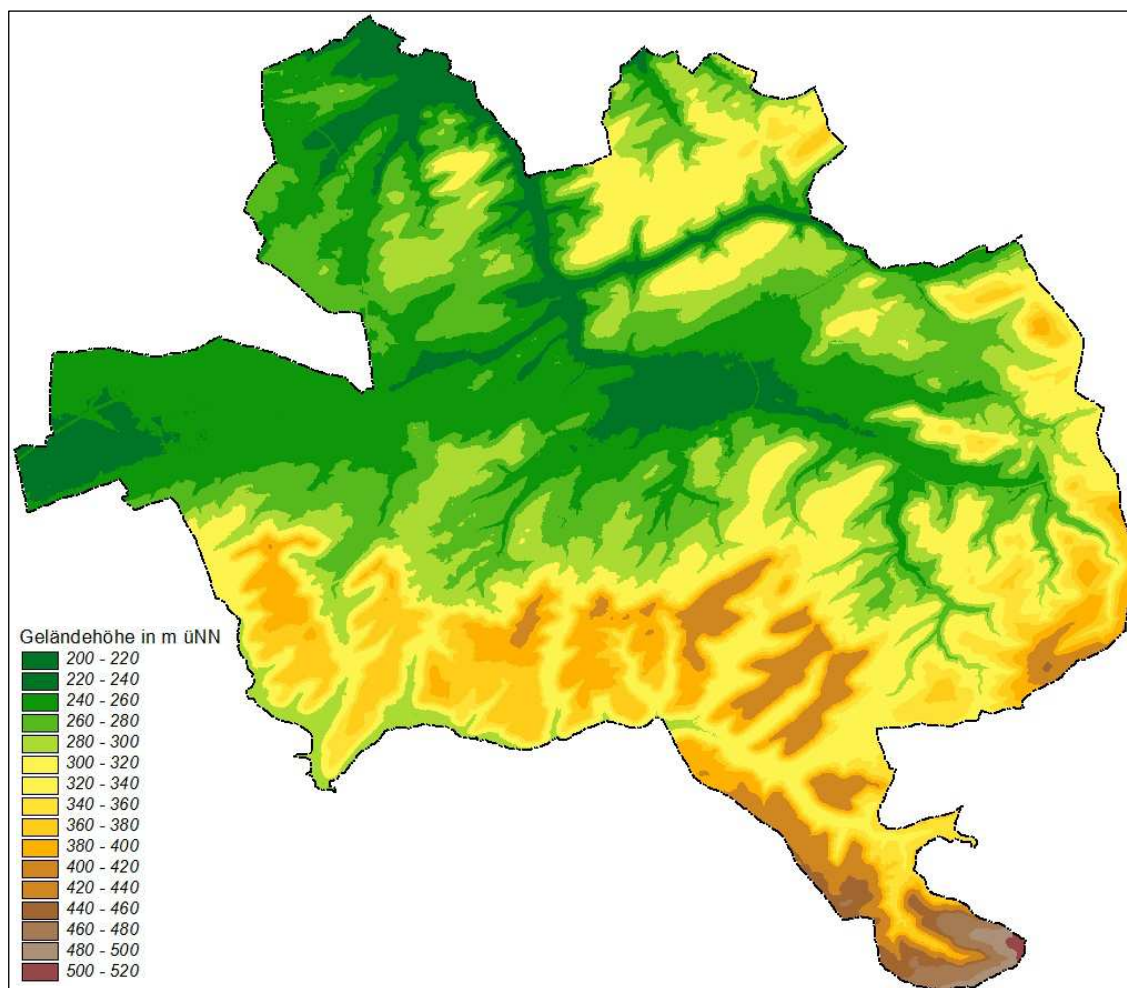


Abb. 1: Geländehöhe im Untersuchungsraum

Den höchstgelegenen Geländepunkt im Untersuchungsgebiet markiert im Südosten der Höhenzug der Frankenweide mit mehr als 500 m über NN. Damit ergibt sich, ausgehend vom Lautertal im Nordwesten (ca. 210 m ü. NN), eine Höhendifferenz etwa 290 m.



## 2.2 Nutzungsstruktur

Informationen zur Landnutzung wurden von der Stadt Kaiserslautern bereitgestellt (STADT KAISERSLAUTERN 2008). Für deren Aufbereitung konnte auf die Daten des ATKIS DLM zurückgegriffen werden (LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATIONEN RHEINLAND-PFALZ 2008). Die Nutzungsstruktur im Stadtgebiet zeigt Abbildung 2:

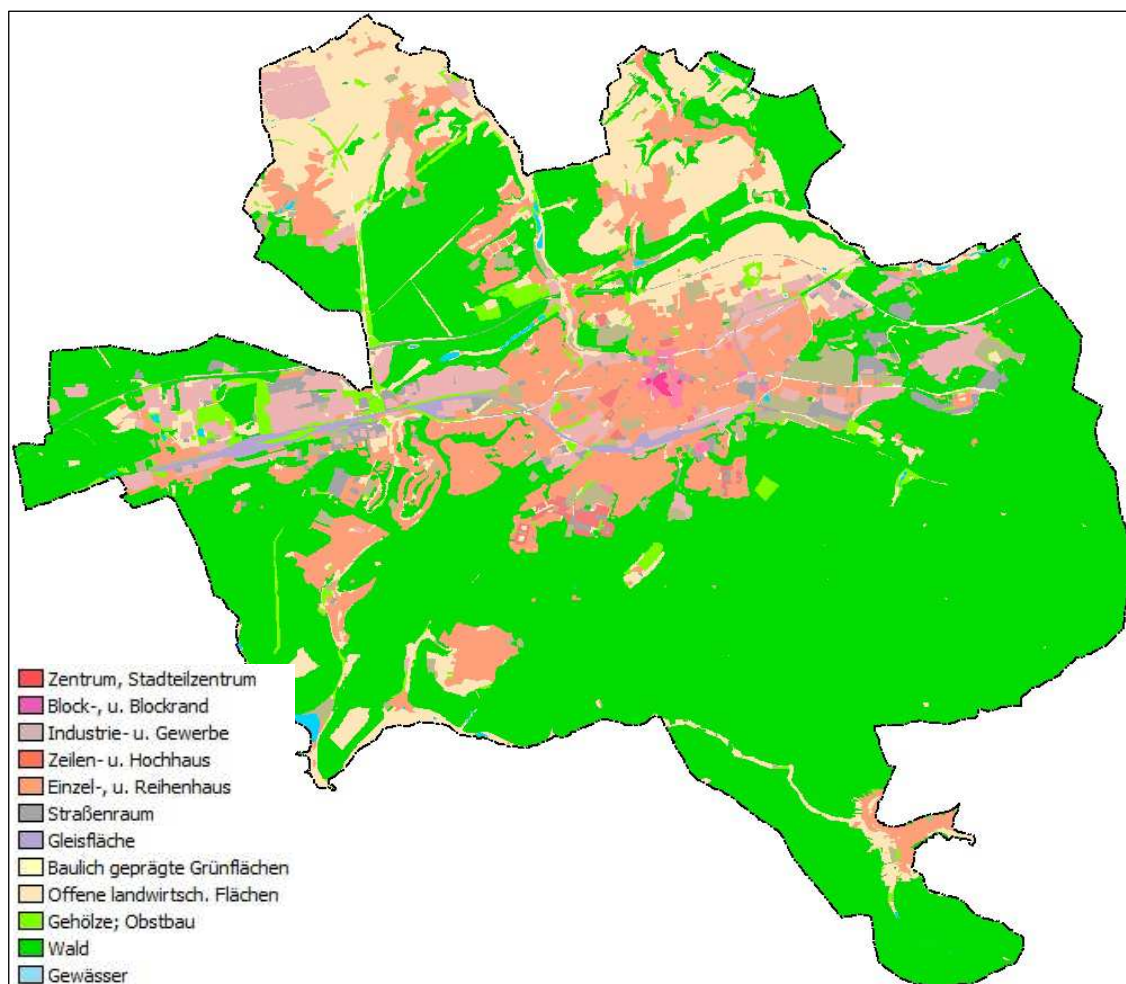


Abb. 2: Nutzungsstruktur im Untersuchungsraum

Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Oberflächenstrukturen dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben. Für die Zuweisung der Strukturhöhe wurden vom Auftraggeber Laserscannerdaten zur Verfügung gestellt. Die in einer Auflösung von 5 m x 5 m vorliegenden Daten wurden zu einem 20 m x 20 m Raster aggregiert und somit in die Rasterweite der Modellrechnung überführt. Im Vergleich zur vorangegangenen Klimasimulation im 50 m x 50 m Raster, welche für jede Nutzungsklasse eine einheitliche Strukturhöhe vorsah, können auf Grundlage der Laserscanner-Befliegung die Oberflächenhöhen noch differenzierter berücksichtigt werden und in die Modellrechnung eingehen.

Für die Einordnung des Oberflächenversiegelungsgrades sind nutzungsklassifiziert vorliegende Literaturdaten (u.a. MOSIMANN et al. 1999) genutzt worden, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen aus mehreren deutschen Städten beruhen. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein vereinfachter, 12-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet.

Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen möglich zu machen. Die verwendeten Nutzungskategorien zeigt Tab. 1.

| Klasse | Flächentyp                     | Beschreibung  | Mittlerer Versiegelungsgrad (%) |
|--------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| 1      | Zentrumsbebauung               | Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist.  | 95                              |
| 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                              |
| 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                              |
| 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                              |
| 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                              |
| 6      | Straßenraum                    | Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.  | 95                              |
| 7      | Gleisfläche                    | Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe.   | 25                              |
| 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                              |
| 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                               |
| 10     | Gehölz                         | Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün.  | 5                               |
| 11     | Wald                           | Größere Waldflächen des Umlandes sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.   | 5                               |
| 12     | Wasserfläche                   | Still- und Fließgewässer.   | 0                               |

Tab. 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Für die Klimamodellierung ist weniger die Nutzungsart relevant als vielmehr die Nutzungsstruktur und damit der Flächentyp. Maßgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie z.B. Versiegelungsgrad, Bebauungsdichte und Strukturhöhe aus. Daher gilt es eine Einstufung zu finden, welche am ehesten die strukturelle Eigenschaft einer Fläche widerspiegelt.

Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. Für die Modellrechnung zum Kaltlufthaushalt, auf dessen Grundlage die Klimafunktions- und Planungshinweiskarte beruht, ist eine einheitliche Rasterauflösung von 20 m x 20 m verwendet worden.

### 3. Methodik

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

##### Allgemeines

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

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

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

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

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

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

### Grundgleichungen

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

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

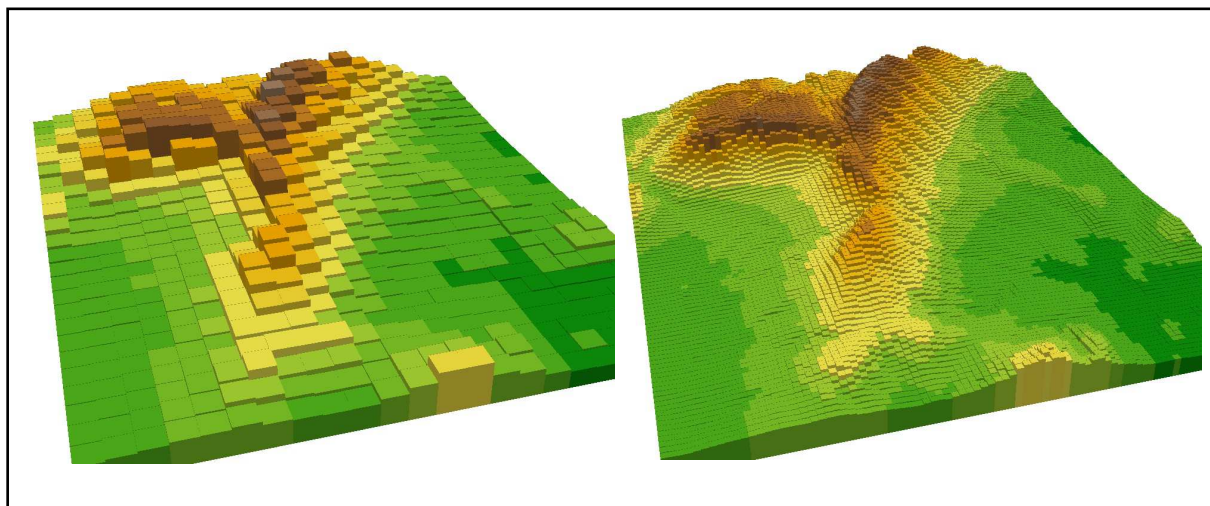


Abb. 3: Unterschiedliche Rasterweiten (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m) bei einem digitalem Geländehöhenmodell

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 20 m x 20 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 Modelobergrenze 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 20 m x 20 m bis 1000 m x 1000 m. Sie decken damit in etwa den Maßstabsbereich von 1:20 000 bis 1:100 000 ab und gehen mit der Planungsebene Flächennutzungsplan bzw. Regionalplan einher. Sind diese Strukturen von ihrer räumlichen Ausprägung her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden). Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben die berechnet werden sollen, so müssen diese in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung).

Die beiden wichtigsten Strukturen, die bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind von ihrer räumlichen Dimension allerdings so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebautem Gelände stellen sich die einzelnen Gebäude der Strömung in den Weg und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, die summarische Wirkung über eine Rasterzelle mit Gebäuden ist aber eine Verzögerung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Hindernisse die Turbulenz verstärkt. Auch die Temperaturverteilung wird in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Diese Effekte können über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Porosität (Abb. 4). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem geringen Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

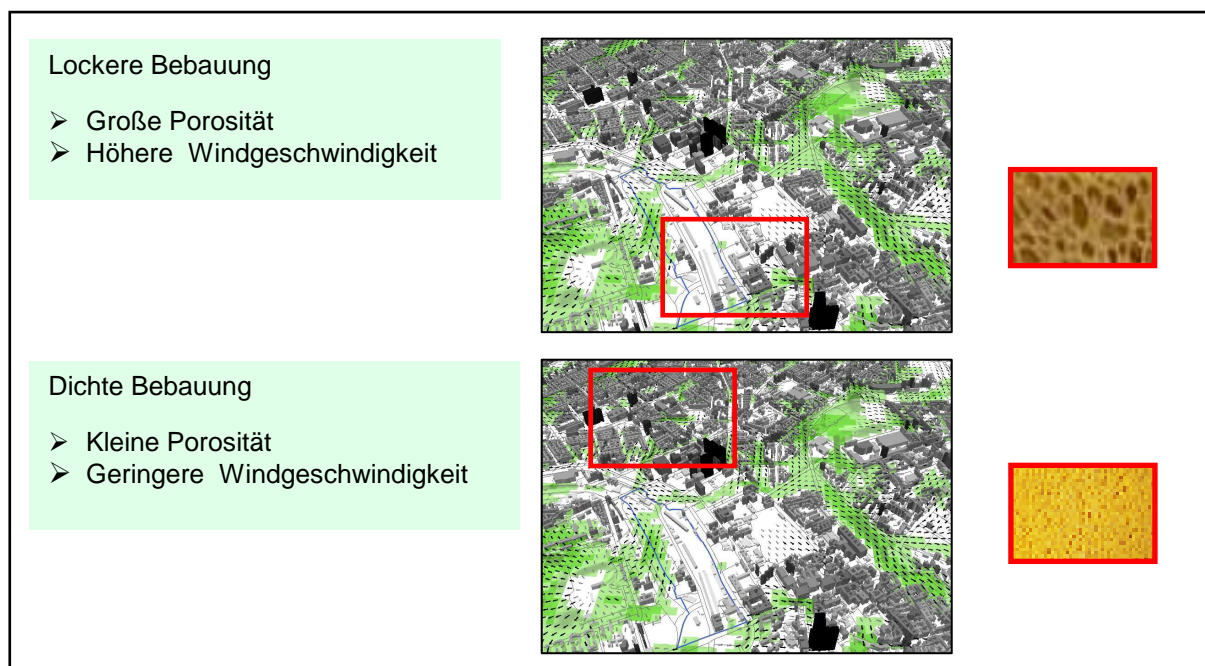


Abb. 4: Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

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. 5). 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).

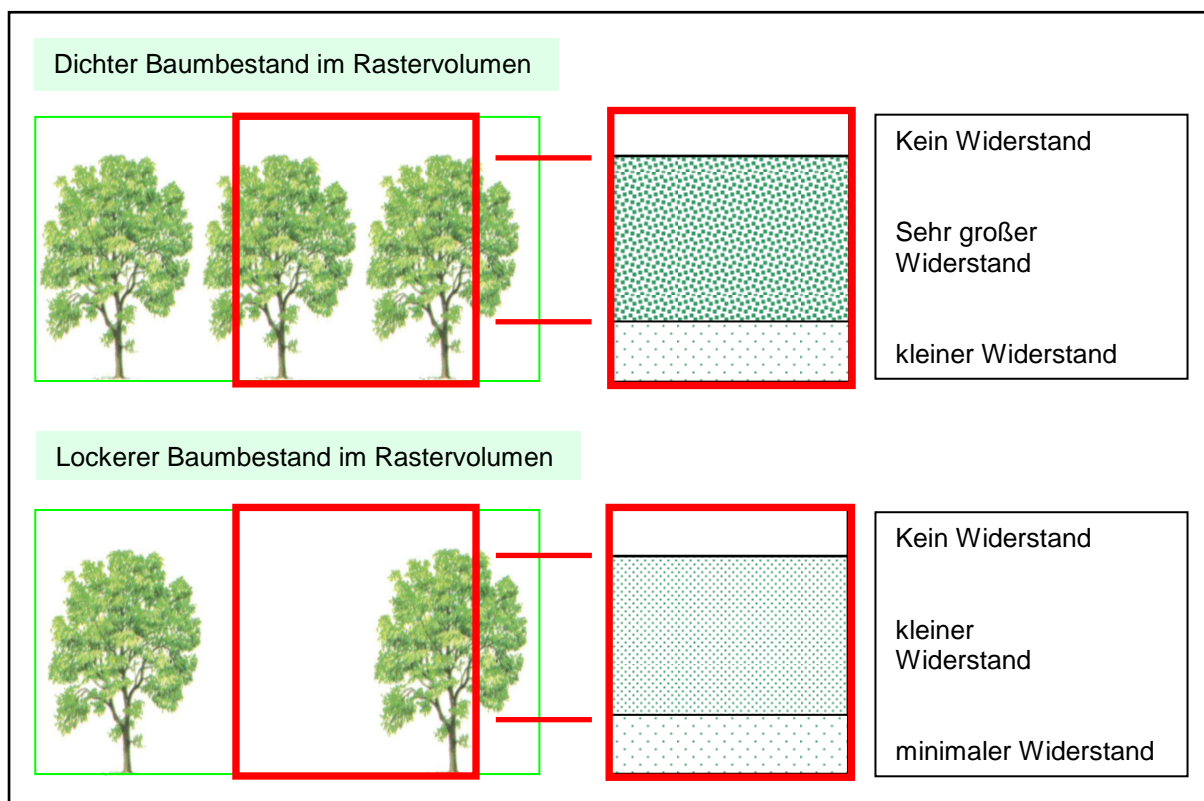


Abb. 5: Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

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. 6). 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.

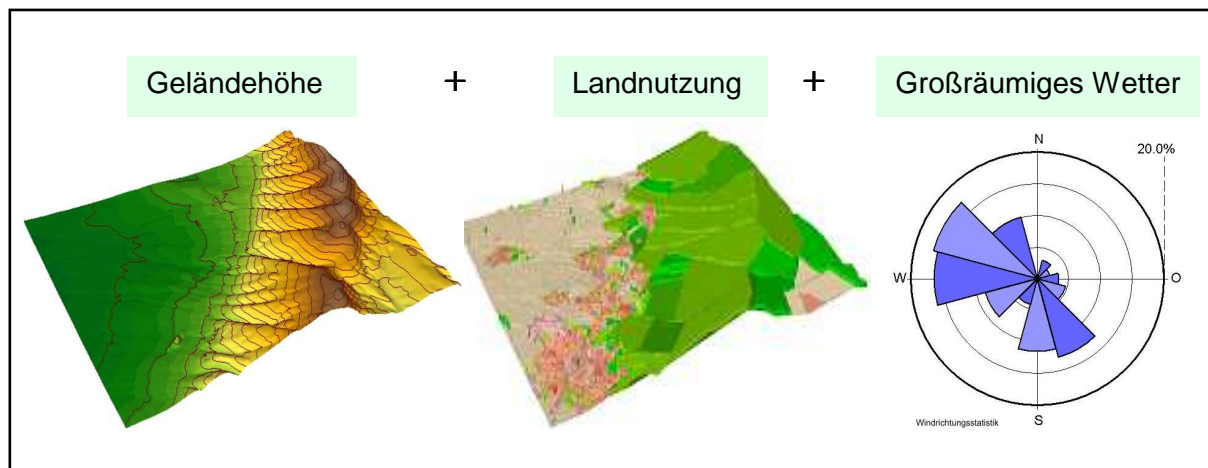


Abb. 6: Eingangsdaten für die Modellrechnung

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

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

## Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Stadt besonders gut ausprägen, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Diese Wetterlagen treten in Kaiserslautern typischerweise an ca. 30 % der Nachtstunden in den Sommermonaten Juni, Juli und August auf. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt:

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

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht und tragen zur Anreicherung von Luftschadstoffen bei. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden.

Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar.

In Abb. 7 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

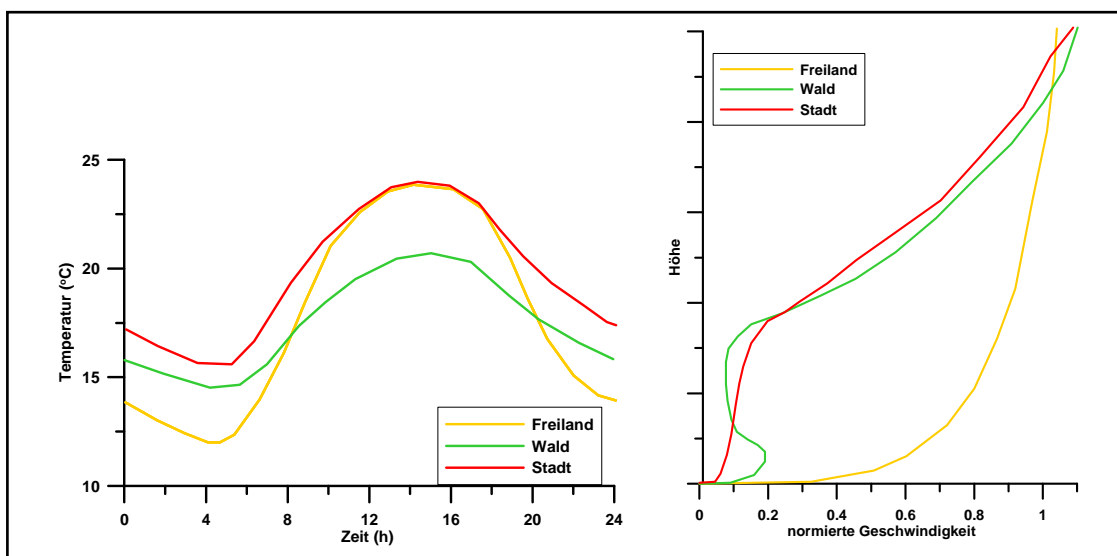


Abb. 7: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit für verschiedene Landnutzungen

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

### 3.2 Modellierung der verkehrsbedingten und gewerblichen Luftschadstoffausbreitung

Zur Abschätzung der Luftschadstoffbelastung an Straßen ist es notwendig, die Kausalbeziehung Emission-Transmission-Immission modellhaft möglichst exakt nachzubilden. Die vorliegende Untersuchung berücksichtigt die Situation während einer austauscharmen Wetterlage mit Verkehrsdaten des Bezugsjahres 2010. Die Verkehrsdaten sind im Rahmen der Lärmkartierung Kaiserslautern erarbeitet worden und wurden von Büro FIRU GfI - Gesellschaft für Immissionsschutz mbH aus Kaiserslautern zur Verfügung gestellt. Nach Berechnung der straßenabschnittsbezogenen Emissionen sind diese in das Geodatenbankumfeld des Verkehrsnetzes überführt und auf ein für das Simulationsmodell FITNAH geeignetes Raster mit einer Zellengröße von 20 m x 20 m abgebildet worden. Ergänzt wurde dies durch die Informationen zu den Emissionserklärungen der genehmigungsbedürftigen Anlagen im Stadtgebiet Kaiserslautern (Bezugsjahr 2008) und ermöglichte damit die Berechnung einer Gesamtbelastung. Die Immissionssituation der Luftschadstoffe am Beispiel von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) wurde hinsichtlich der mittleren Situation (Jahresmittelwert) sowie für eine windschwache Wetterlage simuliert.



### 3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen

Um Aussagen über die Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen auch untereinander abgrenzbar sein. Das bedeutet, dass die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und bei den Siedlungsflächen die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren kann. Um diese Heterogenität in der Klimafunktions- bzw. Planungshinweiskarte darstellen zu können, wurde den Blockflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen (vgl. Kap. 2.2, S. 4), die relevanten Klimaparameter wie z.B. Windgeschwindigkeit oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Diese Parameter liegen als rasterbasierte Felder in einem Geographischen Informationssystem als 20 m Raster vor. Das Ausbreitungsfeld für den Luftschadstoff Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) wurde ebenfalls in dieser Rastergröße berechnet.

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

#### 3.3.1 Grün- und Freiflächen

Während in der Klimafunktionskarte die Grünflächen vor allem hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert werden, steht in der Planungshinweiskarte 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. 6.1 (S. 40) genauer eingegangen wird. Die Darstellung und Bewertung der Siedlungsflächen bleibt hingegen in Klimafunktions- und Planungshinweiskarte 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. 4.1.3, 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. Während diese Methode vor allem für die Ermittlung der bioklimatischen Situation geeignet ist (vgl. Kap. 3.3.2, S. 14), wird sie in dieser Untersuchung darüber hinaus auch für die Bewertung des Kaltluftvolumenstroms herangezogen. Da die Intensität des Luftaustausches je nach Untersuchungsraum und dessen topographischen Bedingungen unterschiedlich ausgeprägt sein kann, legt diese statistische Analyse das lokale/regionale Wertenniveau eines Gebietes zugrunde und bewertet somit die Abweichung eines meteorologischen Parameters von den mittleren Verhältnissen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung einer Variablen durch die Z-Transformation. Dadurch können die meteorologischen Parameter dimensionslos unter Beibehaltung der Relation bewertet werden. Damit stehen dann weniger die absoluten Werte im Vordergrund, was zu einer guten Vergleichbarkeit der Variablen untereinander oder mit anderen Untersuchungen führt. Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier Bewertungskategorien (s. Tab. 2), welche durch den Mittelwert (bei 0) sowie die obere und untere S<sub>1</sub>-Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen >0 bedeuten überdurchschnittliche Werte, woraus sich die Einstufung in hoch und

sehr hoch ergibt. Negative Ausprägungen von  $<0$  bedeuten hingegen ein unterdurchschnittliches Niveau (entsprechend mäßig und gering).

Die qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms zeigt Tabelle 2, wobei für einen klimaökologisch wirksamen Massenstrom der Wertebereich  $>-1$  angesehen wird (vgl. Tabelle 2). 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 Werteausprägung *innerhalb der Grünflächen*. Daher weicht die Klassifizierung von der des flächendeckenden rasterbasierten Volumenstroms ab (vgl. Kap. 4.1.3, S. 25).

| Mittlerer Z-Wert pro Grünfläche | Kaltluftvolumenstrom<br>in $\text{m}^3/\text{s}$ | Bewertung |
|---------------------------------|--|-----------|
| $> 1$ (obere $S_1$ -Schranke)   | $> 800$  | Sehr hoch |
| 1 bis 0                         | 800 bis $\geq 400$                               | Hoch      |
| 0 bis -1                        | 400 bis $\geq 100$                               | Mäßig     |
| $< -1$ (untere $S_1$ -Schranke) | $< 100$  | Gering    |

Tab. 2: Bewertung der Kaltluftlieferung innerhalb von Grünflächen

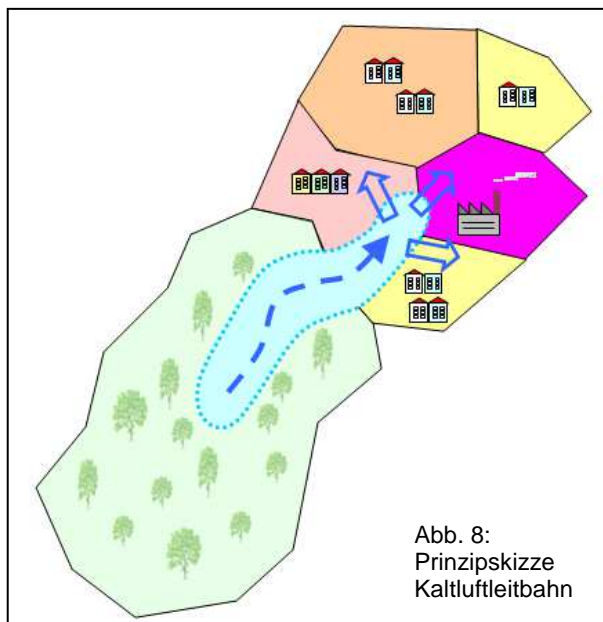
Die Darstellung der Kaltluftliefergebiete erfolgt als abgestufte Flächenfarbe. Zudem erhalten Grünflächen  $> 1$  Hektar mit einem mindestens mäßigen Kaltluftvolumenstrom eine Pfeilsignatur mit der Hauptströmungsrichtung innerhalb einer Fläche.

Ergänzend sind noch die *Kaltlufteinzugsgebiete* dargestellt worden. Sie sind das Ergebnis einer Reliefanalyse, bei der eine Berechnung der Abflussbahnen mit ihren Abflussrichtungen durchgeführt wurde (KING 1973). Als Abflussbahnen können vor allem Tiefenlinien wie z.B. Fließgewässer angesprochen werden, innerhalb derer sich die Kaltluftströmungen kanalisieren. Aus der gegenseitigen Abgrenzung ergeben sich Areale einheitlicher Gefällrichtungen, aus denen die auf Freiflächen produzierte Kaltluft abfließen kann. Die gemeinsame Darstellung von Grünflächen und Einzugsgebieten hat den Vorteil, dass in der Klimafunktionskarte auch die Differenzierung der Kaltluftlieferung durch Einzelflächen sichtbar wird.

Darüber hinaus ist Hauptabflussrichtung der Kaltluft innerhalb eines Kaltlufteinzugsgebietes über einen einzelnen Pfeil dargestellt. Die Abflussrichtung innerhalb der Einzugsgebiete wurde aus dem Windfeld gemittelt und orientiert sich meist an der Ausrichtung von vorhandenen Taleinschnitten als Leitbahnen oder Hangbereichen.

## Kaltluftleitbahnen

*Leitbahnen* verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 8). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird sowohl in der Klimafunktionskarte als auch der Planungshinweiskarte 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.

*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. Da wegen der Reliefsituation im Untersuchungsraum vorrangig Kaltluftabflüsse auftreten, werden sie nicht gesondert ausgewiesen.

### 3.3.2 Bioklima in den Siedlungsflächen

Die Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der *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.

Grundlage für die Beurteilung der *bioklimatischen Belastung* eines Baublockes ist der Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die Wärmebelastung. Dieser basiert auf der Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers und gibt den Grad der Unbehaglichkeit bzw. Behaglichkeit als mittlere subjektive Beurteilung einer größeren Anzahl von Menschen wieder. Bei der Berechnung des PMV-Wertes müssen als wichtigste meteorologische Eingangsgrößen die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, der Dampfdruck und die Strahlungstemperatur am Aufenthaltsort bekannt sein. Diese meteorologischen Parameter unterscheiden sich innerhalb städtischer Strukturen in weiten Grenzen. In Abhängigkeit von den stadtspezifischen Faktoren (z.B. Bebauungshöhe, Versiegelung, Durchgrünungsgrad) und der Charakterisierung der Wettersituation (z.B. Wind, Luftmasseneigenschaften), können mit Hilfe des mesoskaligen Modells FITNAH diese Verteilungen innerhalb von Kaiserslautern detailliert berechnet werden.





Der nächtlichen Wärmebelastung, wie sie in der Klimafunktions- bzw. Planungshinweiskarte dargestellt ist, liegt die Wertausprägung in der zweiten Nachthälfte um 4 Uhr zugrunde. Es handelt sich um den PMV-Wert für eine typische *Sommernacht* mit geringem Luftaustausch und ungehinderter langweiliger Ausstrahlung bei einem wolkenlosen Himmel. Dabei wirken lokal auftretende Kaltluftströmungen modifizierend auf die räumliche Ausprägung des PMV. Es handelt sich somit um eine Einzelsituation.

### Beurteilung der bioklimatischen Situation

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

Für die Zuordnung eines Baublocks ist die jeweilige durchschnittliche Ausprägung des Z-Wertes des PMV innerhalb der Fläche relevant (als Rasterzellenmittelwert), aus der sich die Zuordnung zu den Bewertungskategorien ergibt (vgl. Tabelle 4). Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier qualitative Bewertungskategorien, welche durch den Mittelwert sowie die obere und untere S<sub>1</sub>-Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen > 0 bedeuten überdurchschnittliche Wertausprägungen und resultieren in den Kategorien „Weniger günstig“ und „Ungünstig“. Negative Ausprägungen von < 0 repräsentieren ein unterdurchschnittliches Belastungsniveau und werden entsprechend als „Günstig“ und „Sehr günstig“ kategorisiert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung 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. 3 sind den jeweiligen Klassen außerdem charakteristische Bebauungstypen zugeordnet.

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

Tab. 3: Klassifizierung der bioklimatischen Belastung der Siedlungsflächen während einer windschwachen Sommernacht

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

## 4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern Lufttemperatur in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Die Ergebniskarten zu den beschriebenen meteorologischen Parametern sowie Klimafunktions- und Planungshinweiskarte sind dem separaten Kartenanhang zu entnehmen.

### 4.1 Kaltlufthaushalt

#### 4.1.1 Bodennahe Lufttemperaturfeld

**Allgemeines:** Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmaß der Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- und Oberflächeneigenschaften – große Unterschiede aufweisen, so dass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit mehr als 9 K (Kelvin) 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 langwelligeren Strahlungsgewinns veränderte Strahlungsbilanz (lokaler Treibhauseffekt)
- die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis mit hoher aerodynamischer Rauigkeit und die damit verbundene Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland
- die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion

Damit ist das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich vor allem abhängig von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung.

Doch auch die Luftvolumina über grünbestimmten Flächen weisen untereinander keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate von natürlichen Oberflächen wird insbesondere von ihren thermischen Bodeneigenschaften (u.a. ihrer Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie von eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen (Bewuchs, Laubstreu usw.) 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 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 bebauten 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 wird das gesamtstädtische Temperaturfeld für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens erläutert (Abb. 9). Für den Vertiefungsbereich Kaiserslautern-Nordost/Rotenberg wird das Ergebnis in Abb. 13 (S. 23) dargestellt.

**Ergebnisse Temperaturfeld:** Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Temperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst zwischen Minimalwerten von 12°C und Maximalwerten von bis zu 22°C eine Spannweite von etwa 10 Kelvin (K)<sup>1</sup>. Die mittlere Temperatur im Stadtgebiet liegt bei den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen für eine beispielhafte Sommernacht bei 16,2°C.

Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weist die Zentrumsbebauung der Innenstadt die höchsten Temperaturen von bis zu 22°C auf und geht mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung von bis zu 95% einher (Abb. 9).<sup>1</sup>

Die sich an den Innenstadtbereich anschließende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 19°C bis 21°C ebenfalls ein erhöhtes Temperaturniveau. Ähnlich hohe Temperaturen sind auch im Bereich ausgedehnter Gewerbegebiete wie z.B. im Westen von Kaiserslautern anzutreffen und treten diese Areale, entsprechend zum Befund der vom 01. auf den 02. Juli 2008 durchgeführten Temperaturmessfahrt, als Wärmepole hervor.

Ausgedehnte Areale des Siedlungsraumes sind durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbauung geprägt. Diese Bauungsstruktur weist unter den Siedlungsflächen das geringste Temperaturniveau auf, wobei 19°C selten überschritten werden. In den dörflich geprägten und peripheren Ortslagen von Kaiserslautern wie z.B. Erlenbach oder Mölschbach können die Lufttemperaturen auch auf unter 15°C zurückgehen. Darüber hinaus zeigen die Verkehrsflächen, abhängig vom Versiegelungsgrad, Temperaturen zwischen 16°C und 19°C.

---

<sup>1</sup> Entsprechend DIN werden in dieser Untersuchung Temperaturdifferenzen in Kelvin (Einheitenzeichen: K) angegeben. Der Wert kann ohne weiteres als Abweichung in Grad Celsius (°C) interpretiert werden.

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

Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit etwa 12°C über den ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen im nördlichen Stadtgebiet anzutreffen, was in der starken langwelligen Ausstrahlung nach Sonnenuntergang begründet liegt (Abb. 9). Ähnlich geringe Werte können auch in Senken- und Talbereichen auftreten, wo sich die Kaltluft aufgrund ihrer höheren Dichte sammelt. Waldareale besitzen in Abhängigkeit von der Höhenlage ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau von 14°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 Freiflächen, abhängig von ihrer Größe und Form, ein höheres Wertespektrum auf. Zu den größten städtischen Grünflächen zählt z.B. der Volkspark, für den ein Temperaturniveau zwischen 15°C und 15,5°C modelliert wurde.

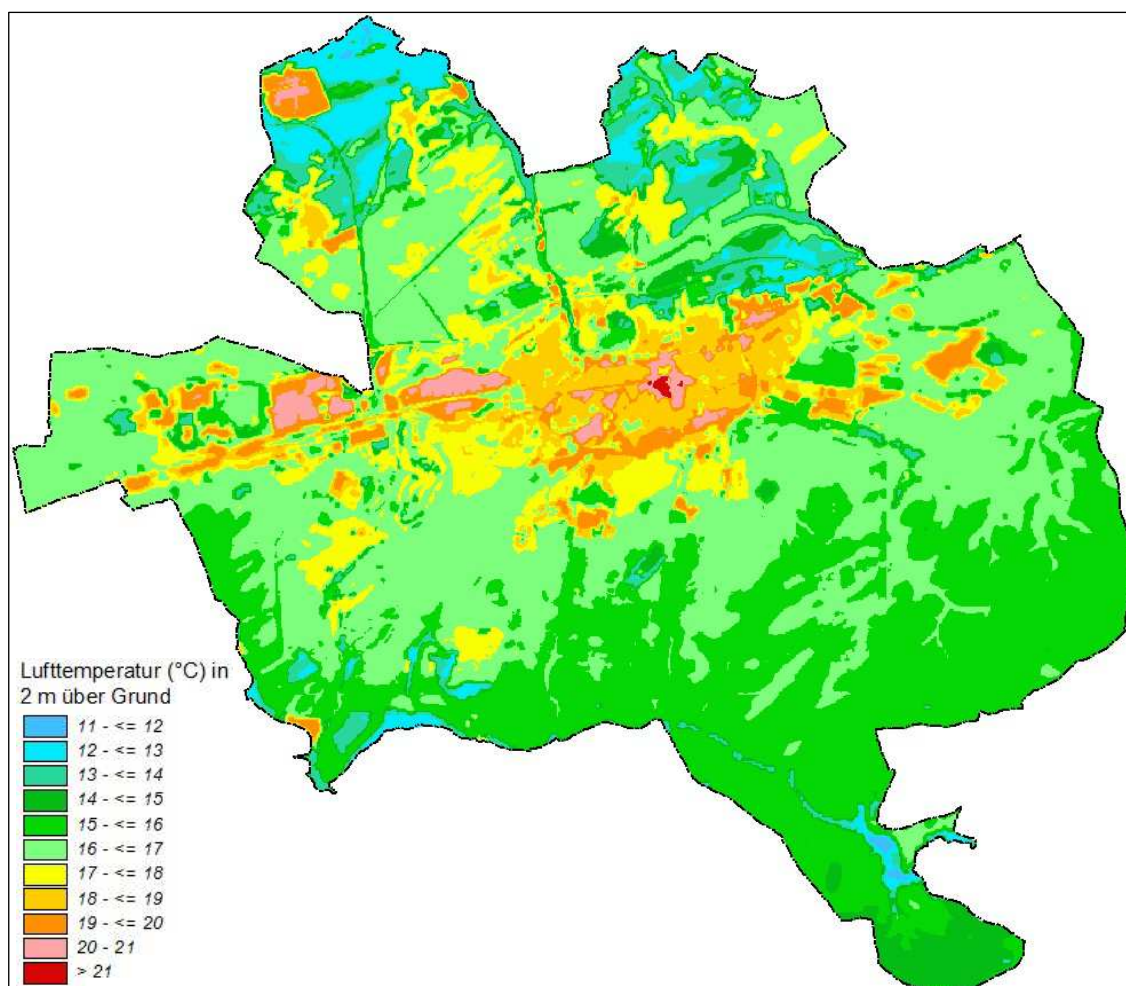


Abb. 9: Temperaturfeld zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2 m ü. Grund)

Über den weiteren, kleineren Grünflächen im Innenstadtbereich sinkt die Temperatur nur noch selten auf weniger als 16°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.

## Lufttemperatur - Beispiel Kaiserslautern-Nordost/Rotenberg

Das Beispielgebiet Kaiserslautern-Nordost mit dem Rotenberg zeigt Abb. 10 mit Blickrichtung aus Süden. Das auf das (überhöht dargestellte) Geländemodell projizierte Temperaturfeld für den bodennahen Bereich bis 2 m Höhe stellt die Kaltluftentstehungsflächen in blauer Farbe dar. Über unbewaldetem Freiland können diese in der zweiten Nachthälfte bis auf etwa 13°C zurückgehen.

Die stärkste Abkühlung ist über der Abdachung des Hinteren Rotenbergs zu beobachten (dunkelblaue Farbe). Ähnliche Temperaturen sind auch über dem Vorderen Rotenberg sowie Kaiserberg anzutreffen. Im Umfeld des Baalborner Wegs setzen sich die niedrigen Temperaturen mit den auftretenden Kaltluftabflüssen weiter in Richtung auf die Mainzer Straße fort.

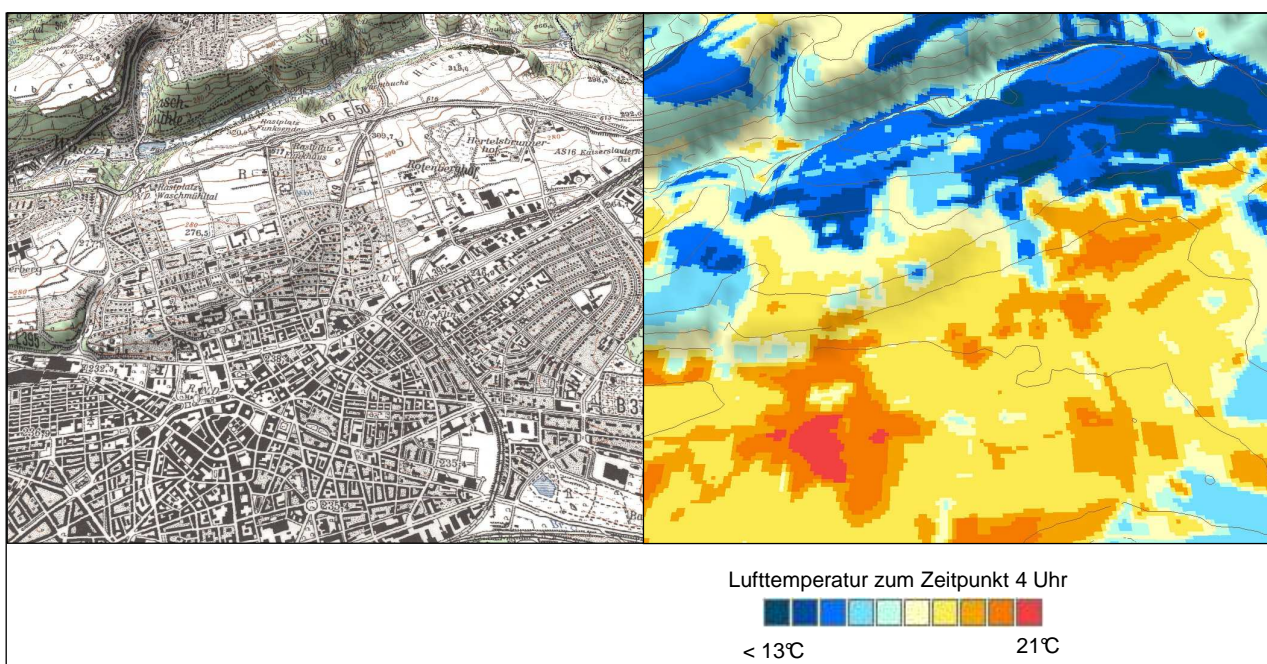


Abb. 10: Lufttemperatur in 2 m Höhe im Raum Kaiserslautern-Nordost (Hintergrund: TK 25 Blatt 6512)

Siedlungsflächen weisen dagegen insgesamt höhere Werte auf. In den eher peripheren, weniger dicht bebauten Bereichen wie der lockeren Wohnbebauung entlang der Alex-Müller-Straße ist ein Temperaturniveau von 17°C bis 18°C anzutreffen (Bei ge). Innerhalb der stark versiegelten Gewerbeflächen sowie dem Innenstadtbereich kann aufgrund des hohen Bauvolumens die Lufttemperatur bis zum frühen Morgen noch mehr als 20°C betragen (Orange/Rot). Zwischen dem Vorderen Rotenberg und dem Stadtzentrum lässt sich somit ein Temperaturgradient von bis zu 8 Kelvin (K) auf einer Entfernung von etwa 1000 m beobachten.

### 4.1.2 Autochthones Windfeld

#### Allgemeines:

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung.



So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. MOSIMANN et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt. Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen, und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 11). Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. KIESE et al. 1992).

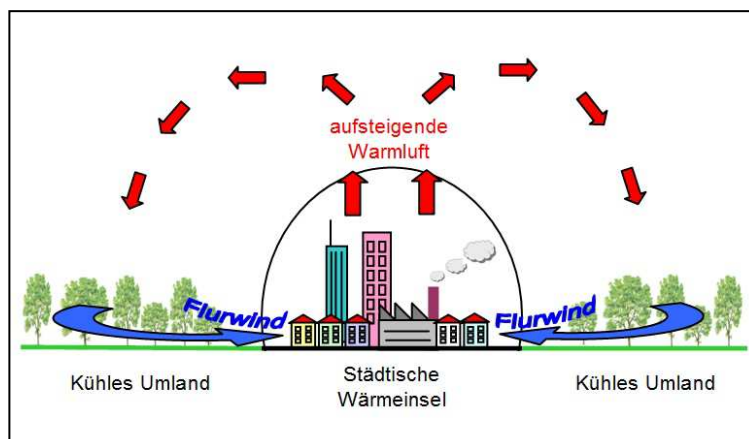


Abb. 11: Prinzipskizze Flurwind

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

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

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund 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 klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

### Ergebnisse Strömungsfeld:

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen. Die Ergebniskarte, welche im separaten Anhang enthalten ist, stellt das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld in zwei Ebenen dar. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung auf 100 m x 100 m Kantenlänge (entspricht 25

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 20 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  $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  über den ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im nördlichen Stadtgebiet Kaiserslautern. Abbildung 12 zeigt die räumliche Ausprägung der Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr als Raster im Stadtgebiet. Auftretende Hangneigungen mit deutlich mehr als  $1^\circ$  führen zu Kaltluftabflüssen, welche gegenüber den rein thermisch angetriebenen Flurwinden meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten aufweisen.

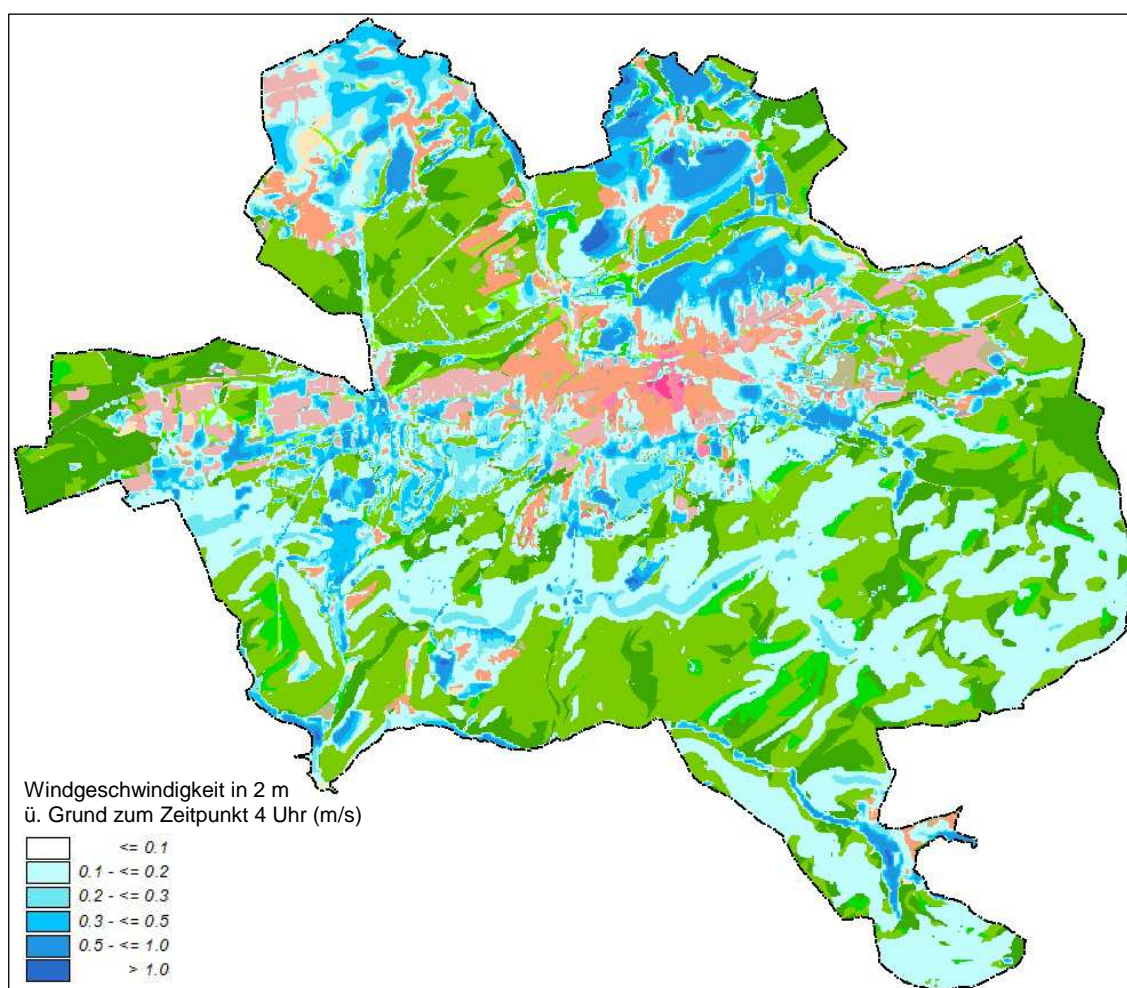


Abb. 12: Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Für den Kaltlufthaushalt der Stadt Kaiserslautern sind vor allem die angrenzenden bewaldeten Hangbereiche von Bedeutung. Dort werden große Kaltluftvolumina gebildet, welche aufgrund ihrer höheren Dichte hangabwärts fließen und dabei beschleunigt werden. Dabei entstehen vor allem in den größeren Talungen durch Kanalisierungseffekte Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu  $1,0 \text{ m/s}$ . Dahingehend zeichnen sich vor allem das **Lautertal** sowie das **Aschbachtal** deutlich ab. Aber auch über den an die Stadt angrenzenden, unbebauten Hängen im Bereich **Kaiserberg** und **Kaiserslautern-Ost** treten Kaltluftabflüsse mit überdurchschnittlich hohen Windgeschwindigkeiten von bis zu  $1,5 \text{ m/s}$  auf (Abb. 13). Über den Scheitelbereichen der Höhenzüge liegen hingegen die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten im Freiland

vor, da die Beschleunigung der Kaltluft hier einsetzt und sich erst über den Hängen verstärkt. Im Bereich von Kaltluftleitbahnen wie dem **östlichen Lautertal** oder dem Bereich **Baalborner Weg** liegen die Strömungsgeschwindigkeiten in einer Größenordnung von  $0,5$  bis  $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Hier wird das Eindringen von Kaltluft in den Siedlungskörper durch eine gering überbaute und grüne geprägte Oberflächenstruktur begünstigt.

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 wenig verdichtete Einzel- und Reihenhausbebauung besser durchströmt als eine Block- und Blockrandbebauung. Die Spanne der Eindringtiefe beträgt innenstadtnah zwischen  $500 \text{ m}$  entlang der Axel-Müller-Straße und bis zu  $150 \text{ m}$  im Bereich Lauterstraße/Burggraben (hellblaue Farbe - Abb. 13). Eindringtiefen von bis zu  $800 \text{ m}$  sind innerhalb von Leitbahnstrukturen wie z.B. dem Volkspark oder dem Hangeinschnitt am Baalborner Weg anzutreffen, da sie den Transport von Kaltluft in die Bebauung begünstigen. Hier ermöglichen intensive Kaltluftabflüsse auf den angrenzenden Hängen eine gute Durchlüftung des Siedlungsraums. Die vom Büro ÖKOPLANA (2007) für letztgenannten Bereich ermittelte Eindringtiefe bis zur Nordbahnstraße wird durch die Klimamodellierung wiedergegeben. Innerhalb der durchströmten Bebauung beträgt die Windgeschwindigkeit meist bei  $0,1 \text{ m/s}$  bis  $0,3 \text{ m/s}$ . Die Innenstadt an sich wird nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die hohe Bebauungsdichte und das hohe Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Die peripheren, z.T. dörflich strukturierten Stadtteile von Kaiserslautern weisen dagegen einen höheren Durchlüftungsgrad mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu  $0,4 \text{ m/s}$  auf.

### Kaltluftströmungsfeld - Beispiel Kaiserslautern-Nordost/Rotenberg

Den Bereich Rotenberg mit seinem näheren Umfeld zeigt Abb. 13, wobei das Strömungsfeld der Kaltluft als Pfeilsignatur und die Windgeschwindigkeit als flächenhaftes Raster für den Zeitpunkt 4 Uhr dargestellt sind. Im Rahmen der Klimaanalyse treten die Hangbereiche von Kaiserberg und Rotenberg sowie die benachbarten vegetationsgeprägten Areale als Kaltluft produzierende Freiflächen hervor. Die gebildete Kaltluft fließt dem Gefälle folgend ab und dringt unterschiedliche weit in die Bebauung ein.

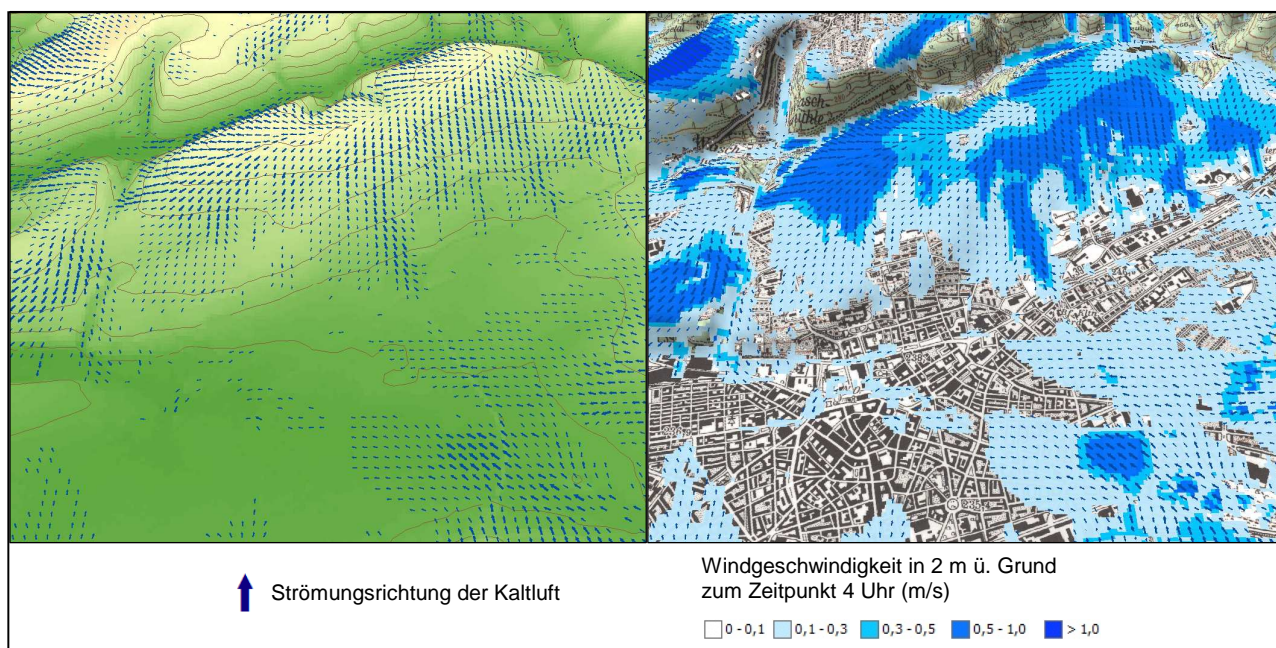


Abb. 13: 3D-Geländemodell mit Kaltluftabflüssen sowie Strömungsfeld und Windgeschwindigkeit im Raum Kaiserslautern-Nordost (Hintergrund: TK 25 Blatt 6512)

Vergleichsweise hohe Windgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s sind auch innerhalb von Leitbahnen wie dem Bereich Baalborner Weg anzutreffen, wo die Verengung des Fließquerschnittes eine Kanalisierung der Kaltluft bewirkt (dunkelblaue Farbe). Ansonsten liegen verbreitet Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,1 m/s und 1 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.

#### 4.1.3 Kaltluftvolumenstrom

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

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. 3.3.1 (S. 13) dargestellten Klassifizierung des Volumenstroms innerhalb von Grünflächen ab. Die qualitative Bewertung dieser meteorologischen Größe zeigt Tab. 4.

| Bewertung | Kaltluftvolumenstrom<br>in m <sup>3</sup> /s |
|-----------|--|
| Sehr hoch | > 900  |
| Hoch      | 900 bis ≥ 700                                |
| Mäßig     | 700 bis ≥ 550                                |
| Gering    | < 550  |

Tab. 4: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Ausgehend vom der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mehr als 550 m<sup>3</sup>/s angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen sehr geringen bis geringen Volumenstrom aufweisen. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des Strömungsfeldes einher, weshalb auf eine gesonderte Ergebnisbeschreibung verzichtet wird.

## 4.2 Ermittlung der lufthygienischen Belastung durch die Quellgruppen Verkehr und Gewerbe

Die im Rahmen der vorliegenden Klimaanalyse durchgeführte lufthygienische Untersuchung wurde ebenfalls mit dem Modell FTNAH durchgeführt, wobei zum Einen die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene windschwache Sommernacht betrachtet wurde. Dabei wurden die Stickstoffdioxid-Emissionen (NO<sub>2</sub>) aus dem Straßenverkehr mit dem Strömungsfeld, das sich im Laufe einer sommerlichen Strahlungsnacht ausbildet, verdriftet. Zum Anderen wurde auch die „mittlere“ Situation für den Verlauf eines ganzen Jahres im Hinblick auf den Jahresmittelwert gemäß 39. BImSchV (2010) modelliert. Die städtische Hintergrundbelastung wurde in beiden Szenarien durch die gewerblichen NO<sub>2</sub>-Emissionen ergänzt.

Bei der Interpretation der vorliegenden Modellergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Simulationen, bedingt durch die Ausdehnung des Beurteilungsgebietes, mit einer horizontalen Auflösung von 20 m durchgeführt wurden und größere Strömungshindernisse wie z.B. Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst wurden. Die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften im Untersuchungsgebiet gehen durch die Definition von sogenannten Nutzungsklassen in die Modellierung ein, die einen durchschnittlichen Versiegelungsgrad beschreiben. Darüber hinaus wurde jeder Rasterzelle eine mittlere Rauigkeit zugewiesen (siehe auch Kapitel 2). Bei der Bewertung der Modellergebnisse muss bedacht werden, dass durch diese Parametrisierung und trotz der Verwendung hochauflösender Laserscanner-Daten zur Oberflächenstruktur kleinräumige Sondersituationen innerhalb der angewandten Rasterauflösung nicht wiedergespiegelt werden können. Die Immissionsbelastung wird im Rahmen der eingesetzten Methodik vor allem durch Verkehrsmenge, Fahr situation und die durch das Relief beeinflusste Kaltluftabflüsse bestimmt. Im Mittelpunkt der vorliegenden Ausbreitungsrechnungen steht somit einerseits die Ausweisung der flächenhaften Belastungssituation für eine austauscharme nächtliche Wetterlage wie sie in der Klimafunktions- und Planungshinweiskarte dargestellt ist. Andererseits trägt die Berechnung des Jahresmittelwertes für die Komponente NO<sub>2</sub> zur Bestimmung weiterer möglicher Belastungsschwerpunkte für verkehrsbezogene Immissionen bei.

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 windschwache 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.

### 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 3.1 (UBA 2010),
- Auslastungsgrad der Straßenabschnitte,

➤ Längsneigung der Straßenabschnitte.

Den Emissionsberechnungen liegen Daten des aktuellen Verkehrsmodells für die Stadt Kaiserslautern (Stand Februar 2012) zu Grunde. Das Verkehrsmodell wurde von dem Büro FIRU Gfl - Gesellschaft für Immissionsschutz mbH aus Kaiserslautern übergeben, welches die Verkehrsdaten für die Bearbeitung der Lärmkartierung eingesetzt hat. 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 3.1 (UBA 2010) die Emissionsraten für Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) als lufthygienische Leitkomponente für verkehrbedingte Emissionen ermittelt. Entsprechend der örtlichen Gegebenheiten werden die Emissionsfaktoren für das Bezugsjahr 2010 bestimmt und gemäß den Verkehrsmengen zu tatsächlichen Emissionen verrechnet. Neben der verkehrsbedingten Luftbelastung stellen die Emissionen aus Gewerbe und Industrie eine weitere Quelle dar. Um deren Beitrag zur städtischen Hintergrundbelastung berücksichtigen zu können, wurden die Emissionserklärungen der genehmigungsbedürftigen Anlagen im Stadtgebiet Kaiserslautern (Bezugsjahr 2008) herangezogen und gemeinsam mit den verkehrsbürtigen Emissionen zu einer Gesamtbelastung verrechnet.

Die berechneten Emissionen wurden in das Geodatenbankumfeld des Straßenverkehrsnetzes überführt und in ein für das Simulationsmodell FITNAH geeignetes Raster mit einer Zellengröße von 20 m x 20 m überführt. Die Emissionshöhe beträgt 0,5 m über Grund. Das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht betreibt in Kaiserslautern am Rathaus sowie am Marienplatz Luftmessstationen, welche kontinuierlich die Konzentration relevanter Luftschadstoffe aufzeichnen. Somit stehen gemessene Werte zur Verfügung, mit denen die modellierten Immissionen validiert werden können. Die im Rahmen der Modellrechnung angesetzte regionale Grundbelastung orientiert sich an der Station Pfälzerwald-Hortenkopf. Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die bodennahe Schicht der Atmosphäre (= 2 m über Grund), die mit dem Aufenthaltsbereich des Menschen gleichzusetzen ist. Im Folgenden wird auf die Ausprägung der Immissionen eingegangen, welches die relevanten Hot-Spots mit einschließt. Die Ergebniskarten für den Gesamttraum sind dem Anhang beigefügt.

#### 4.2.1 Mittlere Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ )-Immission

Der Untersuchungsraum wird hinsichtlich der Immissionen vor allem durch den Verlauf der in West-Ost-Richtung durch das Stadtgebiet verlaufenden Hauptverkehrsachsen charakterisiert. Im Immissionsfeld zeichnen sich dabei deutlich sichtbare Belastungsschwerpunkte entlang des Hauptstraßennetzes ab. Zu den Straßen mit einer überdurchschnittlich hohen Verkehrsdichte und damit verbundenen Emissionen zählen vor allem die folgenden Abschnitte:

- Verlauf der Autobahn A6 mit bis zu 53 900 Kfz/Tag
- Bundesstraße 270 (bis zu 52 700 Kfz/Tag)
- Mainzer Straße (bis zu 38 400 Kfz/Tag)
- Lauterstraße (bis zu 30 300 Kfz/Tag)
- Brandenburger Straße (bis zu 29 400 Kfz/Tag)
- Spittelstraße (bis zu 23 300 Kfz/Tag)

Im Jahresmittel wird das NO<sub>2</sub>-Immissionsfeld deutlich durch die Emissionen der A 6 mit einem Verkehrsaufkommen von mehr als 50.000 KFZ pro Tag geprägt.

Dementsprechend sind hohe NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Überschreitungen des Jahresimmissionswertes gemäß 39. BImSchV (2010) bzw. TA Luft (2002) von mehr als 40 µg/m<sup>3</sup> im Nahbereich der Autobahn 6 zu beobachten. Abbildung 14 zeigt die lufthygienische Situation für einen Ausschnitt der Innenstadt.

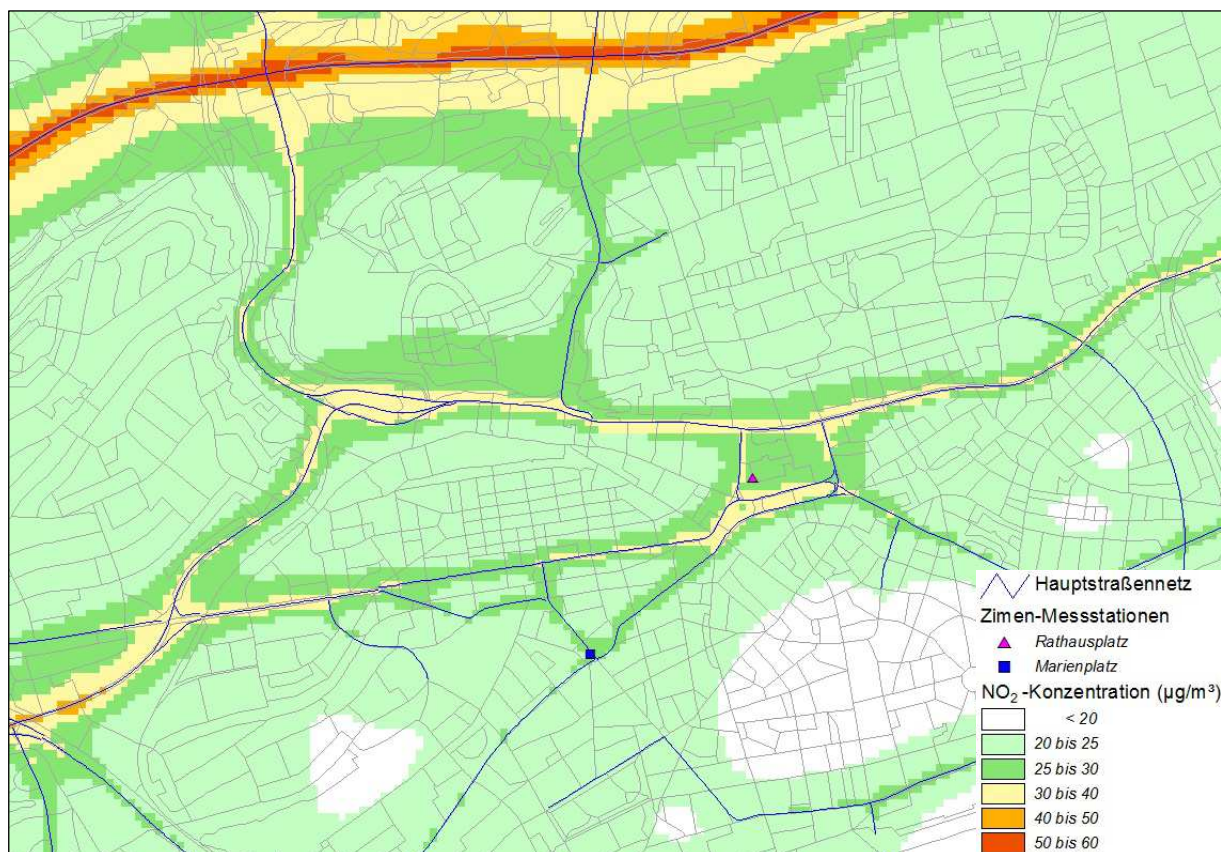


Abb. 14: NO<sub>2</sub>-Immissionsfeld im Bereich Innenstadt/Rotenberg (Jahresmittelwert)

Hohe Konzentrationen mit Überschreitungen des Jahresimmissionswertes wurden aber ebenso in einzelnen Abschnitten von Straßen mit Verkehrsbelastungen von mehr als 35.000 Fahrzeugen pro Tag berechnet. Dies betrifft die westliche Pariser Straße sowie einen Abschnitt der Mainzer Straße zwischen Donnersbergstraße und dem Autobahndreieck Kaiserslautern. Erhöhte Konzentrationen im Straßenraum von 30 µg/m<sup>3</sup> bis 40 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> treten weiterhin in Abschnitten der Ludwigstraße, Burgstraße, Pariser Straße sowie im weiteren Verlauf der Mainzer Straße auf. Innerhalb des übrigen Hauptstraßennetzes bewegen sich die Immissionswerte auf einem niedrigeren Niveau zwischen 20 µg/m<sup>3</sup> und 30 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>. Am Standort der ZIMEN-Messstation Rathausplatz steht der im Jahr 2010 gemessenen durchschnittlichen NO<sub>2</sub>-Konzentration von 26 µg/m<sup>3</sup> ein berechneter Wert von 28 µg/m<sup>3</sup> gegenüber. An der Station Marienplatz wird der gemessene Wert von 30 µg/m<sup>3</sup> mit modellierten 27 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> dagegen leicht unterschätzt.

#### 4.2.2 Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)-Immission während austauscharmer Wetterlagen

Die Ergebnisse charakterisieren sowohl hinsichtlich der Immissionen als auch der Wetterlage eine „Worst-Case“-Situation, so dass das Immissionsfeld in einer ersten Näherung mit der Kurzzeitbelastung verglichen werden kann. In diesem Szenario ist von einer überdurchschnittlichen Belastungssituation auszugehen, da die atmosphärischen Verdünnungsprozesse nicht durch die übergeordnete Strömung sondern vor allem

durch kleinräumig wirksame Prozesse erfolgen. Diese Windsysteme bilden sich, angetrieben durch die strukturbedingten Temperaturunterschiede, zwischen bebauten und unbebauten Flächen aus (vgl. Kap. 4.1.2). Das Immissionsfeld wird somit ausschließlich durch die Emissions-situation und die eigenbürtigen aus dem Umland bzw. Stadtraum entstehenden Strömungssystemen geprägt. Die  $\text{NO}_2$ -Immission im Innenstadtbereich ist in Abb. 15 dargestellt, wobei zur Verdeutlichung das aggregierte Strömungsfeld in einer 100 m x 100 m Auslösung mit abgebildet ist.

Hohe Verkehrszahlen mit entsprechenden Emissionen einerseits und eingeschränkter Luftaustausch andererseits begünstigen das Auftreten von Belastungen. Ausgehend von der räumlichen Verteilung der Verkehrsmengen ergeben sich im Stadtgebiet Kaiserslautern mehrere Belastungsschwerpunkte. Dabei ist vor allem die Autobahn A 6 hervorzuheben, wo im Nahbereich des Straßenraums  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen von bis zu  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anzutreffen sind. Überdurchschnittlich hohe Werte bis zu  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  sind im Verlauf der Bundesstraße 270 im Umfeld des Opelkreises zu beobachten. Da die Verfrachtung der Immission in die Siedlungsflächen hinein durch den kleinräumigen Luftaustausch mitbestimmt wird, können, ausgehend vom Straßenraum,  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen von mehr als  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bis zu 500 m weit verfrachtet werden. Die Immissions-situation während einer windschwachen Sommernacht zeigt Abb. 15 für einen Ausschnitt der Innenstadt.

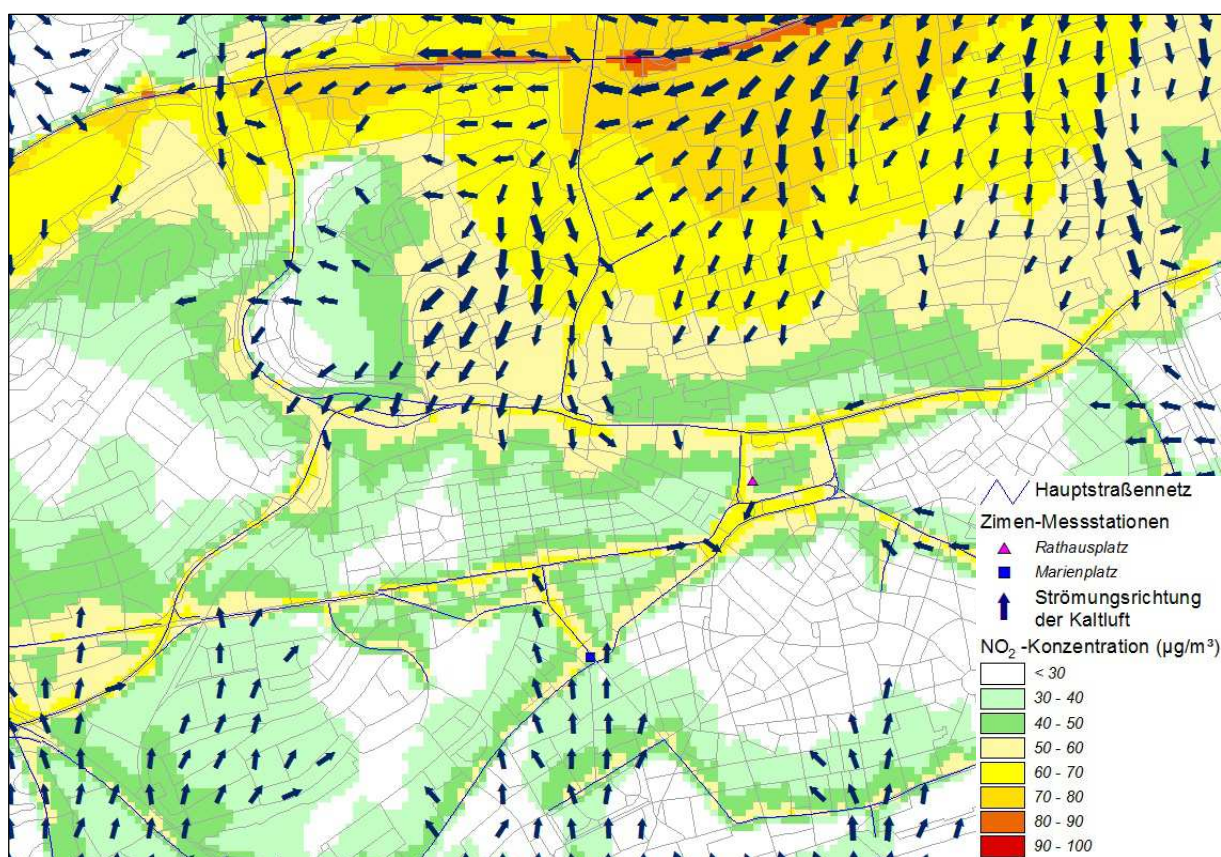


Abb. 15:  $\text{NO}_2$ -Immissionsfeld im Bereich Innenstadt/Rotenberg (austauscharme Wetterlage)

Dabei zeigt sich die Verdriftung der innerhalb der A 6 freigesetzten Immissionen mit den hangabwärts gerichteten Kaltluftabflüssen (orange/gelbe Farbe). Ein ähnlicher Effekt ist, wenn auch etwas schwächer ausgeprägt, entlang der Pariser und Mainzer Straße zu beobachten. Immissionswerte bis  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sind zudem in Abschnitten von Lauterstraße, Spittelstraße sowie Maxstraße zu beobachten. Innerhalb der Siedlungsräume betragen die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im innenstadtnahen Bereich meist zwischen  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  und gehen ansonsten auf unter  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zurück.



In den übrigen Straßenabschnitten des gezeigten Ausschnitts betragen die NO<sub>2</sub>-Immissionen weniger als 60 µg/m<sup>3</sup>.

Für die Klimafunktionskarte sind in einem weiteren Bearbeitungsschritt alle Areale mit einer NO<sub>2</sub>-Konzentration > 60 µg/m<sup>3</sup> erfasst und als lufthygienischer Belastungsbereich mit einer einheitlichen Signatur dargestellt worden. Dabei stehen weniger die absoluten Werte im Vordergrund als vielmehr die grundsätzliche räumliche Ausprägung der lufthygienisch belasteten Räume.

Da sich die Ergebnisse hinsichtlich der angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen an die Kurzzeitbelastung der 22. BImSchV (2002) annähern, sind die modellierten Werte am ehesten mit den Messergebnissen des 98-Perzentils an den ZIMEN-Stationen vergleichbar. Das ist der Konzentrationswert eines Schadstoffs, der in einem Jahr höchstens an 2% der Messzeiten (98 Perzentil) überschritten wird und häufig mit windschwachen bzw. austauscharmen Wetterlagen einhergeht.

Während an der Station Rathausplatz ein 98-Perzentil von 63 µg/m<sup>3</sup> für das Jahr 2010 gemessen wurde, konnte dort durch die Modellrechnung ein Wert von 53 µg/m<sup>3</sup> ermittelt werden. Der Durchschnitt der Jahre 2005 bis 2010 liegt bei 66 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>. Am St. Marienplatz steht den gemessenen 71 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> ein berechneter Wert von 55 µg/m<sup>3</sup> gegenüber, wobei das Mittel der Jahre 2005 bis 2010 71 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> beträgt. Unter den angenommenen windschwachen Rahmenbedingungen unterschätzen die vorliegenden Ergebnisse damit die an den Messstationen verzeichneten Werte, geben aber die Relation der Werteausprägung zwischen den Standorten wieder. Damit zeigt sich, dass die lokale Immissionsituation durch die Modellrechnung adäquat abgebildet wird.

## 5 Klimaökologische Funktionen

Im Folgenden wird auf die Klimafunktionskarte als Hauptergebnis dieser Untersuchung eingegangen. Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Stadtgebiet Kaiserslautern zugrunde. Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld sowie die lufthygienische Belastung durch verkehrsbezogene Schadstoffe modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (**Wirkungsraum**) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (**Ausgleichsräume**). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinander grenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (**Luftleitbahnen**) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des **Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges** im Stadtgebiet Kaiserslautern. 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 basiert auf der Analyse des klimatischen Ist-Zustandes in Kaiserslautern. Dabei konzentriert sich die Darstellung auf Elemente und Bereiche, die sich über landschaftsplanerische Maßnahmen positiv beeinflussen lassen (Maßnahmen zum Schutz, zur Sicherung und zur Entwicklung der Schutzgüter Klima und Luft). Somit steht ein Instrument zur Beurteilung von klimatischen Beeinträchtigungen bereit, die bei einer Nutzungsänderung auftreten können. Darüber hinaus stellt sie die Grundlage für ein räumliches Handlungskonzept für den Bereich Klima/Luft in der Landschaftsplanung bereit. Der Aufbau der Kartenlegende folgt dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, wobei im Folgenden auf die Inhalte eingegangen wird.

### 5.1 Grün- und Freiflächen

Vegetationsbestandene Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion stellen klima- und immissionsökologische Ausgleichsräume dar. Eine hohe langwellige nächtliche Ausstrahlung während austauscharmer Hochdruckwetterlagen führt zu einer starken Abkühlung der bodennahen Luftschicht. Aufgrund der Reliefsituation mit entsprechenden Hangneigungen dominieren in Kaiserslautern vorwiegend Kaltluftabflüsse. Die Gesamtfläche der Kaltluft produzierenden Grünflächen beziffert sich auf etwa 11 092 Hektar, was einem Flächenanteil von rund 79 % des Stadtgebietes entspricht.

Dabei werden vor allem die Hangbereiche als Zonen einer *sehr hohen bis hohen Kaltluftlieferung* sichtbar. Dies ist auf die intensiven Kaltluftabflüsse zurück zu führen, die mit entsprechenden Kaltluftvolumina einhergehen. Als bedeutsame Freifläche mit hoher Kaltluftlieferung und Bezug zur Kaiserslauterer Innenstadt ist der Kaiserberg und der östlich angrenzende Hinterer Rotenberg hervorzuheben. Neben dem direkten Einströmen der Kaltluftabflüsse in die Bebauung dienen hier auch die Bereiche des Baalborner Weg und Wartenberger Weg als Leitbahnen und ermöglichen ein Vordringen der abfließenden Kaltluft in das

nordöstliche Stadtgebiet. Mit einer Gesamtfläche von ca. 1 040 ha für die sehr hohe und 3 007 ha für die hohe Kaltluftlieferung beträgt der Flächenanteil dieser Kategorie an der Gesamtgrünfläche ca. 9 % bzw. 27%.

Die Ausgleichsleistung von Flächen, die eine *mittlere Kaltluftlieferung* aufweisen, ist ebenfalls als klimaökologisch relevant einzuschätzen. Dies betrifft sowohl die angesprochenen Hangbereiche als auch Grünflächen im innenstadtnahen Bereich wie z.B. der Japanische Garten oder der Stadtpark. Diese Flächen können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den jeweiligen klimatischen Einwirkbereich vergrößern. Die Flächensumme dieser mittleren Kategorie beträgt ca. 6 604 Hektar, was einem Anteil von ca. 60 % an der Gesamtgrünfläche entspricht.

Grünflächen, die durch eine *geringe Kaltluftlieferung* charakterisiert sind, haben mit 439 Hektar einen Anteil von lediglich ca. 4 % am Grünflächenbestand. Flächenhaft tritt das geringe Wertenniveau vor allem im Westen des Stadtgebietes im Bereich Einsiedlerhof auf. Des Weiteren handelt es sich vor allem um die kleineren innerstädtischen Parkareale, Friedhöfe und nicht überbauten Ruderalflächen mit einer Größe von wenigen Hektar. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkbereich aus, da sie in eine insgesamt wärmere Bebauung eingebettet sind. Durch die isolierte Lage in der Bebauung weisen sie zudem keine Anbindung an vorhandene Leitbahnen auf.

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. Tabelle 5 fasst die ausgewiesenen Kategorien zusammen:

| Kaltluftlieferung | Gesamtgröße der Klasse in Hektar | Anteil am Grünflächenbestand |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Sehr hoch         | 1.040                            | 9 %                          |
| Hoch              | 3.007                            | 27 %                         |
| Mittel            | 6.604                            | 60 %                         |
| Gering            | 439                              | 4 %                          |

Tab. 5: Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Kaiserslautern

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

## 5.2 Siedlungsräume

Wie in Kap. 3.3.2 (S. 15) 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. 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. 53 % des Siedlungsraums mit Kalt-/Frischlufte versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen.

Abbildung 16 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte die Belastungssituation im Innenstadtbereich von Kaiserslautern, wobei belastete Bereiche orange und magenta gekennzeichnet sind (*weniger günstig* und *ungünstig*). Andererseits treten u.a. die Bereiche Volkspark, Bremerstraße und Baalborner weg als Leitbahnen hervor (blaue Pfeile). Sie kennzeichnen Bereiche, wo die Kaltluftströmung kanalisiert wird und somit eine Leitbahnfunktion vorliegt. Die angrenzende Bebauung ist vorwiegend durch eine *geringe bioklimatische Belastung* gekennzeichnet. Neben einer ausreichenden Durchlüftung hängt die Belastungssituation aber auch vom Strukturtyp der Bebauung und damit vom Überwärmungsgrad ab. Dieser ist bei einer Einzel- und Reihenhausbauung mit einem vergleichsweise geringen Versiegelungsgrad von 40 % am geringsten ausgeprägt. Daher weist ein Großteil der peripheren Stadtteile wie Waschhof *günstige* bis *sehr günstige* Bedingungen auf.

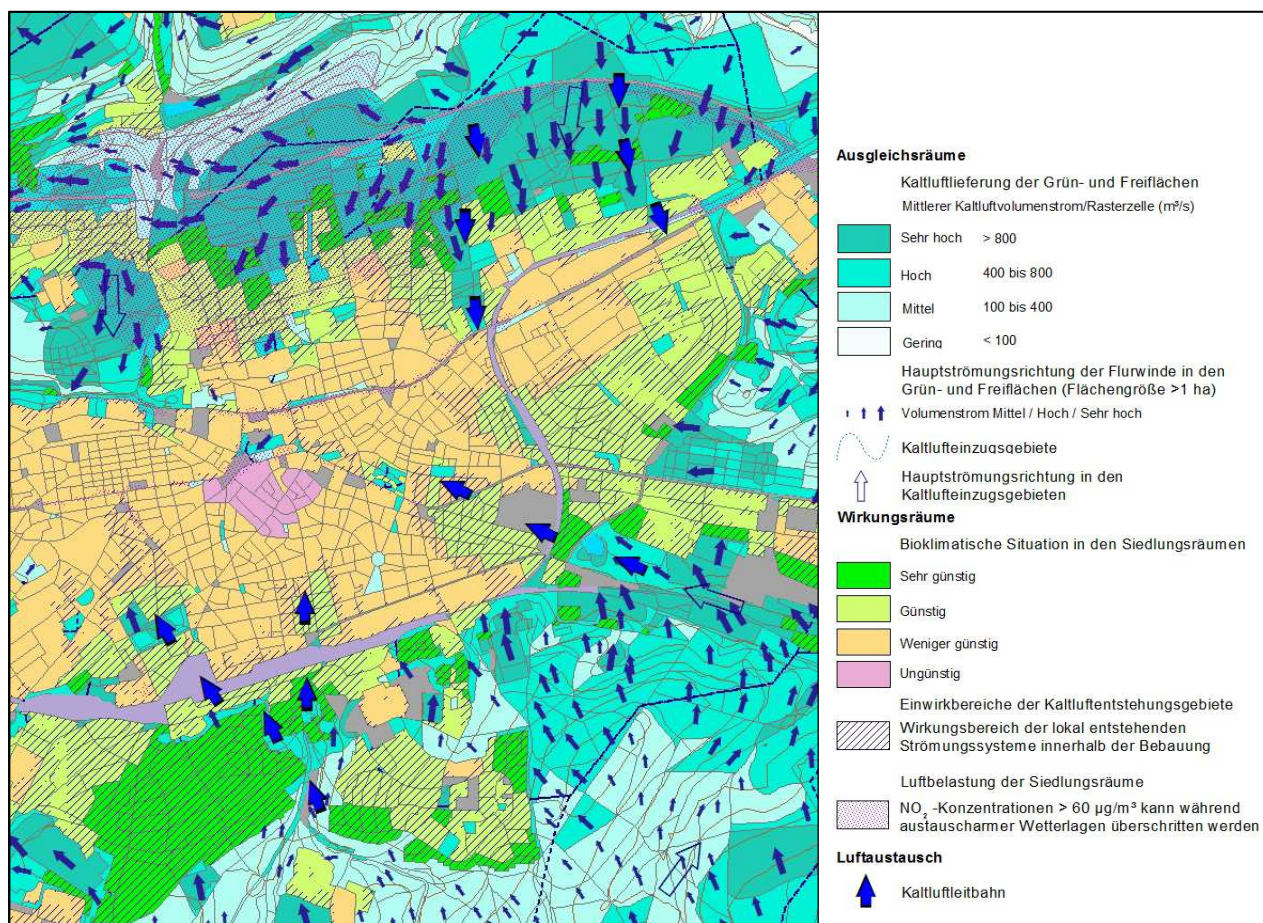


Abb. 16 Klimafunktionen im Raum Kaiserslautern-Ost

Die Reichweite einer Kaltluftströmung in die Bebauung hängt vor allem vom Ausmaß der Kaltluftdynamik ab. Sie ist bei Kaltluftabflüssen mit Bezug zu großräumigen Kaltluftentstehungsflächen im Umland am intensivsten. Darüber hinaus spielt auch die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle. Diese ist bei einer Einzel- und Reihenhausbauung vergleichsweise gering ausgeprägt und bei einer innenstadtnahen Zentrumsbebauung sowie Gewerbegebieten mit höherem Überbauungsgrad und Strukturhöhe am stärksten. Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt, abhängig von der Bauungsstruktur, zwischen ca. 150 m und bis zu 700 m. In den peripheren, vergleichsweise gering überbauten Ortsteilen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum, so dass hier meist günstige bioklimatische Bedingungen vorliegen.

Diesen Gunsträumen stehen die o.g. Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Im Stadtzentrum Kaiserslautern dominiert eine *Belastungssituation*, die aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung resultiert. Diese Belastung geht mit zunehmender Entfernung von der Innenstadt auf ein mäßiges Niveau zurück. Außerdem treten auch die größeren Gewerbe- und Industrieareale im Stadtgebiet mit einer Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie Teilbereiche der Innenstadt aufweisen. Dies betrifft vor allem die Gewerbegebiete im Westen Kaiserslauterns.

Die Darstellung der *Luftbelastung* (Quellgruppen Verkehr und Gewerbe) ergänzt das Spektrum auftretender Belastungen (vgl. Kap. 4.2 S. 24). Grundlage ist die durchgeführte Ausbreitungsrechnung für eine austauscharme Wetterlage, wie sie auch der Klimamodellierung zugrunde liegt. Es stellt ein Worst-Case-Szenario dar, da es unter diesen Bedingungen in Teilräumen zu Schadstoffakkumulationen kommen kann. Da unterschiedliche meteorologische Situationen das Ausbreitungsverhalten mit beeinflussen, sind die ermittelten Schadstoffkonzentrationen *nicht* als Jahresmittelwert anzusehen. Vielmehr wird an dieser Stelle eine Einzelsituation während einer Strahlungswetternacht mit geringen Windgeschwindigkeiten betrachtet. Die Ergebnisse entsprechen somit eher der Kurzzeitbelastung. Als lufthygienischer Belastungsbereich sind die Areale definiert, für die ein Konzentrationsniveau von mehr als  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) modelliert wurde. Dieses Niveau entspricht in etwa dem mittleren 98%-Wert der Jahre 2009 bis 2011 an der ZIMEN-Messstation Rathaus.

### 5.3 Luftaustausch

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. *Leitbahnen* sollten generell eine geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen und linear auf Wirkungsräume ausgerichtet sein. Grundsätzlich kommen Tal- und Auenbereiche, größere Grünflächen sowie Bahnareale als geeignete Strukturen in Frage. Im Rahmen der Klimaanalyse wurden insgesamt 6 Leitbahnen ausgewiesen, die sich im Kaltluftströmungsfeld mit überdurchschnittlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich abzeichnen:

- Bereich Baalborner Weg
- Bereich Wartenberger Weg
- Östliches Lautertal/Volkspark
- Bereich nördlich Hohenecken/5th Avenue
- Bereich Hohenecker Straße
- Bereich Bremerstraße

Zu einem Eintritt in die angrenzende Bebauung kommt es, wenn deren Struktur ein Eindringen der Kaltluft ermöglicht und der durch den Abfluss vorhandene Massenimpuls stark genug ist. Darüber hinaus 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 möglich ist.

## 6 Planungshinweiskarte Stadtklima

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

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

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

### Allgemeines zur siedlungsklimatische Rolle von Stadtgrün

Während über den von Wiese oder Acker geprägten Arealen am Tage durch die intensive Einstrahlung und dem Mangel an Verschattung ähnlich hohe Werte wie in den verdichteten Siedlungsflächen auftreten können, ist dort gleichzeitig in der Nachtsituation die stärkste Abkühlung zu erwarten. Hier kann einerseits in der Nacht eine ungehinderte (langwellige) Ausstrahlung verbunden mit starker Abkühlung der darüber lagernden Luftmasse erfolgen. Am Tage ist andererseits ein hoher (kurzwelliger) solarer Strahlungsintritt mit starker Erwärmung der Bodenoberfläche die Folge (vgl. Temperaturverlauf Abb. 7, S. 12).

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

Damit wird die unterschiedliche Bedeutung bzw. Bedeutung von Grünflächen am Tage bzw. in der Nacht deutlich. Einerseits sollen sie eine gute Aufenthaltsqualität am Tage gewährleisten, andererseits könne nächtliche Flurwinde die Wärmebelastung in den Siedlungsräumen lindern. Die Mindestgröße zur Ausbildung einer Kaltluftströmung lässt sich auf etwa 1 ha beziffern (SCHERER 2007). Abgesehen von der Flächengröße wird dies aber auch durch die grünplanerische Ausgestaltung mitbestimmt. Sofern ein bedeutsamer Luftaustausch durch Flurwinde stattfinden kann, sollte dieses (eigenbürtige) Luftaustauschsystem Grünfläche – angrenzende Bebauung und die damit verbundene klimaökologische Wohlfahrtswirkung aufrecht erhalten werden. In diesem Zusammenhang und in Bezug auf die nächtliche Kaltluftproduktion weist ein vorwiegend durch Wiese geprägter Flächentyp die besten Eigenschaften auf. Da auch von dichteren Vegetationselementen eine Hinderniswirkung für den Luftaustausch ausgehen kann,

sollte der Übergangsbereich zur Bebauung von Grünstrukturen wie dichten Baumgruppen, Gehölzen oder hohen Hecken weitestgehend frei gehalten werden. Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für den Bereich Kaiserslautern-Ost.

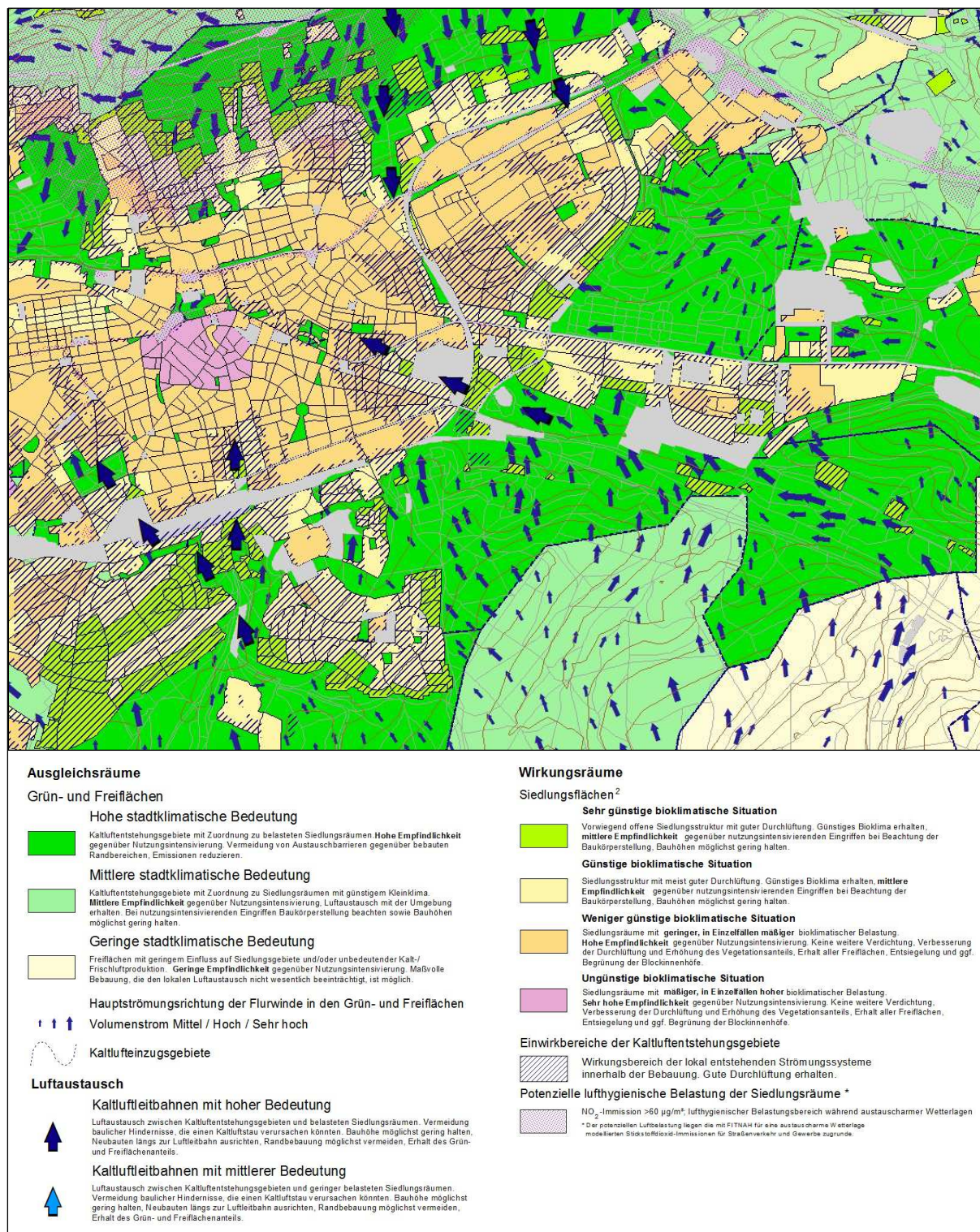


Abb. 17 Planungshinweise im Raum Kaiserslautern-Ost

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



sommerliche Strahlungswetterlage. Die Legende folgt dabei dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges.

## 6.1 Grün- und Freiflächen

Innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadtklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Aus größeren, zusammenhängenden Grünarealen ergibt sich somit das klimatische Regenerationspotenzial. Der produzierte Kaltluftvolumenstrom als qualifizierender Parameter tritt aber an dieser Stelle in den Hintergrund. Für die planerische Einordnung ist vielmehr die Lage im Raum entscheidend und damit die Frage, welche bioklimatische Belastung eine zugeordnete Bebauung aufweist. Denn letztendlich kann auch eine Grünfläche mit einer vergleichsweise geringen Kaltluftproduktion eine signifikante Wohlfahrtswirkung in stark überbauten Bereichen erbringen.

### Bilanzierung der Grünflächen für das Stadtgebiet Kaiserslautern

Eine **hohe stadtklimatische Bedeutung** erlangen die Grün- und Freiflächen mit Einfluss auf bioklimatisch belastete Siedlungsräume. Die Kernstadt Kaiserslautern ist als größter Wirkungsraum daher von Flächen dieser Kategorie umgeben. Als flächenmäßig größter Ausgleichsraum ist das Einzugsgebiet im Bereich Dansenberg/Hohenecken anzusprechen. Von den hier entstehenden Kaltluftabflüssen profitieren insbesondere die südwestlichen Stadtteile. Die Größe dieser Fläche beziffert sich auf etwa 480 Hektar. Das mit ca. 397 ha zweitgrößte Kaltluftentstehungsgebiet und einer hohen stadtklimatischen Bedeutung ist ebenfalls im Süden Kaiserslauterns lokalisiert. Dabei handelt es sich um die Freifläche im Raum Lämmchesberg/Betzenberg. Die hier entstehende Kaltluft ist sowohl für die südliche Kernstadt jenseits des Bahnhofs als auch die vorgelagerten Stadtteile relevant. Darüber hinaus befindet sich im Osten Kaiserslauterns das mit ca. 382 ha drittgrößte Kaltlufteinzugsgebiet. Dabei handelt es sich um den Bereich entlang der Mannheimer Straße, welcher durch den Langenberg im Norden und dem Rummelberg im Süden eingerahmt wird. Die übrigen Einzugsgebiete mit Bezug zur Kernstadt weisen meist Flächengrößen von weniger als 300 ha auf und haben durch die räumliche Nähe zu Belastungsbereichen eine ebenfalls hohe stadtklimatische Relevanz.

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

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

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

Grün- und Freiflächen, die einen Bezug zu Siedlungsräumen mit einem geringen Belastungsniveau oder sogar günstigem Kleinklima aufweisen, besitzen eine **mittlere stadtklimatische Bedeutung**. Sie sind zwar ebenfalls nahe des Stadtkörpers lokalisiert und haben Bezug zu den weniger bioklimatisch belasteten, meist peripheren Siedlungsräumen und eher dörflich strukturierten Ortsteilen. Für diese Flächen ergibt sich eine **hohe Empfindlichkeit** gegenüber einer Nutzungsintensivierung, bei der insbesondere der Luftaustausch mit der Umgebung berücksichtigt werden sollte.

Als dritte Kategorie werden Grün- und Freiflächen mit einer **geringen stadtklimatischen Bedeutung** ausgewiesen. Dabei handelt es sich um die übrigen siedlungsfernen Freiflächen, welche keinen nennenswerten Einfluss auf - belastete - Siedlungsbereiche ausüben. Dort wären bauliche Eingriffe, die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigen, nur mit **geringen klimatischen Veränderungen** verbunden. Tabelle 6 fasst die Flächenanteile der ausgewiesenen Kategorien für den gesamten Grünflächenbestand sowie den Anteil am Stadtgebiet Kaiserslautern zusammen:

| Bewertung | Anteil am Grünflächenbestand | Anteil am Stadtgebiet |
|-----------|------------------------------|-----------------------|
| Hoch      | 22 %                         | 17 %                  |
| Mittel    | 36 %                         | 28 %                  |
| Gering    | 42 %                         | 34 %                  |

Tab. 6: Bilanzierung der planerisch relevanten Grünflächen

Somit lassen sich ca. 22% des Grünflächenbestandes einer hohen planerischen Priorität zuordnen, während 36% eine mittlere Bedeutung aufweisen. Den mit 42% höchsten Anteil machen die Grün- und Freiflächen mit einer geringen Bedeutung aus, da sie aufgrund ihrer Randlage eine geringe Relevanz für Siedlungsflächen aufweisen.

## 6.2 Siedlungsräume

Das Stadtgebiet zeichnet sich durch eine heterogene Bebauungsstruktur 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 einer wirksamen Kaltluftströmung gekennzeichnet.

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

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

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

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** (mäßig bis hoch belastet) bzw. die **höchste Empfindlichkeit** (hoch bis sehr hoch belastet) auf.

### 6.3 Luftaustausch

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. **Kaltluftleitbahnen** sollten generell eine geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen, wobei gehölzarme Tal- und Auenbereiche, größere Grünflächen und Bahnareale als geeignete Strukturen in Frage kommen. In diesem Zusammenhang dienen Leitbahnen im Stadtgebiet Kaiserslautern vor allem für die Zufuhr von Kaltluft aus dem stadtnahen Umland. Dabei wurden, analog zu den Kaltluftentstehungsgebieten, Kaltluftleitbahnen mit einer hohen sowie einer mittleren Planungspriorität ausgewiesen. In Rahmen der Klima- und Windfeldmodellierung sind die in Kap. 5.3 genannten Leitbahnen ermittelt worden.

Für alle Leitbahnen gelten die folgenden Planungshinweise:

- Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten
- Bauhöhe möglichst gering halten
- Neubauten parallel zur Kaltluftströmung ausrichten
- Randbebauung möglichst vermeiden
- Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils

Von den ausgewiesenen Leitbahnen besitzt der Bereich nördlich von Hohenecken/5th Avenue eine **mittlere Bedeutung**, da sie vergleichsweise gering belasteten Siedlungsflächen zugeordnet ist. Die übrigen Leitbahnen besitzen durch die Zuordnung zu Belastungsbereichen eine **hohe planerische Bedeutung**.

## 6.4 Nutzungshinweise für die Bauleitplanung

Die Planungshinweiskarte 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 aber grundsätzlich vermieden werden. Sind dennoch konkrete Eingriffe vorgesehen, können entsprechende zu berücksichtigende Maßnahmen aus der jeweiligen Empfindlichkeit im Plangebiet abgeleitet werden, gleiches gilt für die Siedlungsflächen. Sämtliche Aspekte sind zusammenfassend in Tab. 7 dargestellt und lassen sich über die Farbe in der Planungshinweiskarte verorten.

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

Tab. 7: Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen

Mit der durchgeführten Analyse der klima- und immissionsökologischen Funktionen stehen flächendeckend aktuelle Informationen zu den Schutzgütern Klima und Luft für das gesamte Stadtgebiet Kaiserslautern zur Verfügung. Damit wird eine fundierte klimatisch-lufthygienische Ersteinschätzung von Planungsvorhaben ermöglicht und kann anschließend in die Detailplanung von Flächennutzungsänderungen einfließen.

### Allgemeine Maßnahmen zur Verringerung der Wärmebelastung im Siedlungsraum

Während am Tage die direkte, kurzweilige Strahlung der Sonne wirksam ist, geben nachts Bauwerke und versiegelte Oberflächen die tagsüber gespeicherte Energie als langweilige Wärmestrahlung wieder ab.

Durch die Verringerung des Wärmeinputs am Tage wird gleichzeitig weniger Strahlungsenergie in der Baumasse gespeichert und in der Nacht auch weniger Wärme an die Luft abgegeben. Die für die belasteten Bereiche abzuleitenden Hinweise zielen deshalb vor allem darauf ab, einerseits durch zusätzliche Verschattung die Aufenthaltsqualität im Freien zu steigern und andererseits den Gebäudebestand hitzeangepasst zu gestalten:

- Keine weitere Verdichtung der Bebauung und gleichzeitige Erhöhung des Vegetationsanteils
- Erhalt aller Freiflächen
- Entsiegelung von Blockinnenhöfen und Straßenraum
- Straßenbäume erhalten und Lücken schließen
- Verbesserung der wohnungsnahen Grünflächenversorgung

Zudem lässt sich über die Verwendung von hellen Baumaterialien die Reflexion des Sonnenlichtes (Albedo) erhöhen, so dass ebenerdig versiegelte Flächen oder auch Fassaden stärker zurückstrahlen. Dadurch bleiben sie 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 isolierend und verringert damit das Aufheizen darunter liegenden Wohnraums. Zudem senkt die Dachbegrünung die Oberflächentemperatur des Daches aufgrund der Verdunstung von Wasser ab und verringert die Temperatur in der oberflächennahen Luftschicht. Voraussetzung dafür ist allerdings ein ausreichendes Wasserangebot für die Vegetation. Sollte bei längeren Hitzeperioden die Vegetation austrocknen, steigen die Temperaturen wieder auf das Niveau eines normalen Daches an und können sogar darüber hinaus gehen. Der Kühlungseffekt für die Innenräume bleibt dabei aber erhalten. Im Winter isoliert ein Gründach zusätzlich und kann zur Senkung des Heizbedarfes beitragen. Ein weiterer Vorteil von Dachbegrünung ist im Retentionsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird.

## 7 Fazit

Die vorliegende Untersuchung hat die klimaökologischen Funktionszusammenhänge im Stadtgebiet Kaiserslautern während austauscharmer, sommerlicher Hochdruckwetterlagen dargelegt. Durch die Zufuhr von frischer und kühlerer Luft können klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistungen für die Belastungsräume erbracht werden. In diesem Rahmen sind bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume einerseits sowie entlastende, Kaltluft produzierende Flächen andererseits ausgewiesen worden. Insgesamt gesehen ist das klimatische Ausgleichspotenzial der umgebenden Freiflächen als hoch anzusehen. Jedoch weisen Teilräume des Untersuchungsgebietes ein erhöhtes bioklimatisch-lufthygienisches Belastungspotenzial in der Nacht auf (Abb. 18). Eine Flächenbilanzierung der vorliegenden Belastungsklassen ergibt:

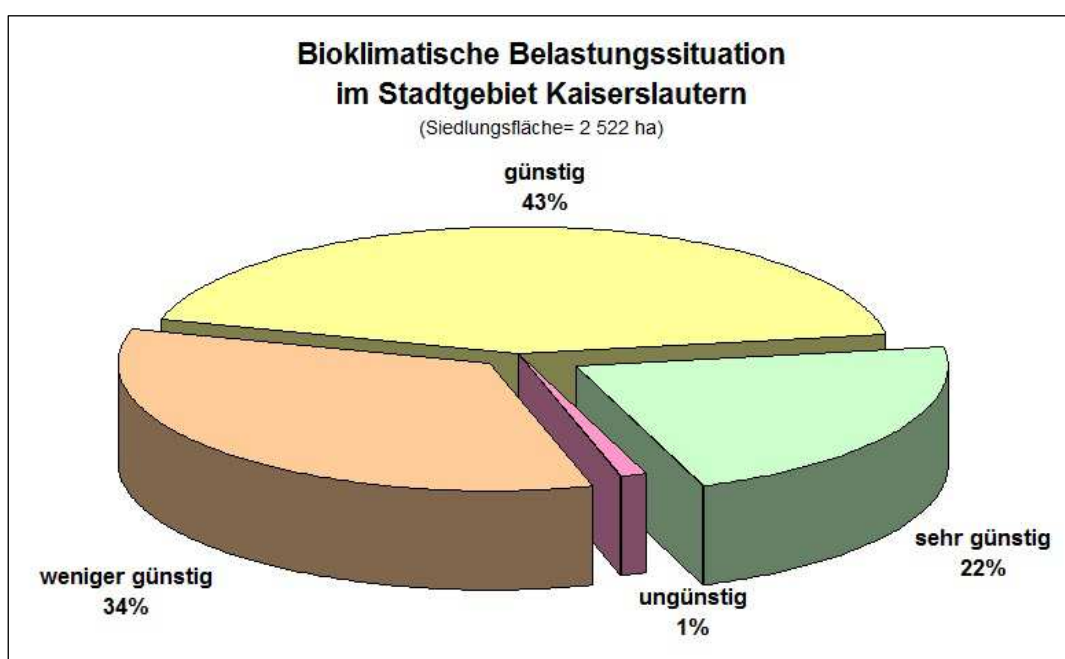


Abb. 18 Flächenanteile der bioklimatischen Situation

- 1 % der Siedlungsfläche weist, bezogen auf die Verhältnisse in der Stadt Kaiserslautern, eine sehr hohe bioklimatische Belastung auf und ist als ungünstig einzuordnen
- 34 % sind als bioklimatisch weniger günstig anzusehen
- 43 % weisen günstige Bedingungen auf und haben damit eine geringe Belastung
- 22 % des Siedlungsraumes sind unbelastet und als bioklimatisch sehr günstig anzusehen

Des Weiteren befinden sich 53 % der Siedlungsfläche bis 04:00 Uhr morgens im Einwirkungsbereich von Flurwinden und lokalen Kaltluftabflüssen. Die durchgeführte Ausbreitungsrechnung für den Luftschadstoff Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) hat zudem den vom Hauptstraßennetz ausgehenden Belastungsbereich während austauscharmer Wetterlagen deutlich gemacht. Dessen Größe beträgt 429 ha, was einem Anteil von etwa 3 % am Stadtgebiet entspricht. Basierend auf den Empfindlichkeiten von Siedlungsbereichen einerseits und Kaltluft produzierenden Freiflächen andererseits lassen sich planungsbezogene Aussagen treffen.

Im Hinblick auf weitere Nutzungsintensivierungen im Stadtgebiet Kaiserslautern sollten die Funktionen der klima- und immissionsökologisch wichtigen Strukturen möglichst wenig beeinträchtigt werden. 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.

## 8 Literatur

- GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2009): Gesamtstädtische Klimaanalyse und deren planungsrelevanter Inwertsetzung auf Basis einer GIS-gestützten Modellierung von stadtklimatisch und lufthygienisch relevanten Kenngrößen mit dem 3D-Klimamodell FITNAH. Gutachten im Auftrag der Stadt Kaiserslautern
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.
- EUROPEAN COMMISSION (1994): EUR 12585 - CORINE Landcover project - Technical guide. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg.
- KIESE, O. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- NATIONAL GEOSPATIAL INTELLIGENCE AGENCY (2004): Digital Terrain Elevation Data.
- ÖKOPLANA (2007): Klimagutachten zur geplanten Erweiterung des Gewerbegebietes Nordost – im Bereich „Hertelsbrunnen“ – in Kaiserslautern. Mannheim.
- RÖCKLE, R. und C.-J. RICHTER (1995): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. PEF-Bericht 136, Forschungszentrum Karlsruhe.
- 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
- UBA (2010): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 3.1/Januar 2010. INFRAS AG, Bern Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin.
- ULRICH, W. (1987): Simulationen von thermisch induzierten Winden und Überströmungssituationen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 57.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (2008): Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1997): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf.



## 9 Glossar

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

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

**Austauscharme Wetterlage:** → Strahlungswetterlage

**Autochthone Wetterlage:** → Strahlungswetterlage

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

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

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

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

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

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

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

Volumenstrom-*dichte* aufzufassen. Dies kann man so veranschaulichen, indem man sich ein quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>2</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom.

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

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

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

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

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

**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 den Analysezeitpunkt 04 Uhr morgens simulierte flächendeckende Strömungsfeld der Kaltluftabflüsse und Flurwinde während einer windschwachen → Strahlungswetterlage.

---

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

**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 erhöht.

**Wirkungsraum:** Bebaute (oder zur Bebauung vorgesehene), bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Räume (Belastungsraum), die an einen oder mehrere Ausgleichsräume angrenzen oder über wenig raue Strukturen angebunden sind. Durch lokale Luftaustauschprozesse erfolgt eine Zufuhr von Kalt-/Frischlufte aus dem → Ausgleichsraum, die zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen beiträgt.