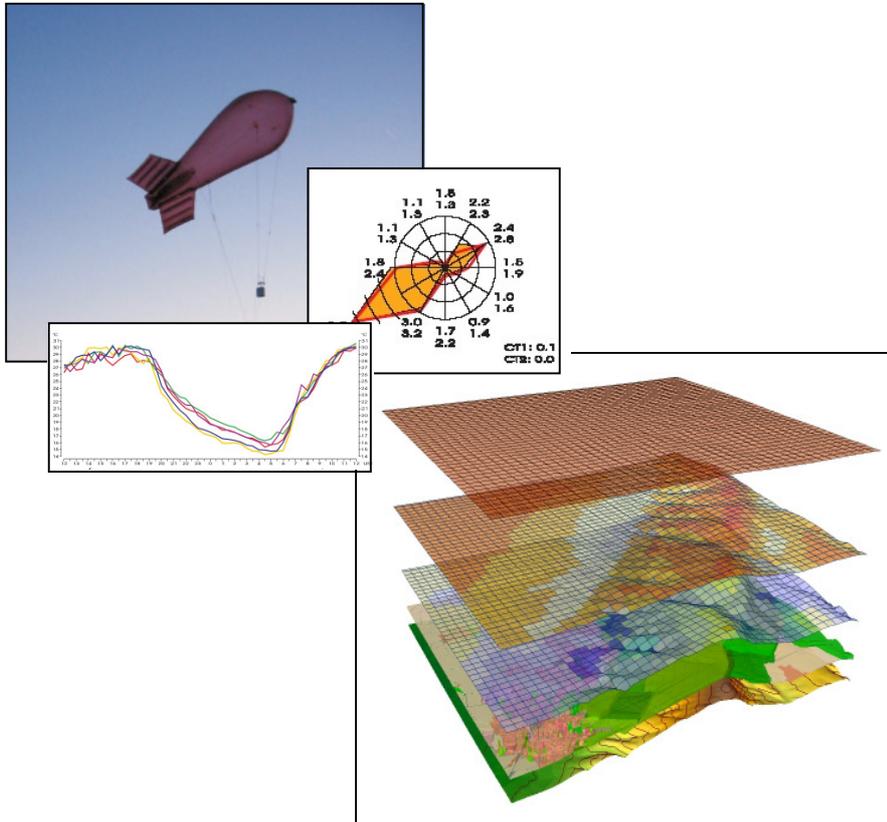


Gesamtstädtische Klimaanalyse und deren planungsrelevanter Inwertsetzung auf Basis einer GIS-gestützten Modellierung von stadtklimatisch und lufthygienisch relevanten Kenngrößen mit dem 3D-Klimamodell FITNAH



Auftraggeber:

Stadtverwaltung Kaiserslautern
Referat Umweltschutz
67653 Kaiserslautern



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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

www.geo-net.de



ÖKOPLANA

Ökoplana

Seckenheimer Hauptstraße 98
68239 Mannheim
Tel.: 0621 - 474626
Fax: 0621 - 475277

www.oekoplana.de

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

Hannover, Juli 2009

Inhaltsverzeichnis

Seite:

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | IV |
| | |
| 1 Aufgabenstellung | 1 |
| 2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis | 3 |
| 2.1 Geländehöhe..... | 3 |
| 2.2 Nutzungsstruktur..... | 3 |
| 3 Untersuchungsmethoden und Standorte der Messstationen | 5 |
| 3.1 Erfassung lokalklimatischer Daten..... | 5 |
| 3.2 Modellrechnung..... | 9 |
| 3.2.1 Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH..... | 9 |
| 3.2.2 Synoptische Rahmenbedingungen für die Modellrechnungen..... | 10 |
| 3.2.3 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung..... | 11 |
| 3.2.4 Abgrenzung der klimaökologischen Struktureinheiten..... | 13 |
| 4 Lokalklimatische Situation im Raum Kaiserslautern | 17 |
| 4.1 Untersuchungszeitraum und Repräsentanz zu einem längeren Zeitraum..... | 17 |
| 4.2 Darstellung der Untersuchungsergebnisse..... | 19 |
| 4.2.1 Strömungsgeschehen und Ventilation..... | 19 |
| 4.2.2 Thermische Situation und Ventilation bei klimaökologisch relevanten Wetterlagen - vergleichende Darstellung ausgewählter Tagesgänge der Lufttemperatur und des Windes..... | 25 |
| 4.2.2.1 Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit..... | 26 |
| 4.2.2.2 Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und -Geschwindigkeit am 01.-02.07. 2008 - östlicher Gradientwind..... | 29 |
| 4.2.2.3 Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und -Geschwindigkeit am 04.-05.07. 2008 - westlicher Gradientwind..... | 31 |
| 4.2.3 Kleinaerologische Messungen im Stadtgebiet von Kaiserslautern..... | 32 |
| 4.2.3.1 Vertikalsondierungen am 01.-02.07. 2008..... | 33 |
| 4.2.3.2 Rauchschwadenbeobachtungen am 16.-17.08. 2008..... | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.3.3 | Vertikalsondierungen und Rauchschwadenbeobachtungen am 26.-27.09. 2008 | 40 |
| 4.3 | Verteilung der Lufttemperatur nach Messfahrten im Gesamtstadtgebiet von Kaiserslautern am 01.-02.07. 2008 | 45 |
| 5 | Ergebnisse der Klimamodellierung | 50 |
| 5.1 | Kaltlufthaushalt | 50 |
| 5.1.1 | Bodennahes Lufttemperaturfeld | 50 |
| 5.1.2 | Autochthones Windfeld | 52 |
| 5.1.3 | Kaltluftvolumenstrom | 54 |
| 5.1.4 | Fazit | 56 |
| 5.2 | Lufthygiene | 56 |
| 5.2.1 | Verkehrsbedingte Luftbelastung | 57 |
| 5.2.1.1 | Stickstoffdioxid (NO ₂) | 57 |
| 5.2.1.2 | Feinstaub (PM10) | 58 |
| 5.2.2 | Gewerbliche NO ₂ -Belastung | 60 |
| 6 | Klimaökologische Funktionen | 61 |
| 6.1 | Grün- und Freiflächen | 61 |
| 6.2 | Siedlungsräume | 63 |
| 6.3 | Luftaustausch | 65 |
| 7 | Planungskarte Stadtklima | 66 |
| 7.1 | Grün- und Freiflächen | 66 |
| 7.2 | Siedlungsräume | 67 |
| 7.3 | Luftaustausch | 68 |
| 8 | Fazit | 69 |
| 9 | Literatur | 71 |

Anhang

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------|--|----|
| Abb. 1 | Standorte der temporären Klimamessstationen im Stadtgebiet von Kaiserslautern | 6 |
| Abb. 2 | Temporäre Klimamessstation Kaiserberg – fotografische Dokumentation | 6 |
| Abb. 3 | Temporäre Klimamessstation Lauterstraße – fotografische Dokumentation | 7 |
| Abb. 4 | Temporäre Klimamessstation SRS – fotografische Dokumentation | 7 |
| Abb. 5 | Temporäre Klimamessstation Brandenburger Straße – fotografische Dokumentation | 8 |
| Abb. 6 | Temporäre Klimamessstation Technische Werke – fotografische Dokumentation | 8 |
| Abb. 7 | Rechengebiete der Modellrechnungen | 13 |
| Abb. 8 | Vergleich der Windverhältnisse – langjähriges Mittel/Kurzzeitraum 2008/2009 | 17 |
| Abb. 9 | Windrosen – Station Kaiserberg | 21 |
| Abb. 10 | Windrosen – Station Lauterstraße | 23 |
| Abb. 11 | Windrosen – Station SRS | 24 |
| Abb. 12 | Windrosen – Station Brandenburger Straße | 24 |
| Abb. 13 | Windrosen Station Technische Werke | 25 |
| Abb. 14 | Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur / Strahlungstage 18.06.08 – 06.01.09 | 27 |
| Abb. 15 | Andauer von Lufttemperaturen $\geq 25^\circ$ an Sommertagen | 27 |
| Abb. 16 | Abendliche Abkühlungsrate | 28 |
| Abb. 17 | Nächtliche Inversionshäufigkeit | 28 |
| Abb. 18 | Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und –Geschwindigkeit am 01.07.- 02.07.08 | 29 |
| Abb. 19 | Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und –Geschwindigkeit am 04.07.- 05.07.08 | 31 |
| Abb. 20 | Fesselballon mit Messsonde | 32 |
| Abb. 21 | Standorte der Fesselballonaufstiege | 33 |
| Abb. 22 | Fesselballonaufstiege am 01.07.08 – Standort 1 / Einsiedlerhof | 34 |
| Abb. 23 | Fesselballonaufstiege am 01.07.08 – Standort 2 / SRS | 35 |
| Abb. 24 | Fesselballonaufstiege am 02.07.08 – Standort 3 / Am Gusswerk | 35 |
| Abb. 25 | Fesselballonaufstiege am 02.07.08 – Standort 4 / Pirmasenser Straße | 36 |
| Abb. 26 | Fesselballonaufstiege am 02.07.08 – Standort 5 / Erbsenberg | 27 |
| Abb. 27 | Fesselballonaufstiege am 02.07.08 – Standort 6 / Am Warmfreibad | 37 |
| Abb. 28 | Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und –Geschwindigkeit am 16.08.- 17.08.08 | 38 |
| Abb. 29 | Ergebnisse von Rauchschwadenbeobachtungen am 16./17.08.08 | 39 |
| Abb. 30 | Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und –Geschwindigkeit am 26.09.- 27.09.08 | 40 |
| Abb. 31 | Fesselballonaufstiege am 26.09.08 – Standort 7 / Theo-Vondano-Straße | 41 |
| Abb. 32 | Fesselballonaufstiege am 26.09.08 – Standort 8 / Lauterstraße | 42 |
| Abb. 33 | Fesselballonaufstiege am 27.09.08 – Standort 9 / Blechhamer | 43 |
| Abb. 34 | Fesselballonaufstiege am 27.09.08 – Standort 10 / Waschmühle | 44 |
| Abb. 35 | Fesselballonaufstiege am 27.09.08 – Standort 11 / Siegelbach | 44 |
| Abb. 36 | Ergebnisse von Rauchschwadenbeobachtungen am 26.09.08 | 45 |

| | | |
|---------|---|----|
| Abb. 37 | Isothermenkarte – Messfahrt am 01./02.07.08 | 47 |
| Abb. 38 | Modellierte Lufttemperatur in 2 m über Grund | 51 |
| Abb. 39 | Strömungsgeschwindigkeit und -Richtung im Kerngebiet..... | 53 |
| Abb. 40 | Kaltluftvolumenstrom und Strömungsfeld im Kerngebiet..... | 55 |
| Abb. 41 | Windfeld und NO ₂ -Immission im Kerngebiet während einer austauscharmen Wetterlage..... | 57 |
| Abb. 42 | Windfeld und PM10-Immission im Kerngebiet während einer austauscharmen Wetterlage..... | 59 |
| Abb. 43 | Gewerbebezogene NO ₂ -Immission im westlichen Stadtgebiet..... | 60 |
| Abb. 44 | Klimafunktionen im Bereich Kaiserslautern-Ost..... | 63 |
| Abb. 45 | Flächenanteile der bioklimatischen Belastungssituation im Stadtgebiet..... | 69 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------|--|----|
| Tab. 1 | Kennwerte zum Versiegelungsgrad und zur Strukturhöhe der Nutzungen | 4 |
| Tab. 2 | Bewertung der Kaltluftlieferung von Grünflächen..... | 14 |
| Tab. 3 | Bewertung der Kaltluftlieferung innerhalb der Kaltlufteinzugsgebiete | 15 |
| Tab. 4 | Klassifizierung der bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen..... | 16 |
| Tab. 5 | Monatliche Mittelwerte 2008/2009 und deren Abweichung vom langjährigen Mittel | 18 |
| Tab. 6 | Qualitative und quantitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms | 54 |
| Tab. 7 | Bilanzierung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Kaiserslautern | 62 |
| Tab. 8 | Bilanzierung der planerisch relevanten Grünflächen..... | 67 |

1 Aufgabenstellung

Bedingt durch die Ausdehnung der Stadt Kaiserslautern über verschiedene Landschaftsräume (z.B. Lautertal, Hangzonen, Hochflächen) stellen sich differenzierte lokal- und stadtklimatische Erscheinungen ein, die im Klimageschehen der Stadt einen wesentlichen Stellenwert einnehmen. Wie bereits vorliegende Klimauntersuchungen in Kaiserslautern belegen (Steinicke & Streifeneder 1996, ÖKOPLANA 2007¹), wird das Windfeld der Stadt und somit die bioklimatische/lufthygienische Situation durch regionale und lokale Luftzirkulationen wie z.B. Talabwinde, Hangabwinde und Luftaustausch zwischen Freiräumen (klimaökologische Ausgleichsräume) und Bebauung (klimaökologische Wirkungsräume) bestimmt.

Diese als klimaökologische Positiveffekte zu bewertenden Erscheinungen treten vorwiegend bei Wetterlagen auf, die in Tal- und Beckenlagen häufig zu bioklimatischer/lufthygienischer Belastung führen. Da diese Lokalströmungen in großen Teilbereichen des Stadtgebietes wesentlich zur Entlastung beitragen, gehören Kenntnisse der ortsspezifischen klimaökologischen Funktionszusammenhänge zwischen Flächennutzung und Entstehung sowie Auswirkung derartiger Positiveffekte zur Grundlage der Bauleit- und Landschaftsplanung. Das Vorliegen flächenbezogener Fachinformationen ist somit ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung des Schutzgutes Klima/Luft und zur Ableitung entsprechender Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen. 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 von den Büros GEO-NET Umweltconsulting GmbH und ÖKOPLANA in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) im Jahr 2009 eine *modell- und messwertgestützte Analyse* zu den klimaökologischen und lufthygienischen Funktionen für das Stadtgebiet von Kaiserslautern sowie das nähere Umland durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einher gehen. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Die Modellrechnungen wurden ergänzt durch umfassende messwertgestützte Auswertungen zur klimatischen Situation im Raum Kaiserslautern sowie der Durchführung von Temperaturmessfahrten zur Modellvalidierung (Kap. 4).

Die mit den Messungen und der Anwendung des Klimamodells FITNAH (**F**low over **I**rregular **T**errain with **N**atural and **A**nthropogenic **H**eat Sources) gewonnenen Ergebnisse der Klimaanalyse haben zu einer umfassenden Bestandsaufnahme der klimatisch-lufthygienischen Situation im Stadtgebiet 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.

¹ Steinicke & Streifeneder (1996): Klima- und lufthygienische Untersuchung der Stadt Kaiserslautern – unter besonderer Berücksichtigung aktueller Planungen. Freiburg i. Br.

ÖKOPLANA (2007): Klimagutachten zur geplanten Erweiterung des Gewerbegebietes Nordost – im Bereich „Hertelsbrunnen“ – in Kaiserslautern. Mannheim.

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

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

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

Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges in Form einer *Klimafunktionskarte*. Die Vorteile des modellgestützten Ansatzes ergeben sich aus der Bereitstellung flächendeckender Quantitäten verschiedener Parameter zum Kaltlufthaushalt, wobei auch der dynamische Aspekt im Klimahaushalt ausreichend berücksichtigt wird.

Darüber hinaus wurden nun in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form einer digitalen *Planungshinweiskarte* dargestellt. Die Umsetzung in raumspezifische klima- und immissionsökologische Qualitätsziele mündet in der Forderung nach Handlungsempfehlungen. Mit der konkreten Zuordnung *planungsrelevanter Aussagen* zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie z.B. Kaltluftentstehungsflächen, Luftleitbahnen und Komforträume, können einerseits diese in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung und/oder lufthygienischer Belastung identifiziert. Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt dabei fundierte Aussagen für den Maßstabsbereich 1 : 100 000 bis 1 : 15 000 (F-Plan-Ebene). Eine abschätzende Beurteilung der Auswirkungen von Planungsmaßnahmen ist aber auch auf Bebauungsplanebene gegeben.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse dargestellt. Der Bericht gliedert sich in die Darstellung der klimatischen Situation im Untersuchungsraum auf Basis von Messungen (ausgewertet durch das Büro Ökoplane) sowie, daran anschließend, in die Ausarbeitung der stadtklimatischen Funktionszusammenhänge auf Grundlage der Klimamodellierung mit planungsbezogenen Aussagen (erstellt durch GEO-NET). Die Ergebniskarten zu den Klimafunktionen und die Planungskarte Klima/Luft sind dem Anhang beigelegt.

2. Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

2.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Berechnung des Strömungs- und Immissionsfeldes wurde aus den 1 m Höhenlinien des 3D-Stadtmodells (STADT KAISERSLAUTERN 2008) ein einheitliches Höhenmodell für den Untersuchungsraum generiert. Die Zellengröße des erzeugten Modelleingangsrasters beträgt im Außenbereich 100 m sowie 50 m im Kernbereich. 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. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von insgesamt etwa 368 km².

2.2 Nutzungsstruktur

Die Landnutzungsinformationen 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). Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen dar, die einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben. In der vorhandene Datenebene sind jedoch keine Angaben zu den Gebäudehöhen enthalten. Für die Einordnung der Strukturhöhe und des Oberflächenversiegelungsgrades wurden daher nutzungsklassifiziert vorliegende Literaturdaten (u.a. MOSIMANN et al. 1999) genutzt, 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, 14-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet. Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen möglich zu machen.

Die Tabelle 1 zeigt die typischen Versiegelungs- und Strukturhöhen je Nutzungskategorie:

| Nutzungsstruktur | Mittlerer Versiegelungsgrad (%) | Mittlere Strukturhöhe (m) |
|--|---------------------------------|---------------------------|
| 1 Zentrum, Stadtteilzentrum | 95 | 25,0 |
| 2 Block- u. Blockrandbebauung | 78 | 15,0 |
| 3 Industrie- u. Gewerbefläche | 87 | 10,0 |
| 4 Zeilen- u. Hochhausbebauung | 55 | 15,0 |
| 5 Einzel- u. Reihenhausbebauung | 41 | 5,0 |
| 6 Straße, Parkplatz u.ä. | 95 | 0,0 |
| 7 Schienenverkehrsfläche | 25 | 0,5 |
| 8 Kleingarten, Friedhof, Spiel- u. Sportplatz | 25 | 5,0 |
| 9 Offene Landwirtschaftsfläche, Brachland, Parkwiese | 5 | 1,0 |
| 10 Gehölz, Garten- u. Obstbau | 5 | 2,0 |

Fortsetzung Tab. 1

| | | | |
|----|-----------|---|------|
| 11 | Laubwald | 5 | 12,5 |
| 12 | Nadelwald | 5 | 12,5 |
| 13 | Mischwald | 5 | 12,5 |
| 14 | Gewässer | 5 | 12,5 |

Tabelle 1: Kennwerte zum Versiegelungsgrad und zur Strukturhöhe der Nutzungen

Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. Zur Aufbereitung und Vereinheitlichung der Datengrundlage wurden die Geographischen Informationssysteme ArcView 3.2 und ArcGIS 9.2 der Firma ESRI eingesetzt.



3 Methodik

3.1 Erfassung lokalklimatischer Daten

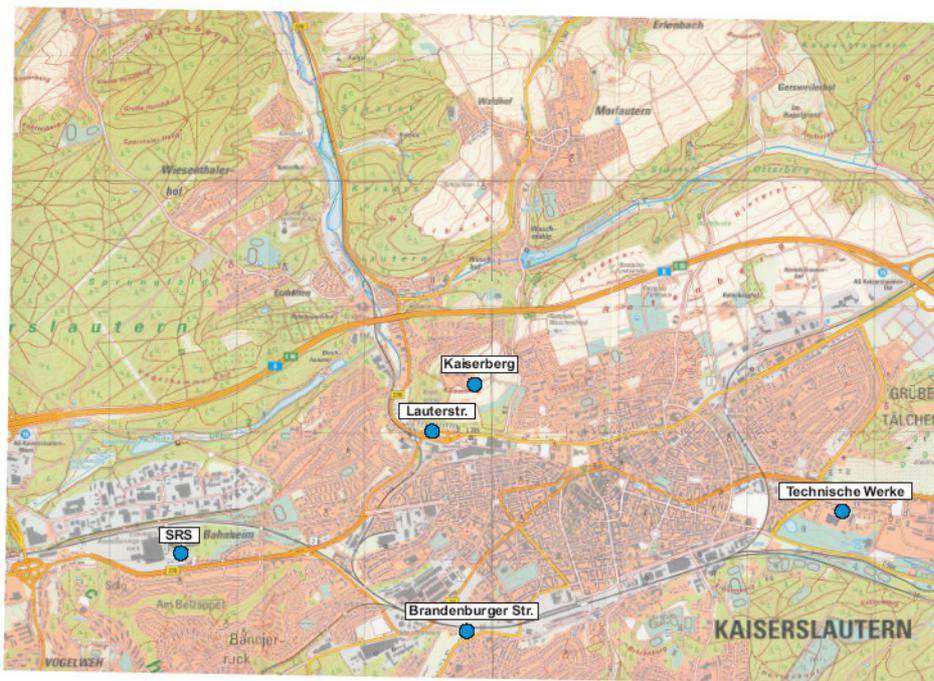
Zur Erfassung ausgewählter Klimaparameter wurden folgende Messverfahren durchgeführt:

- Fünf temporäre Klimamessstationen (**Abbildung 1 bis 6**) registrierten im Untersuchungszeitraum zwischen dem 18.06.2008 und dem 06.01.2009 kontinuierlich Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit.
- Mit Hilfe von Temperaturmessfahrten wurde die ortsspezifische Verteilung der nächtlichen Lufttemperatur im gesamten Stadtgebiet erfasst. Die Ergebnisse der Modellrechnungen können hierdurch validiert werden.
- Mit Hilfe kleinaerologischer Messungen (Fesselballonaufstiege, Rauchschwadenbeobachtungen) wurden lokale Luftströmungen erfasst sowie die Intensität und Mächtigkeit von Kaltluftabflüssen bzw. Hangab- und Talabwinden ermittelt.

Messstationen:

- | | |
|-----------|---|
| Station 1 | Kaiserberg Lage: RW 3409905/HW 5480131 Höhenstation auf dem Kaiserberg Höhe des Windgebers 8 m ü.G. Lufttemperatur 2.5 m ü.G. |
| Station 2 | Lauterstraße Lage: RW 3409501/HW 5479760 Lautertal unterhalb des Kaiserbergs (Neumühlepark) Höhe des Windgebers 6 m ü.G. Lufttemperatur 2.5 m ü.G. |
| Station 3 | SRS Lage: RW 3407616/HW 5478763 Gewerbliche Fläche im Bereich Bahnheim Höhe des Windgebers 8 m ü.G. Lufttemperatur 2.5 m ü.G. |
| Station 4 | Brandenburger Straße Lage: RW 3409812/HW 5478154 Kreuzungsbereich Brandenburger Straße/Tripstadtter Straße Höhe des Windgebers 8 m ü.G. Lufttemperatur 2.5 m ü.G. |
| Station 5 | Technische Werke Lage: RW 3412767/HW 5479104 Lautertal östlich des Stadtzentrums Höhe des Windgebers 8 m ü.G. Lufttemperatur 2.5 m ü.G. |

Abb. 1: Standorte der temporären Klimamessstationen im Stadtgebiet von Kaiserslautern



- Klimamessstationen**
- 1 Kaiserberg
49°27'5.23"N / 7°45'23.28"O
 - 2 Lauterstr.
49°26'53.16"N / 7°45'3.75"O
 - 3 SRS
49°26'17.97"N / 7°42'22.67"O
 - 4 Brandenburger Str.
49°26'1.78"N / 7°44'53.14"O
 - 5 Technische Werke
49°26'34.16"N / 7°47'46.15"O

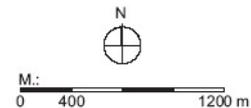
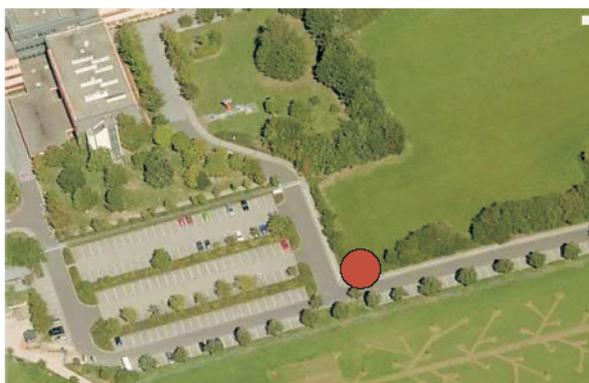


Abb. 2: Temporäre Klimamessstation - Kaiserberg
Fotografische Dokumentation



Aufnahmen:
ÖKOPLANA 07/2008
www.maps.live.de

Stationsstandort



Abb. 3: Temporäre Klimamessstation - Lauterstraße
Fotografische Dokumentation



Aufnahmen:

ÖKOPLANA 07/2008
www.maps.live.de

 Stationsstandort



ÖKOPLANA



Abb. 4: Temporäre Klimamessstation - SRS
Fotografische Dokumentation



Aufnahmen:

ÖKOPLANA 07/2008
www.maps.live.de

 Stationsstandort



ÖKOPLANA



Abb. 5: Temporäre Klimamessstation - Brandenburger Straße
Fotografische Dokumentation



Aufnahmen:

ÖKOPLANA 07/2008
www.maps.live.de

 Stationsstandort



ÖKOPLANA



Abb. 6: Temporäre Klimamessstation - Technische Werke
Fotografische Dokumentation



Aufnahmen:

ÖKOPLANA 07/2008
www.maps.live.de

 Stationsstandort



ÖKOPLANA



3.2 Modellrechnung

3.2.1 Beschreibung des verwendeten Klima- und Strömungsmodells FITNAH

Eine wichtige Ursache für die Entstehung und die Ausbildung eines typischen lokalklimatischen Gefüges sind die unterschiedlichen Boden- und Oberflächeneigenschaften der verschiedenen genutzten Räume. Daraus resultieren Temperaturdifferenzen der einzelnen Teilräume und dynamische Luftausgleichsbewegungen zwischen ihnen (z.B. Flurwindssysteme). Wind und Temperatur sowie daraus abgeleitete Größen sind die dominierenden Einflussfaktoren zur Bewertung des Lokalklimas unter human-biometeorologischen und lufthygienischen Gesichtspunkten.

Die Untersuchung und Erfassung des Lokalklimas kann mit Hilfe verschiedener Methoden erfolgen. Hierzu zählen Feldmessungen und Fernerkundungsverfahren genauso wie Windkanalstudien und die Anwendung numerischer Simulationsmodelle. Gerade numerische Simulationsmodelle sind in vorteilhafter Weise in der Lage, die aufgrund der großen Komplexität der Nutzungsstrukturen räumlich und zeitlich sehr stark veränderlichen meteorologischen Größen zu erfassen.

Die detaillierte Berechnung der Wind- und Temperaturverhältnisse für das Stadtgebiet Kaiserslautern wurde mit dem **Modell FITNAH** (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) durchgeführt. Eine genaue mathematische und physikalische Beschreibung des Modells ist bei GROSS (1993) zu finden.

Numerische Simulationsmodelle werden in sehr vielen Gebieten der Meteorologie eingesetzt, und die resultierenden Erkenntnisse liefern wichtige Basisinformationen für viele Lebensbereiche. Die Wettervorhersage für die nächsten 1-5 Tage wird fast ausschließlich von solchen komplexen und umfangreichen Computermodellen erstellt. Auch die Erkenntnisse zu den möglichen Veränderungen unseres globalen Klimas in den nächsten Jahrzehnten resultieren aus solchen Rechnungen. Und schließlich werden Modelle ähnlichen Typs auch dazu verwendet, die lokalen und die regionalen Verteilungen der meteorologischen Variablen in der Atmosphäre zu berechnen (GROSS 2002).

Die o.g. Computermodelle für die verschiedenen Skalen und Aufgabenstellungen basieren alle auf dem gleichen mathematisch-physikalischen Gleichungssystem. Lediglich im Detail finden sich skalenspezifische Unterschiede. Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen.

Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird. Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen in realem Gelände müssen neben der Orographie insbesondere auch der Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen. Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe, Bestandsdichte und Baumart Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- und Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische

Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (z.B. Gross 1989). Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgendem Koordinatensystem transformiert. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, insbesondere die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Größen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrombilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Das Mesoskalenmodell FITNAH ist auch für die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in urban geprägten Räumen ausgelegt. Eine Abschätzung der räumlichen Auswirkungen verkehrsbedingter Emissionen kann im allgemeinen Fall nur mit Hilfe entsprechender Modelle erfolgen. Solche Modelle wurden in der Vergangenheit auf ihre Realitätsnähe hin getestet (RÖCKLE & RICHTER 1995; SCHÄDLER et al. 1996; EICHHORN 1995). Sie sind in vorteilhafter Weise in der Lage, die aufgrund der großen Komplexität der Nutzungsstrukturen räumlich und zeitlich sehr stark veränderlichen meteorologischen Größen zu erfassen.

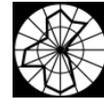
FITNAH berücksichtigt die Baustrukturen über das Konzept einer erhöhten Viskosität (ULRICH 1987). Damit gelingt es, dass Geschwindigkeit und Turbulenz innerhalb der Gebäudestrukturen verschwinden. Poröse Hindernisse, wie Sträucher und Bäume, werden über zusätzliche Widerstandsterme in den Gleichungen berücksichtigt (GROSS 1993). Der turbulente Diffusionskoeffizient wird über die turbulente kinetische Energie und einen Mischungsweg bestimmt. Gerade im bebauten Gelände liegen aber keine Angaben zum Mischungsweg vor. Da die Ergebnisse aber stark von der Bestimmungsvorschrift für den Mischungsweg abhängen, wird bei FITNAH der Turbulenzzustand über ein E- ϵ -Modell (RODI 1980) bestimmt. Dabei bezeichnet ϵ die Energiedissipation.

Die Differenzialgleichungen des benutzten Gleichungssystems werden in Differenzengleichungen überführt und auf einem numerischen Gitter gelöst. Die für die Klimamodellierung und die Ausbreitungsrechnung verwendeten räumlichen Maschenweiten Δx betragen 100 m im Außenbereich bzw. 50 m im Kerngebiet. Bei allen Modellrechnungen ist die vertikale Gitterweite nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre sind die Rechenflächen besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m. Nach oben hin wird der Abstand Δz immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen).

3.2.2 Synoptische Rahmenbedingungen für die Modellrechnung

Während solcher *autochthoner Wetterlagen* können sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Landschaft besonders gut ausprägen. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Bei der hier durchgeführten numerischen Simulation wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt, wobei diese Wettersituation auch die Grundlage für die Klimamodellierung darstellt:

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



Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitiger hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden.

3.2.3 Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung

Verkehrsmengen und Verkehrssituation

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 Emissionsrechnungen müssen u. a. folgende Eingabeparameter bekannt sein:

- Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV = Fahrzeuge/24h)
- LKW-Anteil
- Verkehrssituation in der Straße
- Bezugsjahr (Zusammensetzung der Fahrzeugschichten)
- Längsneigung der Fahrbahn

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Verkehrsmengen des Hauptstraßennetzes, welche im Rahmen der Lärmkartierung für das Jahr 2006 erhoben wurden, von der Stadt Kaiserslautern zur Verfügung gestellt.

Motorbedingte Emissionsfaktoren

Auf Grundlage der übermittelten Verkehrsmengen sowie den nach den üblichen Verfahren zugewiesenen Verkehrssituationen wurde mit Hilfe des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes HBEFA 2.1 (UBA 2004) für jeden Fahrmodus die Emissionsraten für die folgenden lufthygienischen Leitparameter bestimmt:

- Stickstoffoxid (NO_x)
- Feinstaub (PM₁₀)

Das HBEFA stellt Emissionsfaktoren für alle gängigen Fahrzeugkategorien jeweils in emissionsrelevanter Differenzierung für eine Vielzahl von Verkehrssituationen zur Verfügung. Entsprechend der örtlichen Gegebenheiten wurden die Emissionsfaktoren für das Bezugsjahr 2006 berechnet und gemäß der den Straßenräumen zugeordneten Verkehrsmengen zu tatsächlichen Emissionen verrechnet.

Diese sind in das Geodatenbankumfeld des Straßenverkehrsnetzes überführt worden und auf ein für das Simulationsmodell FITNAH geeignetes Raster abgebildet worden. Die Emissionshöhe beträgt dabei 0,5 m über Grund.



Berechnung der nicht motorbedingten Feinstaub-Emissionen

Die Emissionsfaktoren für die Komponente Feinstaub (PM10) lassen sich in motorbedingt sowie nicht motorbedingt untergliedern. Verursacher der PM10-Immissionen im Nahbereich von Straßen sind im Wesentlichen die folgenden Komponenten:

- Auspuffemissionen,
- Straßenabrieb,
- Reifenabrieb und
- Brems- und Kupplungsabrieb, des Weiteren
- Aufwirbelung von Straßenstaub sowie überregionaler Eintrag

Nur für die *Auspuffemissionen* liegen in Deutschland fundierte Informationen in Form des HBEFA vor. Für die Berechnung der *nicht motorbedingten Emissionen* wurde das von DÜRING & LOHMEYER (2004) und in BAST (2005) beschriebene Verfahren verwendet. Im Rahmen dieses Ansatzes werden den Verkehrssituationen des HBEFA und den jeweiligen Fahrzeugtypen spezifische, nicht motorbedingte Emissionsfaktoren für Abrieb und Aufwirbelung zugewiesen.

3.2.4 Abgrenzung der Klimaökologischen Struktureinheiten

Um Aussagen über die Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen die unterschiedlichen Flächeneinheiten in ihren klimatischen Merkmalen auch untereinander abgrenzbar sein. Dafür wurden den Blockflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Windgeschwindigkeit oder Lufttemperatur in 2 m Höhe zugeordnet. Diese Parameter liegen als rasterbasierte Felder in einem Geographischen Informationssystem vor. Im Kern des Untersuchungsgebietes, welches die Kernstadt Kaiserslautern beinhaltet, wurde ein 50 m Raster verwendet. Im Außenbereich des Stadtgebietes, welches eine weniger differenzierte Bebauung aufweist, geht das 50 m Raster (roter Rahmen) in ein 100 m Raster (blauer Rahmen) über (s. Abb. 7).

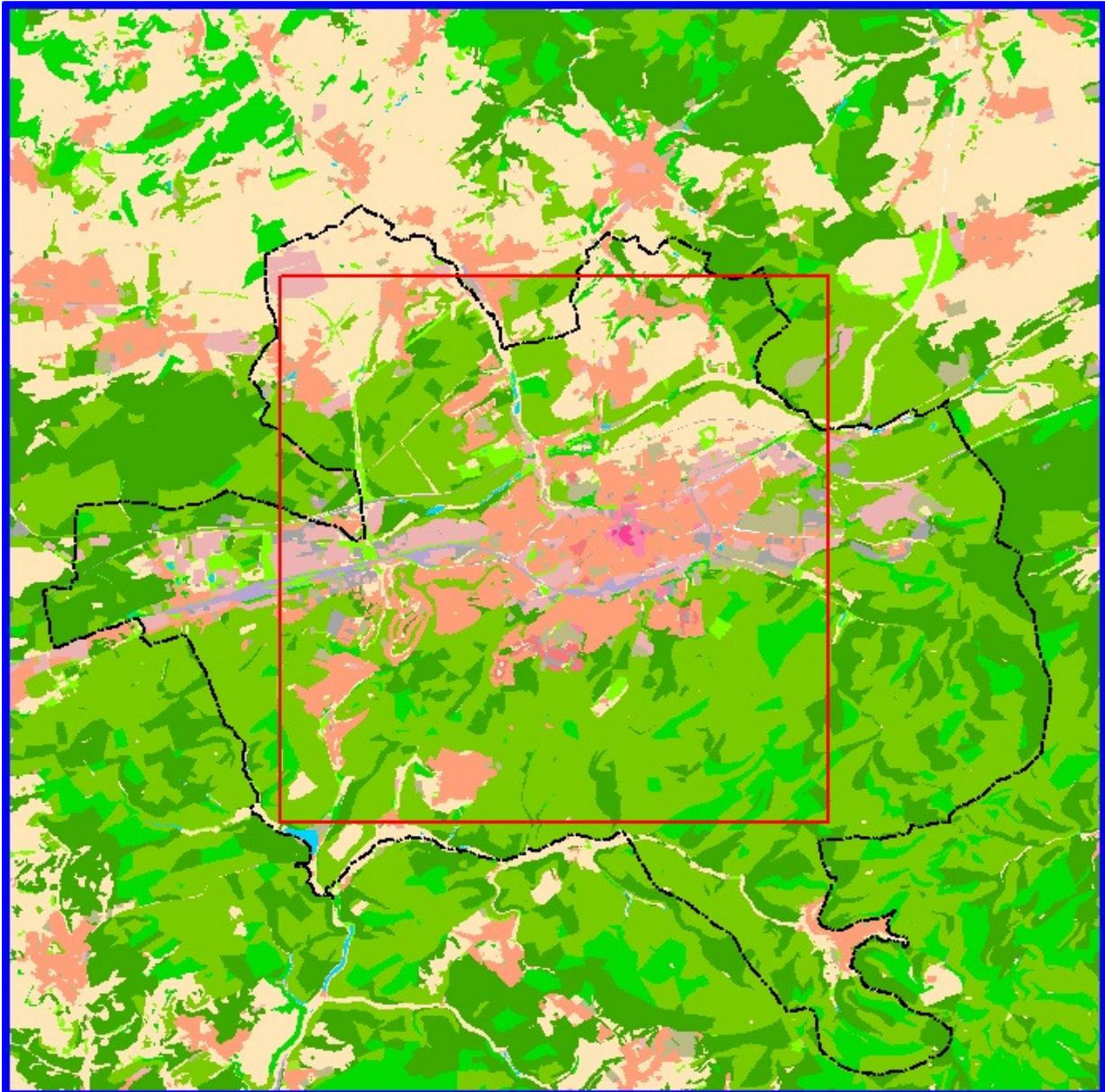


Abbildung 7: Rechengebiete der Modellrechnungen

Die Ausbreitungsfelder der verkehrsbedingten Luftschadstoffe wurden ebenfalls in den beschriebenen Rastergrößen berechnet. Die Gesamtgröße des Untersuchungsraums beträgt ca. 368 km².

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

Grün- und Freiflächen

Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten *vegetationsgeprägte Freiflächen* wie z.B. Ackerflächen, Parkareale Kleingärten und Friedhofsanlagen. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus.

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

Als Resultat ergeben sich mit diesem Verfahren vier Bewertungskategorien (s. Tab. 2), welche durch den Mittelwert sowie die obere und untere S_1 -Schranke (Standardabweichung) nach der Z-Transformation abgegrenzt werden. Positive Abweichungen >0 bedeuten überdurchschnittliche Werte, woraus sich die Bewertung in mittel und hoch ergibt. Negative Ausprägungen von <0 bedeuten hingegen ein unterdurchschnittliches Niveau (entsprechend gering und sehr gering). Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Standardisierung eines Klimaparameters und die daraus resultierende Vergleichbarkeit der Variablen untereinander oder mit anderen Untersuchungen.

Die qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms zeigt Tabelle 2, wobei für einen klimaökologisch wirksamen Massenstrom der Wertebereich >-1 angesehen wird (vgl. Tabelle 1). Die Bewertung des Kaltluftvolumenstroms orientiert sich somit an den Kategorien der Z-Transformation, wobei für jede Blockfläche der ATKIS-Datengrundlage ein mittlerer Z-Wert zugewiesen wurde.

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

Tabelle 2: Bewertung der Kaltluftlieferung von Grünflächen

Die Darstellung der Kaltluftproduktionsflächen erfolgt als abgestufte Flächenfarbe. 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 sind zur qualitativen Einordnung der Wirksamkeit der Kaltlufteinzugsgebiete deren Kaltluftvolumenstrom und die Hauptabflussrichtung der Kaltluft jeweils über einen einzelnen Pfeil dargestellt. Die Abflussrichtung innerhalb der Einzugsgebiete wurde aus dem Windfeld gemittelt und orientiert sich meist an der Ausrichtung an vorhandenen Taleinschnitten als Leitbahnen. Die Qualitative Einordnung der Kaltluftdynamik in den Einzugsgebieten zeigt Tabelle 3:

| Mittlerer Z-Wert pro Kaltlufteinzugsgebiet | Bewertung |
|--|-----------|
| < 0 | Mittel |
| 0 bis 1 | Hoch |
| > 1 | Sehr hoch |

Tab. 3: Bewertung der Kaltluftlieferung innerhalb der Kaltlufteinzugsgebiete

Ausgangspunkt für die qualitative Einordnung ist das arithmetische Mittel des Z-transformierten Volumenstroms innerhalb eines einzelnen Kaltlufteinzugsgebietes. Da der mittlere Z-Wert nicht unter -1 absinkt, entfällt hier die Kategorie „Gering“.

Siedlungsräume

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

Ausschlaggebend für die Zuordnung der *bioklimatischen Belastung* eines Baublockes ist der Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote; vgl. FANGER 1972) als dimensionsloses Maß für die nächtliche 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. Analog zum Kaltluftvolumenstrom wurde eine Z-Transformation des PMV-Ergebnisrasters durchgeführt, um die Abweichungen von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum zu charakterisieren. Im Anschluss wurden Flächenmittelwerte für die Blockflächen des ATKIS zugewiesen.

Die bioklimatischen Belastungsklassen entsprechen den vier Kategorien gem. VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (ungünstig - weniger günstig - günstig - sehr günstig). Ausschlaggebend ist die jeweilige mittlere Ausprägung des Z-Wertes des PMV innerhalb einer Blockfläche, aus der sich die Zuordnung zu den Bewertungskategorien ergibt (vgl. Tabelle 4).

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.

| Belastungsstufe | Mittlerer Z-Wert pro Baublock |
|-------------------|--|
| 4 Ungünstig | > 1 (obere S ₁ -Schranke) |
| 3 Weniger günstig | 1 bis 0 |
| 2 Günstig | 0 bis -1 |
| 1 Sehr günstig | < -1 (untere S ₁ -Schranke) |

Tabelle 4: Klassifizierung der bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen

Neben der bioklimatischen Belastung wird auch der Aspekt der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung mit einbezogen. Als *lufthygienische Belastungsbereiche* wurden flächenhaft Areale abgegrenzt, die eine Konzentration von mehr als 70 µg/m³ NO₂ aufweisen (Bezugsjahr 2006). Dabei handelt es sich um ein Immissionsniveau, das in etwa dem mittleren gemessenen 98%-Wert (Kurzzeitbelastung) der Jahre 2002 bis 2008 an der ZIMEN-Station Rathaus entspricht. Ist ein bereits bioklimatisch belasteter Baublock gleichzeitig durch eine verkehrsbedingte lufthygienische Belastung von mehr als 70 µg/m³ NO₂ beaufschlagt, sind diese Bereiche als *bioklimatisch und lufthygienisch belastet* mit einer eigenen Signatur ausgewiesen worden.

Kaltluftleitbahnen

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. Aufgrund des strukturierten Reliefs treten vor allen die Talungen als Leitbahnen von Kaltluft in Erscheinung. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen als auch Gleisareale und breite Straßenräume.

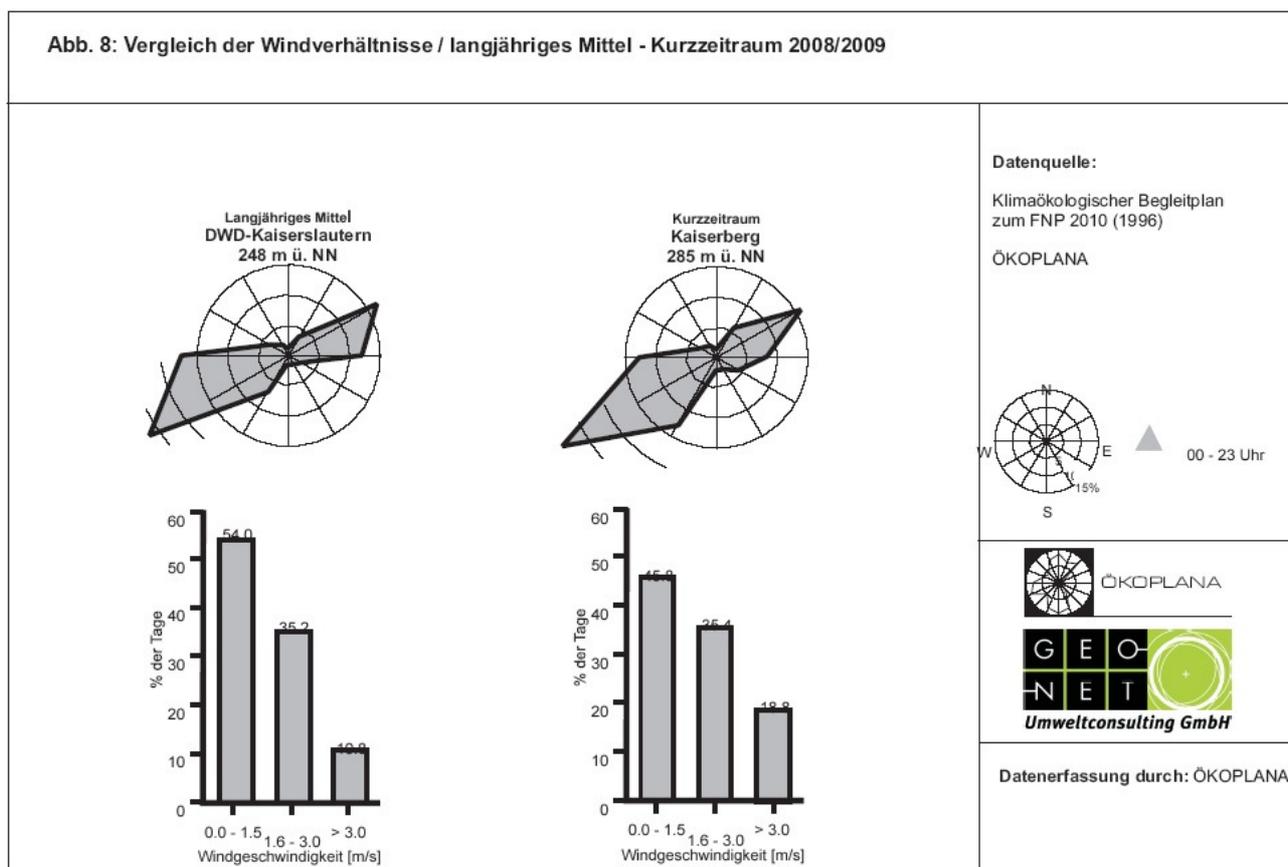
Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten 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.

4 Lokalklimatische Situation im Raum Kaiserslautern

4.1 Untersuchungszeitraum und Repräsentanz zu einem längeren Zeitraum

Die statische Auswertung der erfassten Klimadaten basiert auf dem Datenmaterial des Messzeitraums 18.06.2008 – 06.01.2009. Um die zeitliche Repräsentanz des Messzeitraums beurteilen zu können, wurden die im Untersuchungszeitraum auftretenden Klimaparameter mittlere Lufttemperatur, Niederschlagssumme und Sonnenscheindauer der nächstgelegenen DWD-Station Saarbrücken mit den Daten eines längeren Zeitraums verglichen. Zudem wurde die im Untersuchungszeitraum aufgetretene Häufigkeit der Windrichtung und mittleren Windgeschwindigkeit an der von Bebauung weitgehend ungestörten Station *Kaiserberg* (Betrieb durch ÖKOPLANA) mit der eines langjährigen Messzeitraumes am Standort *DWD-Kaiserslautern* (Betrieb durch DWD)² verglichen. Wie ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung belegt, ergeben sich zwischen den beiden Zeiträumen keine gravierenden Unterschiede (Abb. 8).

In beiden Messzeiträumen dominieren südwestliche bis westliche Luftströmungen. Als Sekundärmaximum treten nordöstliche bis östliche Windrichtungen hervor. Die ungefähr W-E-verlaufende Kaiserslauterer Senke macht sich deutlich bemerkbar (→ reliefbedingte Führungseffekte).



² Die Daten wurden dem „Klimaökologischen Begleitplan“ zum Flächennutzungsplan 2010 entnommen (STEINICKE & STREIFENEDER 1996).

Auch hinsichtlich der Windgeschwindigkeitsverteilung zeigen sich vergleichbare Ergebnisse. In beiden Messzeiträumen überwiegen Schwachwinde unter 1.6 m/s (54% langjähriges Mittel, 45.8% Kurzzeitraum 2008/2009). Mittlere Windgeschwindigkeiten von über 3.0 m/s, die eine intensive Durchlüftung des Stadtgebietes ermöglichen, treten nur zu ca. 11% (langjähriges Mittel) bzw. zu ca. 19% (Kurzzeitraum 2008/2009) auf. Die insgesamt etwas höheren Windgeschwindigkeiten an der Station *Kaiserberg* sind auf den freixponierten Stationsstandort zurückzuführen. Insgesamt zeigen sich zwischen den kurz- und langfristigen Windfeldaufzeichnungen keine gravierenden Unterschiede, so dass die Windmessungen des Kurzzeitraums auch für einen mehrjährigen Messzeitraum als repräsentativ bewertet werden können.

Der Verlauf der mittleren Lufttemperatur, der Niederschlagssumme und Sonnenscheindauer während des Untersuchungszeitraumes (Juni 2008 – Januar 2009) zeigt im Vergleich mit dem langjährigen Mittel (1951-1980) des Deutschen Wetterdienstes z.T. auffallende Abweichungen (vgl. Tabelle 5).

Der Monat Juni war unter dem Einfluss einer zyklonalen und antizyklonalen Westlage besonders am Monatsende sehr warm (Lufttemperaturmaxima über 30°C), so dass die Mitteltemperatur gegenüber dem langjährigen Mittel einen um 1.4³ höheren Wert aufweist. Die Niederschlagssumme war deutlich zu niedrig (40% vom langjährigen Mittel), während die Sonnenscheindauer (96%) weitgehend dem langjährigen Mittel entsprach. Der Monat Juli begann mit einer antizyklonalen Westlage, die zur Erfassung lokaler Klimaeffekte recht günstige Bedingungen ermöglichte. Nach dem 3. Juli herrschten zyklonale Wetterlagen vor, die nur noch selten Strahlungsnächte bescherten. Insgesamt war der Juli etwas zu warm (+0.5 K), zu trocken und zu sonnenscheinarm.

Tabelle 5: Monatliche Mittelwerte 2008/2009 und deren Abweichung vom langjährigen Mittel (1961 – 1990) für die Station Saarbrücken (Ensheim und Flugwetterwarte)

| Monat | Mitteltemperatur u. Abweichung in K | | Niederschlag in mm u. in % vom Mittel | | Sonnenscheindauer u. in % vom Mittel | |
|-----------------------------|--|-------------|--|-----------|---|-----------|
| | 2008 | | | | | |
| Juni 2008 | 17.0 °C | +1.4 | 33 mm | 40 | 206 Std. | 96 |
| Juli 2008 | 18.1 °C | +0.5 | 54 mm | 75 | 217 Std. | 90 |
| August 2008 | 17.1 °C | ±0 | 126 mm | 58 | 163 Std. | 75 |
| September 2008 | 12.1 °C | -2.0 | 77 mm | 172 | 143 Std. | 74 |
| Oktober 2008 | 9.1 °C | -0.5 | 77 mm | 124 | 88 Std. | 85 |
| November 2008 | 5.0 °C | +0.7 | 56 mm | 78 | 43 Std. | 39 |
| Dezember 2008 | 0.8 °C | -0.6 | 67 mm | 80 | 57 Std. | 100 |
| Januar 2009 | -1.6 °C | -1.2 | 48 mm | 58 | 110 Std. | 39 |
| Gesamtzeit- raum | 9.7 °C | -1.7 | 538 mm | 86 | 1027 Std. | 75 |

Quelle: DWD, Monatl. Witterungsbericht 2008/2009

Im August entspricht die Lufttemperatur dem langjährigen Mittel. Trotz langandauerndem Einfluss zyklonaler Wetterlagen ist der Monat deutlich zu trocken. Die Sonnenscheindauer erreicht 75% des langjährigen Mittels. In der Monatsmitte (16 - 18.08.) überwiegt der Einfluss eines Trogs über Mitteleuropa. In Kaiserslautern überwiegen heitere und auch sonnige Abschnitte, die zur Erfassung lokaler Klimadaten genutzt wurden.

³ Die Lufttemperaturdifferenz wird nicht in °C, sondern in K (Kelvin) angegeben.

Der Monat September beginnt mit einer Hochdruckbrücke über Mitteleuropa, die mit abendlichen Gewittern einhergeht. Zwischen dem 02. und 25. überwiegen dann zyklonale Wetterlagen, die z.T. mit ergiebigen Niederschlägen einhergehen. Erst am 26.09 setzt sich wieder Hochdruckwetter (BM) durch, das lokalklimatisch bedingte Effekte (z.B. Talabwinde) begünstigt.

Insgesamt ist der Monat September deutlich zu kühl (-2.0 K) und zu feucht. Auch die Sonnenscheindauer erreicht nur 64% des langjährigen Mittels.

Der Monat Oktober ist trotz des langandauernden Einflusses einer antizyklonalen Westlage (10.10. – 26.10.) etwas zu kalt (-0.5 K) und zu feucht (124%). Die Sonnenscheindauer entspricht mit 88 Std. näherungsweise dem langjährigen Mittel.

Im November werden an ca. 9 Tagen Hochdruckwetterlagen registriert, die zeitweise Lokalklimaerscheinungen hervorrufen. Im Dezember 2008/Januar 2009 sind antizyklonale Wetterlagen (ca. 15 Tage) von recht niedrigen Lufttemperaturen begleitet, so dass gegenüber dem langjährigen Mittel zu niedrige Lufttemperaturen aufgezeichnet werden.

Antizyklonale Wetterlagen und Hochdruck-Wetterlagen begünstigen die Ausbildung lokaler und regionaler Klimaerscheinungen (Strahlungstage). Im Verlauf zyklonaler Wetterlagen, die meist mit höheren Windgeschwindigkeiten, stärkerer Bewölkung oder Regen verbunden sind, können sich lokale Klimaeinflüsse nur in abgeschwächter Form oder überhaupt nicht ausbilden.

Strahlungstage, bei denen sich lokale und regionale Klimaeffekte besonders ausgeprägt darstellen, traten im Untersuchungszeitraum 18.06.2008 – 06.01.2009 an ca. 16% der Tage auf (langjähriges Mittel: Strahlungstage ca. 25 - 30% der Tage im Jahr), so dass kalte Luftinduzierte Klimaeffekte insgesamt unterrepräsentiert sind.

4.2 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

4.2.1 Strömungsgeschehen und Ventilation

Zur Beurteilung des lokalen Strömungsgeschehens im Kernstadtgebiet von Kaiserslautern wurden der Gesamtzeitmesszeitraum (18.06.2008 – 06.01.2009) sowie als jeweils eigenständiges Datenkollektiv Strahlungstage und Sommertage (max. Lufttemperatur $\geq 25^\circ\text{C}$) ausgewertet, analysiert und für die einzelnen Stationsstandorte in Form von Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung (Windrosen) dargestellt.

Das Ventilationsgeschehen im Stadtgebiet von Kaiserslautern wird durch ortsspezifische Lokalströmungen und die Leitlinienwirkung verschiedener Talzüge und Geländeeinschnitte (z.B. Lautertal, Eselsbachtal, Aschbachtal) geprägt. Markanteste Erscheinung ist dabei der tagesperiodische Wechsel der Windrichtung, vor allem an Tagen mit erhöhtem Strahlungseinfluss. Die Windverteilung der einzelnen Stationen verdeutlicht, dass im Tagesverlauf bestimmte Vorzugsrichtungen auftreten, während der Tagstunden ist das Strömungsgeschehen weitgehend von der vorherrschenden Großwetterlage und der Stationslage und Umgebung (Art der Bebauung, Flächennutzung und orographischen Situation) abhängig, wobei südwestliche und nordöstliche Windrichtungen überwiegen. Im Nahbereich von Bebauung oder in ausgeprägten Tallagen (z.B. Station *Lautertal*) wird die Windgeschwindigkeit aufgrund der erhöhten Oberflächenrauigkeit reduziert und es kann durch Umlenkungen und Leitlinieneffekte zu Richtungsänderungen gegenüber der vorherrschenden Höhenströmung kommen.

Nach Sonnenuntergang geht der Anteil südwestlicher Winde zugunsten nordöstlicher zurück. Bemerkenswert für das Untersuchungsgebiet ist die rasche Bildung von Kaltluft im bodennahen Luftraum während der ersten Nachthälfte. In flachem Gelände und an Hindernissen (z.B. Straßendämme) neigt die Kaltluft zu Stagnation. Wo dies der Fall ist, kann die bodennahe Kaltluft in ihrem Umfeld (z.B. Bebauung) aus eigenem Antrieb keinen intensiveren Luftaustausch bewirken. In Talzügen (z.B. entlang des Lautertals östlich vom Stadtzentrum) entwickeln sich hingegen aus der abfließenden Kaltluft Talabwinde bzw. gerichtete Kaltluftströme, die in ihrem Einflussbereich, d.h. über den Ort ihres Entstehens hinaus, zur Ventilation des bodennahen Luftraumes beitragen. Darüber hinaus ergeben sich Belüftungseffekte über Kaltluftabflüsse entlang von Seitentälern und Hangeinschnitten (z.B. Hangeinschnitt Erbsenberg östlich des Fritz-Walter-Stadions). Ausgehend von dem ca. 6½-monatigen Datenkollektiv der kontinuierlich registrierenden Messstationen wird nachfolgend für alle Standorte die Windrichtungsverteilung in Abhängigkeit von der Stationslage dargestellt.

Dazu wurde aus den Halbstundenmitteln des Untersuchungszeitraumes für jede Station die prozentuale Häufigkeit der Windrichtungen berechnet und in Doppelwindrosen⁴ für jeweils 30-Grad Sektoren getrennt für Tag- und Nachtstunden in den Abbildungen 9 bis 13 dargestellt. Auf diese Weise lässt sich die zeitliche Zuordnung bestimmter Windrichtungshäufigkeiten und die zwischen den einzelnen Stationen unterschiedliche Verteilung beurteilen. Die dazugehörigen Windstatistiken finden sich im Anhang.

Durch die Aufteilung in verschiedene Tagesintervalle wird das ortsspezifische, tagesperiodisch wechselnde Strömungsgeschehen verdeutlicht. In den Nachtstunden treten zusätzliche Effekte wie z.B. Talab- und Hangabwinde auf, die das städtische Windfeld graduell unterschiedlich modifizieren.

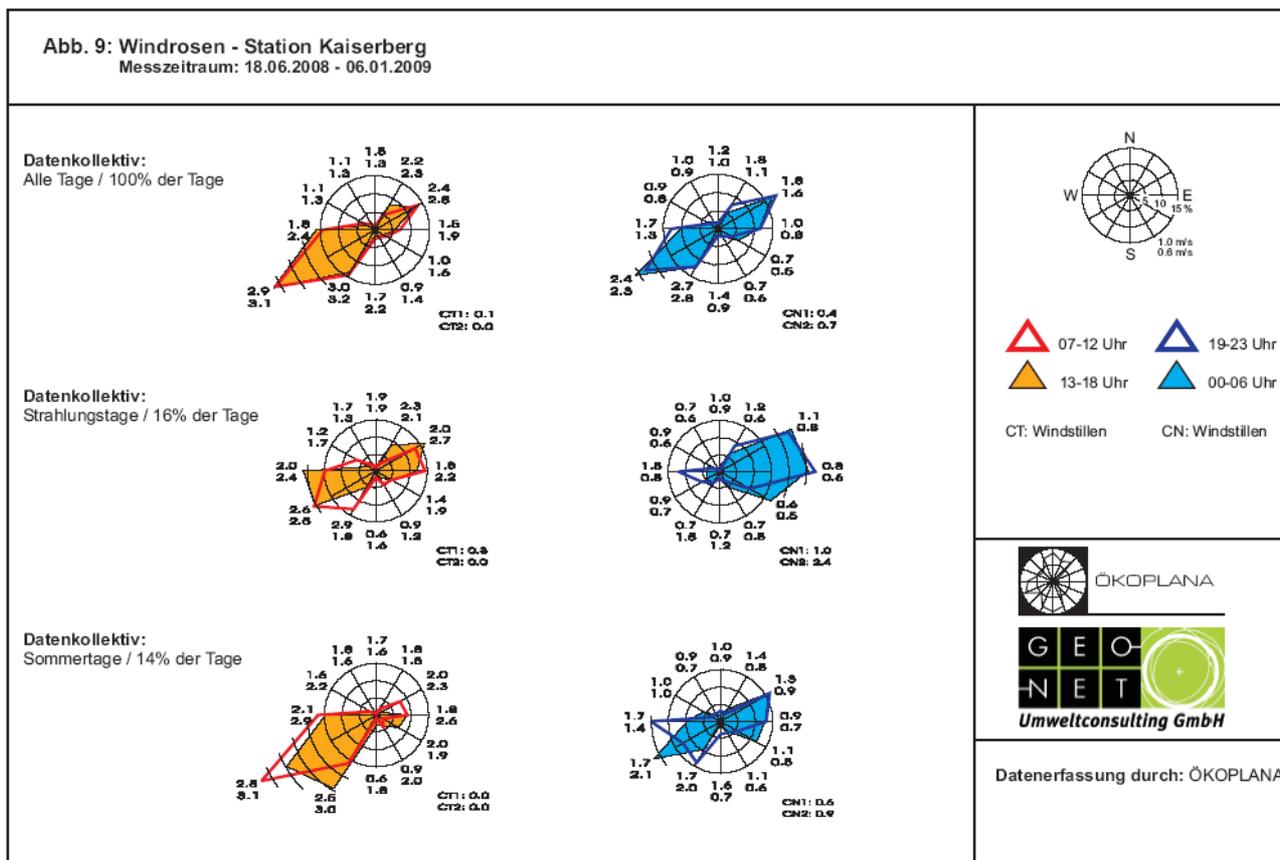
Die Station *Kaiserberg* (Abb. 9, S. 21) dient aufgrund ihrer Höhenlage als Basisstation für das großräumige Strömungsgeschehen und kann als vom Relief weniger stark beeinflusst angesehen werden.

Betrachtet man zunächst das Datenkollektiv „alle Tage“, so kann bilanziert werden, dass ca. 60% der am Tag gemessenen Windrichtungen in den südwestlichen bis westlichen Sektoren mit mittleren Geschwindigkeiten von 2.8 m/s liegen. Als Sekundärmaximum treten mit einer Häufigkeit von ca. 20% nordöstliche Luftströmungen mit mittleren Geschwindigkeiten von 2.5 m/s auf. Das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit liegt bei 2.5 m/s. Das für eine „Höhenstation“ recht niedrige Windgeschwindigkeitsmittel weist auf die Bedeutung stadinterner Ventilationszonen hin.

Unter dem Begriff Ventilation sind Vorgänge des Luftaustausches und der Frischluftzufuhr zu verstehen, die zum Abbau von bioklimatischen und lufthygienischen Belastungen beitragen. Dies geschieht aufgrund des Austausches oder der Durchmischung der mit negativen lokalen Eigenschaften behafteten Luftmassen sowohl durch solche, die auf dem Wege der Großzirkulation herangeführt als auch durch solche, die über klimaökologische Ausgleichsräume (vegetationsbedeckte Freiräume) herangeführt werden oder diesen ihre Entstehung verdanken. Für den Grad der Ventilation sind die Windgeschwindigkeit und die Luftschichtung von Bedeutung. Untersuchungen über die Verteilung von Schadstoffen im Bereich von ausgedehnten Siedlungen zeigen, dass mit einer ausreichenden weiträumigen Durchlüftung innerhalb der Bebauung erst bei Windgeschwindigkeiten über 3.0 m/s zu rechnen ist, wohingegen Luftströmungen unter 3.0 m/s zwar in

⁴ Die einzelnen Teilkreise entsprechen Häufigkeiten der Windrichtung (Halbstundenmittelwerte) von 5%, 10%, 15% usw., dabei deuten die Teilstriche der Windrose in die Richtung aus welcher der Wind weht (Teilstrich nach oben entspricht einem Nordwind, nach rechts einem Ostwind). Als weitere Information wurden die mittleren Windgeschwindigkeiten der 30-Grad-Richtungssektoren für die jeweiligen Tages- und Nachthälften aufgezeichnet.

die Bebauung eindringen, dort je nach Bebauungsdichte auch bis zum Boden durchgreifen, aber die mit lokalen Eigenschaften behaftete Luft nicht vollständig austräumen können, weshalb in diesem Falle von Belüftung zu sprechen ist.



Werden mit der Windgeschwindigkeit auch die Schichtungsverhältnisse berücksichtigt, so ergibt sich folgender Sachverhalt:

Durchlüftung ist der völlige Austausch lokaler Luftmassen durch reinere Luftmassen der höheren Atmosphäre, zurückzuführen auf Luftströmungen höherer Geschwindigkeit, die bis zum Boden durchgreifen. In kürzester Zeit können auf diese Weise lokal belastete Luftmassen durch Frischluft ersetzt werden. Voraussetzung ist vorwiegend indifferente bis labile Luftschichtung.

Belüftung ist die Durchmischung und horizontale Verlagerung lokal belasteter Luftmassen durch über klimaökologische Ausgleichsräume zuströmende Luftmassen geringerer Geschwindigkeit.

Der völlige Austausch lokal belasteter Luft kann nicht oder nur über einen längeren Zeitraum hinweg vonstatten gehen. Die Wirksamkeit ist lokal begrenzt. Voraussetzung ist vorwiegend indifferente bis stabile Luftschichtung (z.B. Bodeninversionen und abgehobene Inversionen).

Durch ein hohes städtisches Energiepotential kann im Zuge stabiler Luftschichtung eine räumlich begrenzte vertikale Durchmischung und ein räumlich begrenzter horizontaler Luftaustausch zwischen Freiland und Bebauung erfolgen.

In der Nacht ist eine leichte Zunahme nordöstlicher Windrichtungen zu verzeichnen (ca. 24% der Nachtstunden), was auf die Ausbildung einer nordöstlichen Regionalströmung in Richtung Kaiserslauterer Becken hindeutet (Ausgleichsströmung zwischen kühlen, bewaldeten Flächen und warmer städtischer

Bebauung). Die nächtliche mittlere Windgeschwindigkeit von nur 2.0 m/s weist auf großflächig ungünstige Ventilationsverhältnisse hin. Im Anhang sind die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen und der mittleren Windgeschwindigkeit an der Station Kaiserberg bei lokalklimatisch besonders relevanten Strahlungstagen⁵ dokumentiert.

Im Verlauf von lokalklimatisch relevanten Wetterlagen (Häufigkeit: ca. 16% der Tage im Untersuchungszeitraum 18.06.2008 – 06.01.2009) kommt es am Tag, infolge langandauernder Sonneneinstrahlung, zu auffällender Erwärmung und in der Nacht durch ungehinderte Ausstrahlung der Oberflächen zu starker Abkühlung der bodennahen Luftschichten mit intensiver Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen. Derartige Wetterlagen sind oft windschwach, wobei nächtliche Bodeninversionen entstehen, d.h. die Luft ist stabil geschichtet, der vertikale Luftaustausch ist behindert oder weitgehend unterbunden. Das Ventilationsgeschehen wird vermehrt von Lokal- und Regionalströmungen begrenzter Reichweite bestimmt, deren Existenz der Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen und der Kaltluftbewegung über die Hänge und Täler zu verdanken ist.

Den Richtungsverteilungen und Windgeschwindigkeitsmitteln an der Höhenstation *Kaiserberg* ist zu entnehmen, dass in den Hochlagen des Kernstadtgebietes tagsüber der vorherrschende Gradientwind das ortsspezifische Ventilationsgeschehen bestimmt. Im Verlauf der im Untersuchungszeitraum aufgetretenen lokalklimatisch relevanten Strahlungstage werden am Tag fast ausschließlich südwestliche bis westliche und nordöstliche bis östliche Luftströmungen mit mittleren Geschwindigkeiten von 2.2 m/s aufgezeichnet. Windgeschwindigkeiten über 3.0 m/s treten nur zu ca. 13% der Tagstunden auf.

Nach Sonnenuntergang nimmt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit sowie die Häufigkeit südwestlicher bis westlicher Windrichtungen an der Station *Kaiserberg* deutlich ab. Es dominieren nordöstliche bis ost-südöstliche Winde, die auf regionale Ausgleichströmungen zwischen Pfälzer Wald und der Kaiserslauterer Senke zurückzuführen sind. Das Windgeschwindigkeitsmittel beläuft sich auf ca. 0.9 m/s. Windgeschwindigkeiten über 3.0 m/s, die eine intensive bodennahe Durchlüftung ermöglichen, werden nur zu ca. 2% der Nachtstunden registriert.

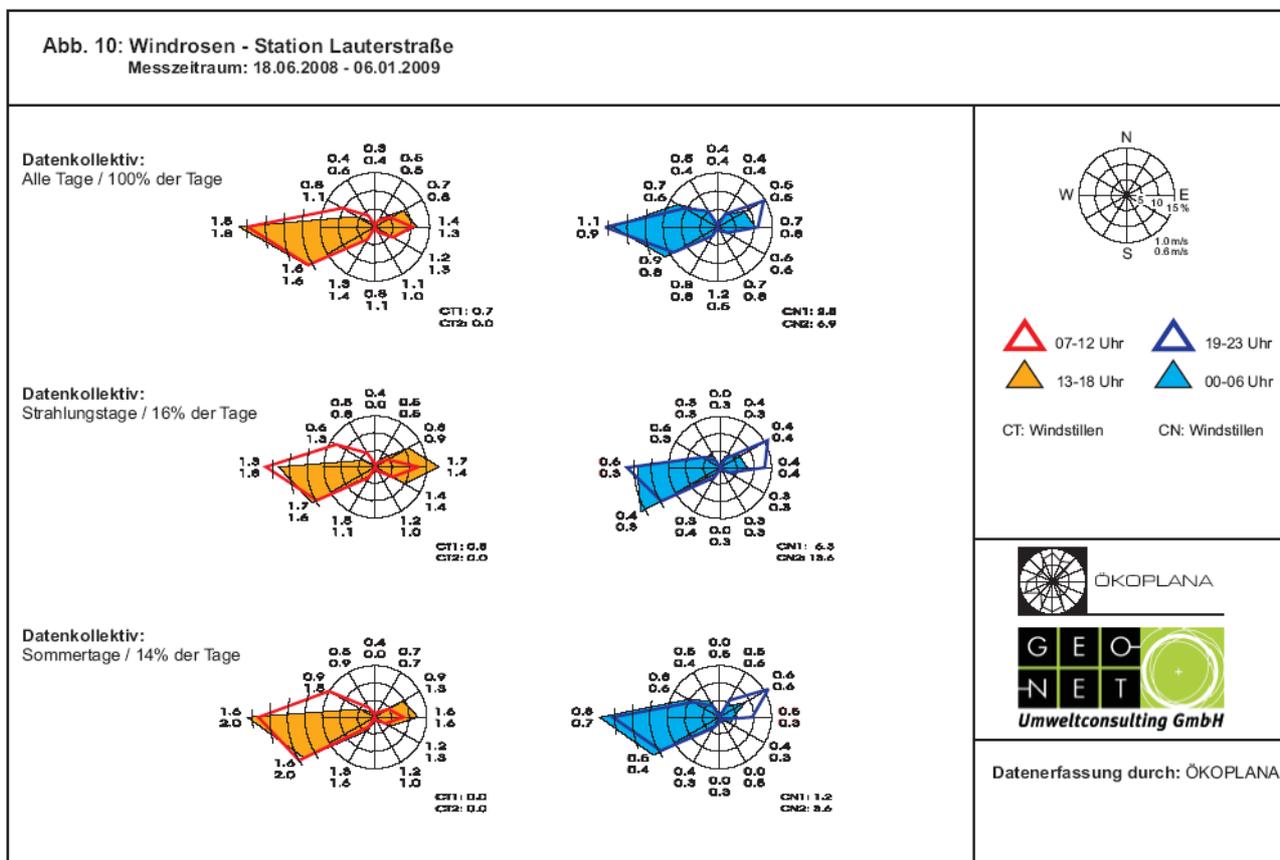
Schwache Windbewegungen herrschen auch an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) vor. An der Station *Kaiserberg* betrug die mittlere Windgeschwindigkeit nur 1.9 m/s. Zusammen mit hohen Lufttemperaturen ergibt sich hieraus eine hohe bioklimatische Belastung.

Im Lautertal unterhalb des Kaiserbergs (Station *Lauterstraße*) zeigt sich beim Datenkollektiv „alle Tage“ (Abb. 10, S. 23) am Tag der großwetterlagenbedingte Einfluss der vorherrschenden Höhenströmung, wobei südwestliche Luftströmungen reliefbedingt vermehrt zu westlichen Strömungsrichtungen umgelenkt werden. Die mittlere Windgeschwindigkeit erreicht einen Wert von 1.4 m/s, was gegenüber dem Wert an der Höhenstation *Kaiserberg* eine Reduktion von ca. 44% bedeutet.

Während an der Station *Kaiserberg* vor allem in Strahlungsnächten der Anteil südwestlicher Winde zugunsten nordöstlicher bis ost-südöstlicher Windrichtungen zurückgeht, dominieren an der Station *Lautertal* südwestliche bis westliche Luftströmungen (Abb. 10). Dies ist auf lokale kaltluftbedingte Strömungseffekte zurückzuführen. Zwischen dem Kulturzentrum Kammgarn und dem Stadtteil Engelshof kommt es in Strahlungsnächten vermehrt zu talaufwärts gerichteten Kaltluftbewegungen. Die über die vegetationsbedeckte Hangzone des Kaiserbergs und die Talzonen „Hammerwoog“ und Eselsbach ins

⁵ Strahlungstag - Gesamtbedeckungsgrad im Mittel aller Stunden des Gesamttagess $\leq 2/8$. Während der Nacht wird der Gesamtbedeckungsgrad von $4/8$ nicht überschritten. Am Tag treten nur bis zu 3 Stunden thermisch bedingt Quellwolken bis zu einem Gesamtbedeckungsgrad von $6/8$ auf.

Lautertal zuströmende Kaltluft staut sich im Stadtteil Engelshof/A 6 vermehrt auf und strömt flurwindartig vermehrt in südliche bis südöstliche Richtung. Die Kaltluftzufuhr sorgt zwar örtlich für rasche abendliche Abkühlung (→ bioklimatischer Positiveffekt), durch die geringen Windgeschwindigkeiten (mittlere Windgeschwindigkeit unter 0.5 m/s) besteht jedoch lokal die Gefahr von Luftschadstoffakkumulationen (→ lufthygienischer Negativeffekt).



Die Station *SRS* beschreibt das Strömungsgeschehen im Umfeld des ehemaligen Eisenbahnausbesserungswerkes Kaiserslautern. Die einzelnen Datenkollektive zeigen (Abb. 11, S. 24), dass sowohl am Tag als auch in der Nacht südwestliche bis westliche und ostnordöstliche bis ost-südöstliche Luftströmungen das örtliche Windfeld bestimmen. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt am Tag ca. 2.1 m/s und in der Nacht ca. 1.4 m/s (Datenkollektiv „alle Tage“). Die Bahnlinie sowie die Pariser Straße fungieren bei diesen Windrichtungen als Strömungsleitbahnen, über welcher überregionale und regionale Winde bodennah durchgreifen können. Ein markanter Einfluss lokaler Kaltluftzuflüsse über die südlich angrenzende Hangzone wird nicht registriert.

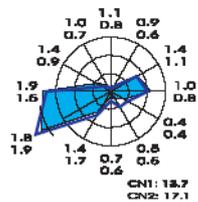
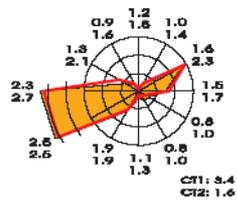
Der Kreuzungsbereich Brandenburger Straße/Trippstadter Straße (Station *Brandenburger Straße* – Abb. 12, S. 24) zeigt sich im Allgemeinen gut belüftet. Die mittlere Windgeschwindigkeit erreicht mit ca. 2.4 m/s fast den Wert der Station *Kaiserberg*, wobei auch hier im Allgemeinen südwestliche und nordöstliche Windrichtungen überwiegen. Die noch unbebauten Flächen südwestlich des Stationsstandortes (vgl. Abb.5, S. 8) fungieren als innerstädtische Ventilationsbahn.

Nach Sonnenuntergang zeigt sich besonders an Strahlungstagen der Einfluss lokaler Kaltluftabflüsse aus dem Staatsforst Kaiserslautern-West, wobei die Trippstadter Straße und Hoheneckerstraße als Kaltluftabflussbahnen funktionieren. Die Kaltluftabflüsse erreichen am Stationsstandort mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 0.5 und 1.0 m/s.

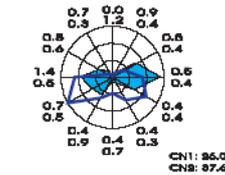
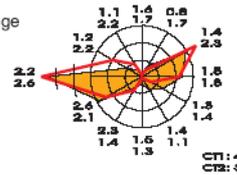
Abb. 11: Windrosen - Station SRS

Messzeitraum: 18.06.2008 - 06.01.2009

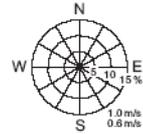
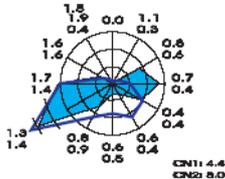
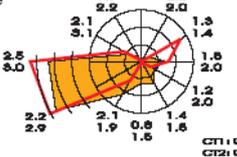
Datenkollektiv:
Alle Tage / 100% der Tage



Datenkollektiv:
Strahlungstage / 16% der Tage



Datenkollektiv:
Sommertage / 14% der Tage



07-12 Uhr 19-23 Uhr
 13-18 Uhr 00-06 Uhr
 CT: Windstillen CN: Windstillen



ÖKOPLANA



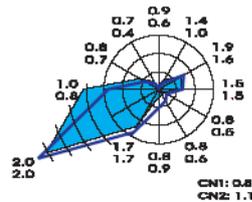
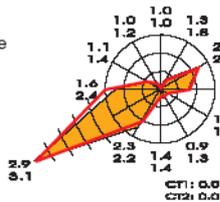
Umweltconsulting GmbH

Datenerfassung durch: ÖKOPLANA

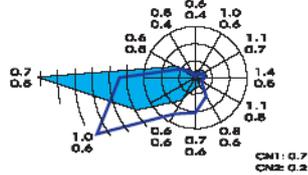
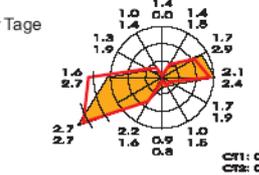
Abb. 12: Windrosen - Station Brandenburger Straße

Messzeitraum: 18.06.2008 - 06.01.2009

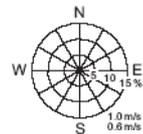
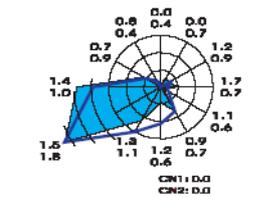
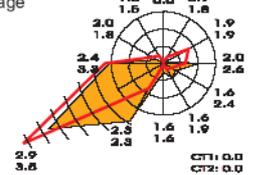
Datenkollektiv:
Alle Tage / 100% der Tage



Datenkollektiv:
Strahlungstage / 16% der Tage



Datenkollektiv:
Sommertage / 14% der Tage



07-12 Uhr 19-23 Uhr
 13-18 Uhr 00-06 Uhr
 CT: Windstillen CN: Windstillen



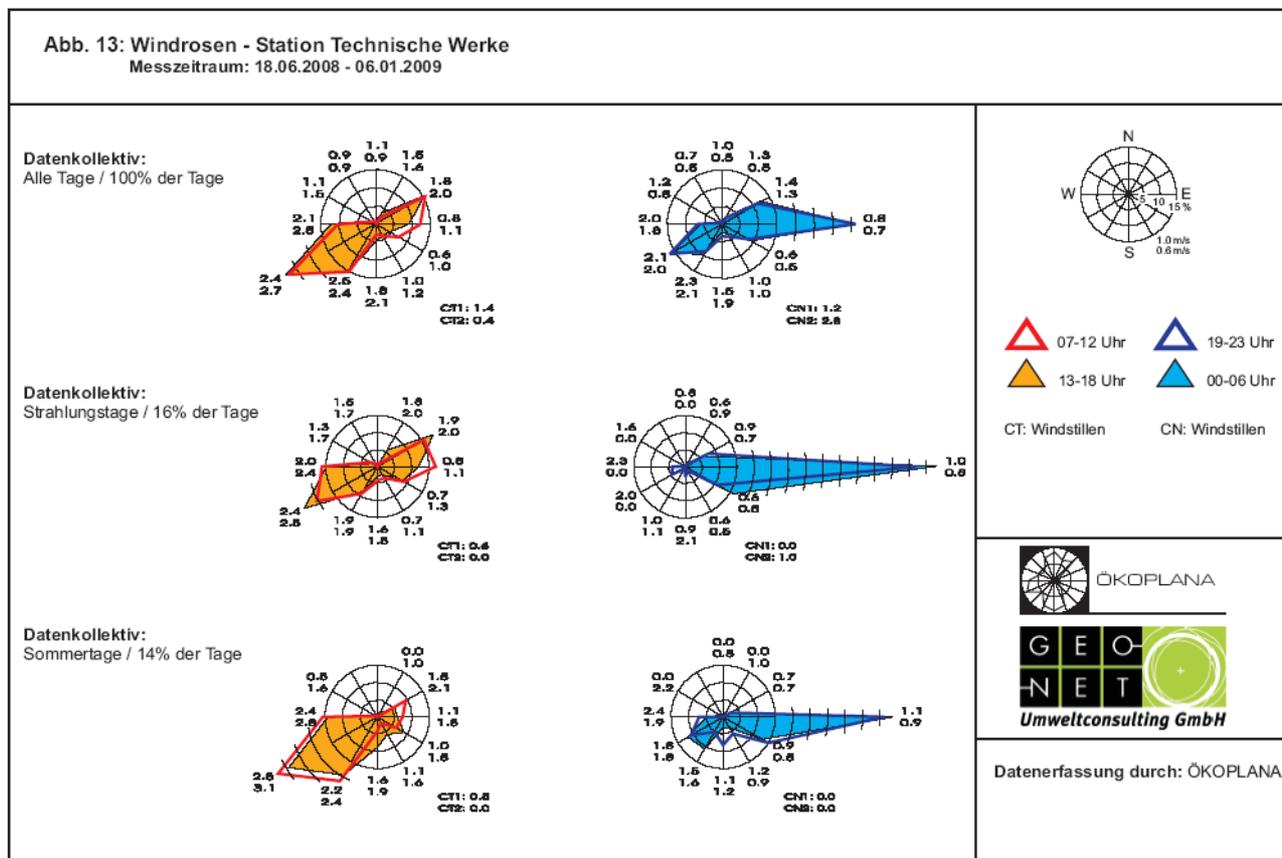
ÖKOPLANA



Umweltconsulting GmbH

Datenerfassung durch: ÖKOPLANA

Die Station *Technische Werke* (Abb. 13) beschreibt das Strömungsgeschehen im Übergangsbereich Lautertal-Ost/Kaiserslautern Innenstadt. Am Tag herrschen in allen Datenkollektiven südwestliche bis westliche und nordöstliche bis östliche Winde vor. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug im Untersuchungszeitraum am Tag 1.9 m/s. Eine intensive Durchlüftung ist mit derart geringen Windgeschwindigkeiten nicht möglich.



Nach Sonnenuntergang ist besonders im Datenkollektiv „Strahlungstage“ eine auffallende Häufung von Ostwinden zu beobachten, die auf lokale Kaltluftzuflüsse über das Lautertal zurückzuführen sind. Sie bestimmen nahezu ausschließlich das nächtliche Luftaustauschgeschehen. Die mittlere Windgeschwindigkeit der zufließenden Kaltluft schwankt zwischen 0.8 und 1.1 m/s. Talparallele Straßenzüge sowie der Volkspark bilden dabei wichtige Kaltluftzugbahnen.

4.2.2 Thermische Situation und Ventilation bei klimaökologisch relevanten Wetterlagen - vergleichende Darstellung ausgewählter Tagesgänge der Lufttemperatur und des Windes

Das Verhalten der Lufttemperatur in Abhängigkeit von Relief, Flächennutzung und Strömungsgeschehen ist ein Indiz für die Funktion des horizontalen und vertikalen Luftaustausches.

Zur Beurteilung der Temperaturverteilung und des lokalen, kleinräumigen Strömungsgeschehens in den nicht durch feste Messstationen abgedeckten Bereichen des Kernstadtgebietes wurden Temperaturmessfahrten durchgeführt, in deren Verlauf die Lufttemperatur kontinuierlich registriert wurde. Auf die Ergebnisse wird in Kap. 4.3 näher eingegangen. Mit Hilfe von Fesselballonaufstiegen und Rauchpatronenversuchen wurde das vertikale Temperatur- und Windprofil erfasst.

Bei klimaökologisch relevanten Wetterlagen (ca. 25 - 30% der Tage im Jahr - langjähriges Mittel) ergeben sich im Untersuchungsraum lokalklimatische Differenzierungen. Typisch für diese Situationen ist, dass sich in der Bebauung verminderte Ventilation und durch die Aufheizung von Baukörpern und befestigten Flächen starke Erwärmung der Luft und Wärmestaus (→ Tendenz zu bioklimatischen Belastungen) einstellen. Nach Sonnenuntergang kommt es hingegen zu intensiver Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen und zur Ausbildung stabiler Luftschichtung (Bodeninversionen).

Sowohl bei Tag als auch verstärkt in der Nacht stellen sich im Kernstadtgebiet relief- und flächennutzungsbedingt Temperaturunterschiede ein, wobei zur Zeit der nächtlichen Abkühlungsphase zwischen kühleren und wärmeren Bereichen Temperaturunterschiede bis über 9°C auftraten (Isothermenkarte vom 01./02.07.2008 – Abbildung 37, S. 47).

Die thermische Situation und das Ventilationsgeschehen im Stadtgebiet wird durch verschiedene Strömungssysteme bestimmt. Während die thermische Situation und das Strömungsgeschehen im Bereich von Talzonen und Hangeinschnitten (z.B. Lautertal, Eselsbachtal und Aschbachtal) von Talabwinden, gerichteten Kaltluftströmungen bzw. flächenhaften Kaltluftabflüssen geprägt wird, ergeben sich für die höhergelegenen Bereiche über regionale und überregionale Luftströmungen klimatische Positiveffekte.

Zur Verdeutlichung der klimaökologischen Funktionsabläufe werden nachfolgend zunächst für die Stationsstandorte mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur für klimaökologisch relevante Strahlungstage dargestellt. Im Zuge einer vertiefenden Analyse erfolgt anschließend eine Diskussion ausgewählter Tagesgänge der Lufttemperatur und des Windes. Aus den Tagesgängen lässt sich das ortsspezifische Verhalten von Lufttemperatur und Strömungsgeschehen entnehmen, wobei die ventilationsfördernde Wirkung der lokalen Luftströmungen im Freiland und in der Bebauung offenbar wird.

4.2.2.1 Mittlere Tagesgänge der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit

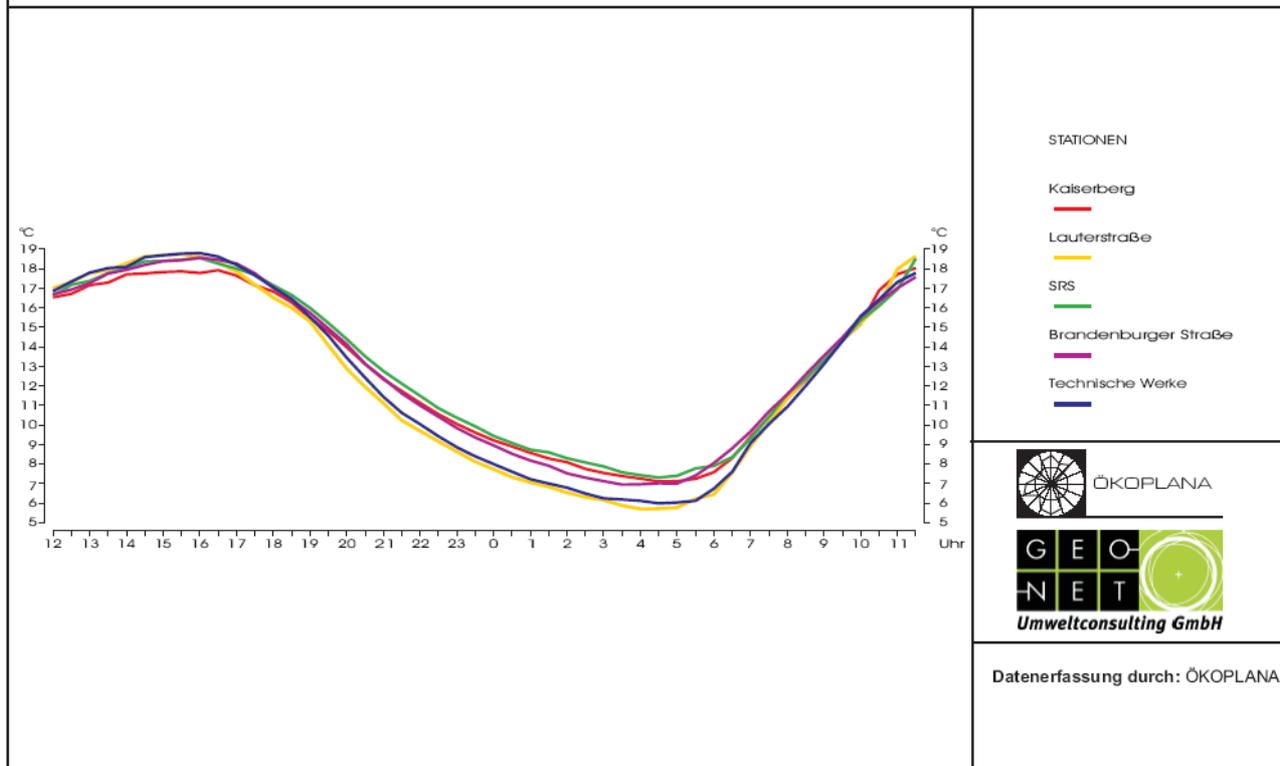
Nachfolgend werden die mittleren Tagesgänge der Lufttemperatur bei hochdruckbeeinflussten Wetterlagen (Strahlungstage) für den Untersuchungszeitraum 18.06.2008 – 06.01.2009 dargestellt (Abb. 14, S. 27).

Die Erwärmung beginnt nach Sonnenaufgang und erreicht ihr Maximum zwischen 15:00 Uhr und 16:00 Uhr. Die dabei gegenüber dem Sonnenhöchststand verzögerte maximale Erwärmung ist darauf zurückzuführen, dass das Maximum der Energiebilanz der Oberfläche nach Sonnenhöchststand eintritt und sich infolgedessen die Erwärmung der dem Boden aufliegenden Luft auch noch danach fortgesetzt.

Bereits vor Sonnenuntergang setzt die Abkühlung ein, diese ist in der ersten Nachthälfte am stärksten. Das Temperaturminimum wird an allen Stationen kurz vor Sonnenaufgang gemessen. Im Detail ergeben sich z.T. auffallende Unterschiede zwischen den einzelnen Messstationen. Die thermische Situation steht in enger Beziehung zum Relief und zur Flächennutzung. Besonders in den Sommermonaten ist die Aufheizung fester Materialien (Bebauung) und deren Wärmespeicherung (am Tag) bzw. Wärmeabgabe (in der Nacht) beträchtlich. Vegetationsbedeckte Flächen stellen sich aufgrund der höheren Verdunstung bzw. der Transpiration der Pflanzen und des damit verbundenen Wärmeverbrauchs thermisch günstiger dar.

Die Ventilation hat in Form des vertikalen und horizontalen Luftaustausches wesentlichen Einfluss auf das thermische Geschehen. Intensive Ventilation führt z.B. in der Bebauung zur Durchmischung örtlicher Warmluft mit kühleren Luftmassen aus den Freiräumen oder aus der höheren Atmosphäre. Verminderte Ventilation hat hingegen, z.B. im Sommer, bei hoher Einstrahlung sowohl in der Bebauung als auch im Freiland Hitzestaus zur Folge.

Abb. 14: Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur / Strahlungstage 18.06.2008 - 06.01.2009



Wie die mittleren Tagesgang zeigen, ergeben sich am Tag zwischen den einzelnen Stationsstandorten nur geringer thermische Unterschiede. Das höchste Temperaturmaximum zeigt die Station *Technische Werke* (18.8°C). An den Stationen *Lauterstraße*, *SRS* und *Brandenburger Straße* werden Höchstwerte zwischen 18.5 und 18.7°C gemessen. Die mittlere Andauer an Lufttemperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ lag im Untersuchungszeitraum an Sommertagen zwischen 5.2 und 5.7 Std. (Abb. 15).

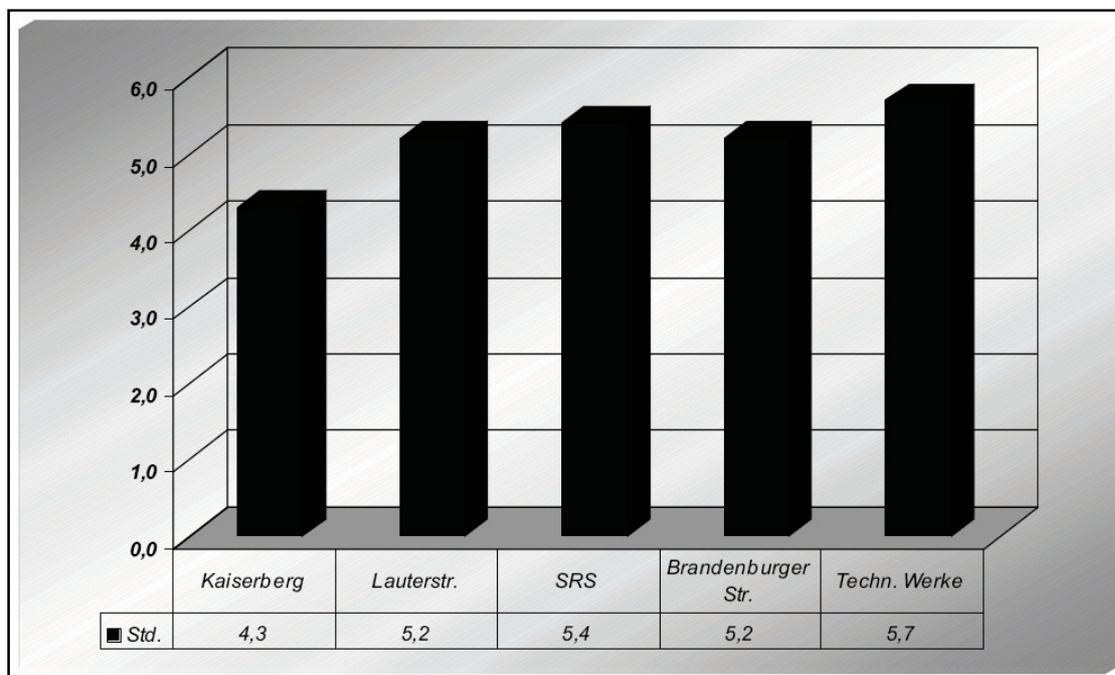


Abb. 15: Andauer von Lufttemperaturen $\geq 25^\circ$ an Sommertagen (Messzeitraum 18.06.08 bis 06.01.09)

Die niedrigste Tageshöchsttemperatur an der Station *Kaiserberg* - 18.0°C - erklärt sich durch die Höhenlage. In der freien Atmosphäre nimmt die Lufttemperatur mit der Höhe im Durchschnitt um etwa 0.6°C pro 100 m ab (geometrische Zustandskurve). Die mittlere Andauer an Lufttemperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ lag im Untersuchungszeitraum an Sommertagen am Standort *Kaiserberg* nur bei 4.3 Std. Nach den Lufttemperaturmaxima zwischen 15:00 Uhr und 16:00 Uhr (u.a. abhängig von der Besonnungsdauer) stellt sich deutliche Abkühlung ein. Besonders an den Stationen *Lauterstraße* und *Technische Werke* ist ein vergleichsweise steiler Temperaturabfall zu beobachten (siehe auch Abb. 16 – abendliche Abkühlung). Dies ist auf einsetzende Kaltluftbewegungen im Lautertal zurückzuführen und bewirkt auch innerhalb der angrenzenden Bebauung ein rasches Abklingen thermischer Belastungen.

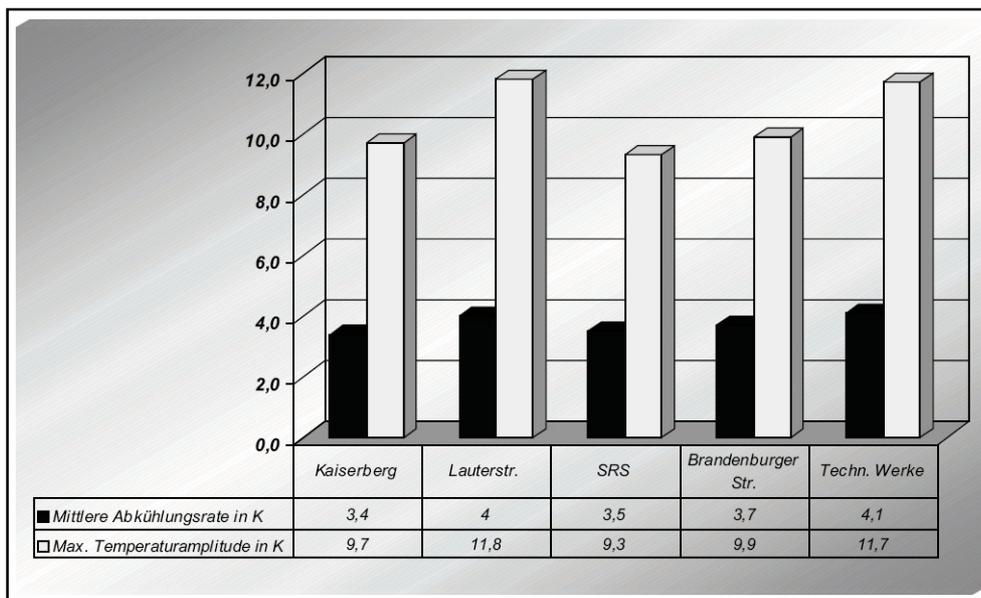


Abb. 16:
Abendliche
Abkühlungsrate
(Messzeitraum
18.06.08 bis 06.01.09)

Die Stationen *SRS* und *Brandenburger Straße* zeigen hingegen einen leicht gedämpften Temperaturabfall. Hier fehlt die intensive abkühlende Wirkung direkt einwirkender lokaler Kaltluftbewegungen. Auffallend ist auch die vergleichsweise gedämpfte Abkühlung am *Kaiserberg*. Hier zeigt sich deutlich der für Strahlungswetterlagen typische Aufbau einer nächtlichen Bodeninversion (mit der Höhe zunehmende Lufttemperatur). Wie Abbildung 17 dokumentiert, konnte im Untersuchungszeitraum an ca. 55% der Nachtstunden die Ausbildung einer Bodeninversion (= stabile Luftschichtung) aufgezeichnet werden.

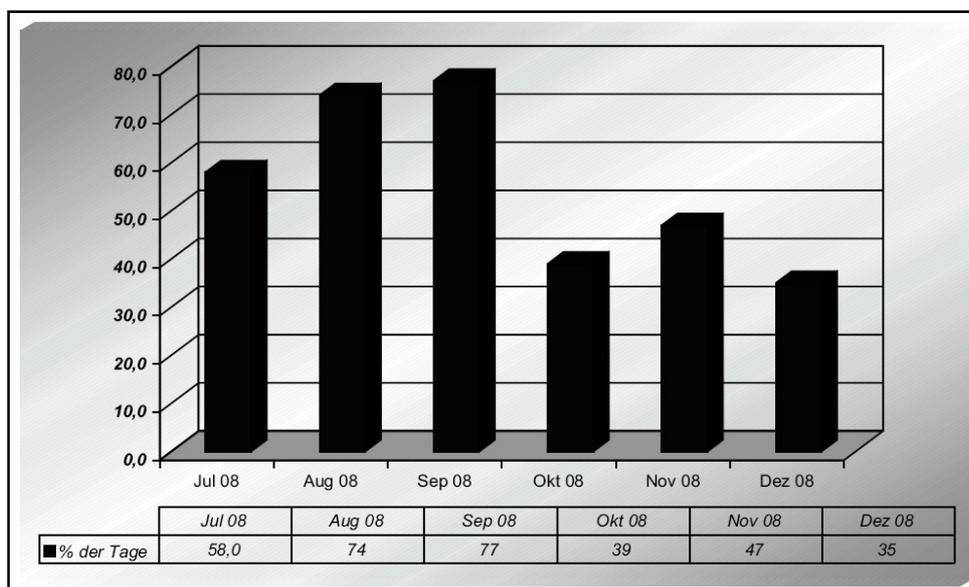


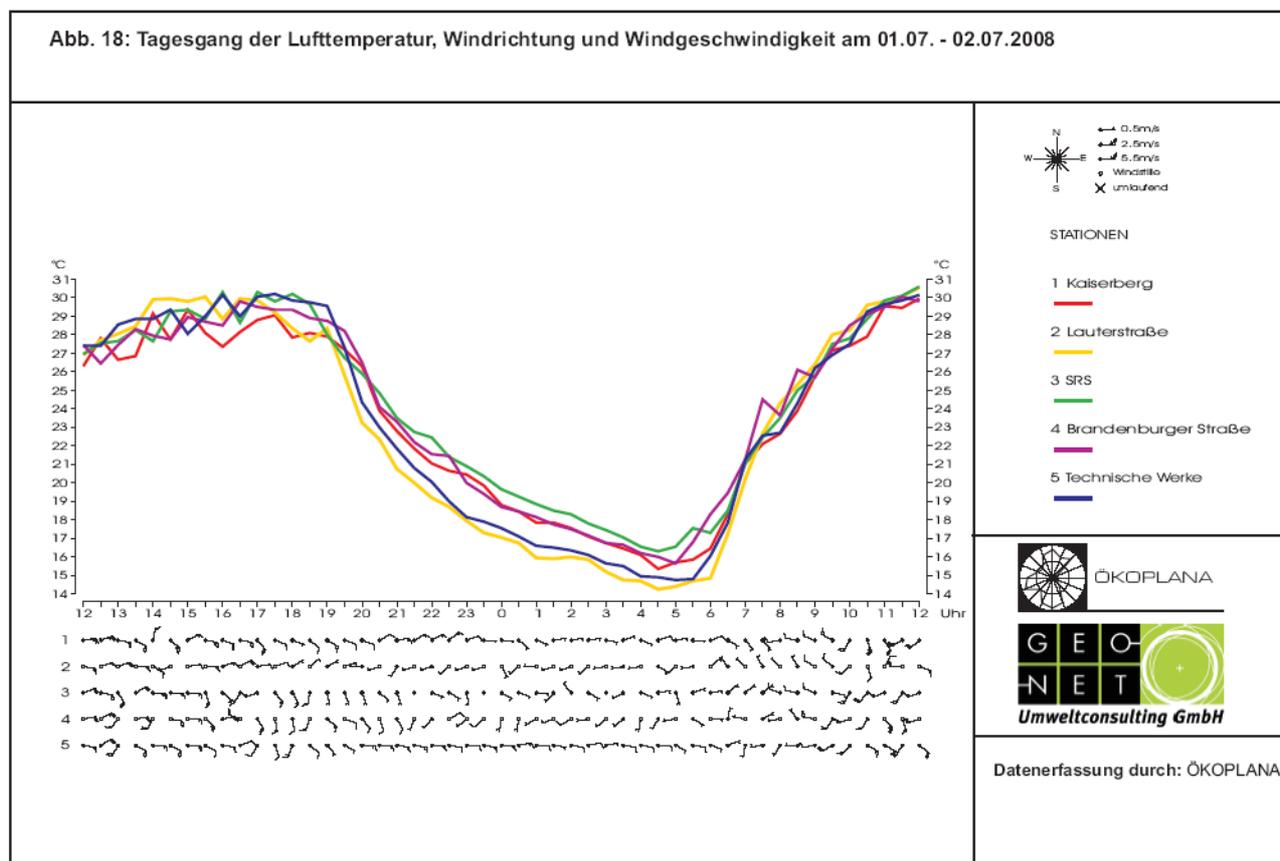
Abb. 17:
Nächtliche Inversions-
häufigkeit
(Messzeitraum 18.06.08
bis 06.01.09)

4.2.2.2 Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 01.-02.07.2008 – östlicher Gradientwind

Wetterablauf: Unter dem Einfluss einer antizyklonalen Westlage (Wa) ist es am Tag sonnig bis heiter (max. Bedeckungsgrad 4/8). In den Abendstunden löst sich die Bewölkung auf und auch in den Nachtstunden ist es nahezu wolkenlos. Es stellen sich die für Strahlungs Nächte typischen lokalen/regionalen Klimaerscheinungen ein.

Abbildungen 18⁶: Am Tag stellen sich entsprechend der großräumigen Luftdruckverteilung an allen Stationsstandorten vorwiegend Winde aus östlichen Richtungssektoren ein, die mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 1.5 und 2.5 m/s erreichen.

Zwischen 17:00 Uhr und 20:00 Uhr flaut der Wind zunehmend und schon gegen 20:00 Uhr setzt eine auffallende Veränderung im Strömungsgeschehen ein. Die Kaltluftproduktion vegetationsbedeckter Flächen und der durch die nächtliche Ausstrahlung bedingte Aufbau einer Bodeninversion führen zunehmend zu einem von der vorherrschenden Höhenströmung entkoppelten Ventilationsgeschehen.



Während an der Station *Kaiserberg* in den Nachtstunden regional angelegte Winde aus östlichen Richtungssektoren das örtliche Ventilationsgeschehen bestimmen, setzt im Lautertal unterhalb des Kaiserbergs (Station *Lauterstraße*) eine schwache westliche Luftströmung ein.

⁶ (Zeichenerklärung: Die Windfahnen weisen in die Richtung, aus welcher der Wind kommt; ganzer Teilstrich = 1.0 m/s, halber Teilstrich = 0.5 m/s.)

Durch das hohe Kaltluftangebot im Lautertal südlich der A 6 bzw. im Bereich Engelshof (u.a. durch Kaltluftzuflüsse aus den Taleinschnitten „Hammerwoog“, Eselsbach) entwickeln sich im Bereich des Neumühleparks stadteinwärts gerichtete, flurwindartige Lokalwinde, die aufgrund ihrer geringen Strömungsgeschwindigkeit (unter 1.0 m/s) im Bereich der angrenzenden Bebauung jedoch nur geringe Belüftungseffekte bewirken.

Am Stationsstandort SRS westlich der Wohnsiedlung Bahnheim kommt es in den Nachtstunden vermehrt zu Stagnationserscheinungen. Die am Kaiserberg zu registrierende östliche Regionalströmung kann aufgrund der vorherrschenden Inversion nur schubartig bodennah durchgreifen. Lokale Kaltluftabflüsse aus der südlichen Hangzone (Siedlung Belzappel) sind nicht zu verzeichnen.

Das Luftaustauschgeschehen am Stationsstandort *Brandenburger Straße* wird nach Sonnenuntergang vorwiegend vom Einfluss lokaler Kaltluftabflüsse aus dem Staatsforst Kaiserslautern-West bestimmt, wobei die Trippstadter Straße und Hoheneckerstraße als Kaltluftabflussbahnen funktionieren. Die Kaltluftabflüsse erreichen am Stationsstandort mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 0.5 und 1.0 m/s.

An der Station *Technische Werke* im Übergangsbereich Lautertal-Ost/Kaiserslautern Innenstadt zeigt sich in der Nacht deutlich der Einfluss lokaler Kaltluftzuflüsse über das Lautertal. Sie erreichen mittlere Windgeschwindigkeiten bis 1.5 m/s, wobei die vorherrschenden östliche Regionalströmungen (siehe Station Kaiserberg) für zusätzliche Bewegungsimpulse sorgen.

Zwischen 06:00 und 07:00 Uhr kommen die kaltluftbedingten Lokal- und Regionalwinde zum Erliegen und das Strömungsgeschehen wird wieder von den großwetterlagenbedingten Gradientwinden bestimmt. Deutliche räumliche Differenzierungen ergeben sich auch hinsichtlich der Lufttemperaturverteilung.

Am Tag (01.07.) werden zwischen den einzelnen Stationsstandorten aufgrund der standortspezifischen Flächennutzung sowie der unterschiedlichen Besonnungs- und Beschattungsverhältnisse und Höhenlagen Temperaturunterschiede bis zu ca. 4.0°C registriert. Die höchsten Werte werden gegen 16:00 Uhr mit 30.5°C an der Station SRS gemessen. Hier machen sich die großflächig asphaltierten Stellflächen im Stationsumfeld bemerkbar, die sich bei intensiver Sonneneinstrahlung stark aufheizen (Oberflächentemperaturen bis über 40°C).

Vergleichbar hohe Lufttemperaturen (30.4, 30.0 bzw. 29.8°C) sind an den Stationsstandorten *Technische Werke*, *Lauterstraße* und *Brandenburger Straße* zu verzeichnen. Auch hier machen sich die versiegelten Oberflächen (Stellflächen/Straße mit Bushaltestelle) thermisch negativ bemerkbar.

Etwas kühler stellt sich die Station *Kaiserberg* dar. Durch die freixponierte Lage (→ intensivere bodennahe Belüftung) und die angrenzenden Vegetationsbestände ist die Aufheizung am Tag leicht reduziert. Das Temperaturmaximum beträgt 29.3°C.

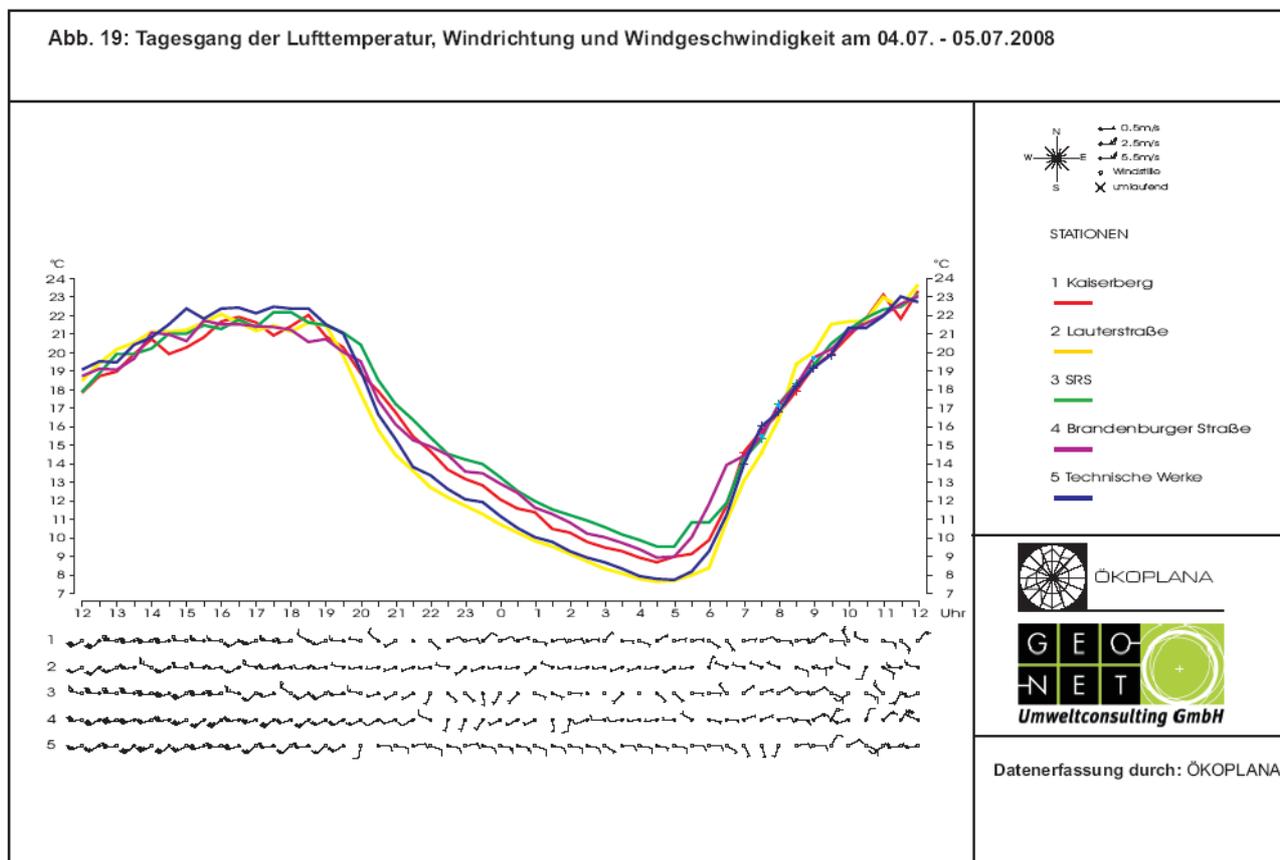
Bereits vor Sonnenuntergang setzt an allen Stationen die Abkühlung ein. Es kommt zur Ausbildung einer Bodeninversion (stabile Luftschichtung), wobei die Lufttemperatur mit der Höhe zunimmt. Gegen 23:00 Uhr stellt sich beispielsweise zwischen der Talstation *Lauterstraße* und der Höhenstation *Kaiserberg* ein positiver Temperaturgradient von ca. 2.8°C ein.

In Hangeinschnitten und Tälern, die als Kaltluftammel- und Kaltluftabflussbereiche funktionieren, ist die nächtliche Abkühlung besonders intensiv. Die niedrigsten Temperaturen werden, bedingt durch die ungehinderte Ausstrahlung im Allgemeinen über Wiesen und Ackerflächen gemessen.

Niedrigste Lufttemperaturen werden an den Stationen *Lauterstraße* und *Technische Werke* gemessen, die sich im Einflussbereich von Talkaltluft (Lautertal) befinden. Deutlich geringere nächtliche Abkühlungsraten ergeben sich an der Station *SRS*. Hier bewirkt die hohe Wärmekapazität großflächig asphaltierter Stellflächen sowie der fehlende Einfluss lokaler Kaltluftströme eine deutlich gedämpfte nächtliche Abkühlung.

4.2.2.3 Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 04.-05.07.2008 - westlicher Gradientwind

Wetterablauf: Die am Tag vorherrschende Bewölkung löst sich am Abend auf und in der Nacht ist es nur leicht bewölkt. Kaltluftbedingte Lokalströmungen können sich ausbilden. Erst am Morgen zieht wieder dichtere Bewölkung auf. Die nachfolgend dargestellten Tagesgänge geben das Klimageschehen an Tagen mit kräftiger westlicher Höhenströmung wieder (Abb. 19). Die Ergebnisse belegen, dass sich als Folge ungehinderter nächtlicher Ausstrahlung auch an Tagen mit kräftigem Westwind die ortstypischen regionalen und lokalen Windsysteme ausbilden können.



Während bspw. an der Station *Kaiserberg* in den Nachtstunden östliche Regionalwinde vorherrschen, dominieren im Lautertal unterhalb des Kaiserbergs (Station *Lauterstraße*) schwache westliche Kaltluftbewegungen, die eine intensive nächtliche Abkühlung bewirken. Auch im Bereich der Station *Technischen Werke* dokumentieren die Wind- und Temperaturaufzeichnungen den lokalen Einfluss von Talabwinden im Lautertal östlich der Kaiserslauterer Innenstadt. An der Station *Brandenburger Straße* wird ebenfalls der Einfluss von Kaltluftzuflüssen aus dem Staatsforst Kaiserslautern-West registriert, die abkühlende Wirkung ist durch die südlich vorgelagerte Bebauung der Universität jedoch bereits deutlich reduziert.

4.2.3 Kleinaerologische Messungen im Stadtgebiet von Kaiserslautern

Aus der Verteilung des Luftdrucks resultiert die Druckgradientströmung, der geostrophische Wind. Diese ungestörte Strömung ist erst in Höhen von 1000 bis 1500 m über Grund festzustellen. Die zwischen dieser Höhe und der Bodenoberfläche liegende Schicht wird planetarische Grenzschicht genannt, deren vertikale Erstreckung im wesentlichen von der Bodenrauigkeit, der thermischen Schichtung und der Windgeschwindigkeit abhängt.

Stabile Luftschichtung, geringe Windgeschwindigkeit und geringe Durchmischung können den Einfluss der Flächennutzung auf wenige Dekameter der unteren Atmosphäre beschränken. Innerhalb dieser wenig mächtigen Grenzschicht, die keinen oder nur einen begrenzten Luftaustausch des bodennächsten Luftraumes mit der höheren Atmosphäre zulässt, können lokale oder regionale Ausgleichsströmungen entstehen. Voraussetzung ist hierfür der Aufbau stabiler Luftschichtung.

Im Mittel nimmt die Lufttemperatur in der Atmosphäre mit der Höhe um ca. $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (geometrische Zustandskurve) bzw. um 1.0°C (adiabatische Zustandskurve) ab. Dieser Zustand lässt Austauschvorgänge und somit eine Durchmischung von Luftverunreinigungen zu. In besonderen Fällen kann jedoch die Lufttemperatur mit der Höhe gleich bleiben (Isothermie) oder zunehmen (Inversion), es stellt sich stabile Schichtung ein.

Entsprechend dem Grad der Abweichung von der mittleren Temperaturschichtung (geometrische Zustandskurve) werden Austauschvorgänge abgeschwächt oder unterbunden. Emissionen breiten sich dann bei Bodeninversionen (Inversion beginnt ab der Bodenoberfläche) in einer laminaren Strömung unterhalb der Inversionsobergrenze, bei abgehobenen Inversionen (Inversion beginnt erst in einer bestimmten Höhe über der Bodenoberfläche) unterhalb der Inversionsuntergrenze mit der dort vorherrschenden Luftströmung aus.



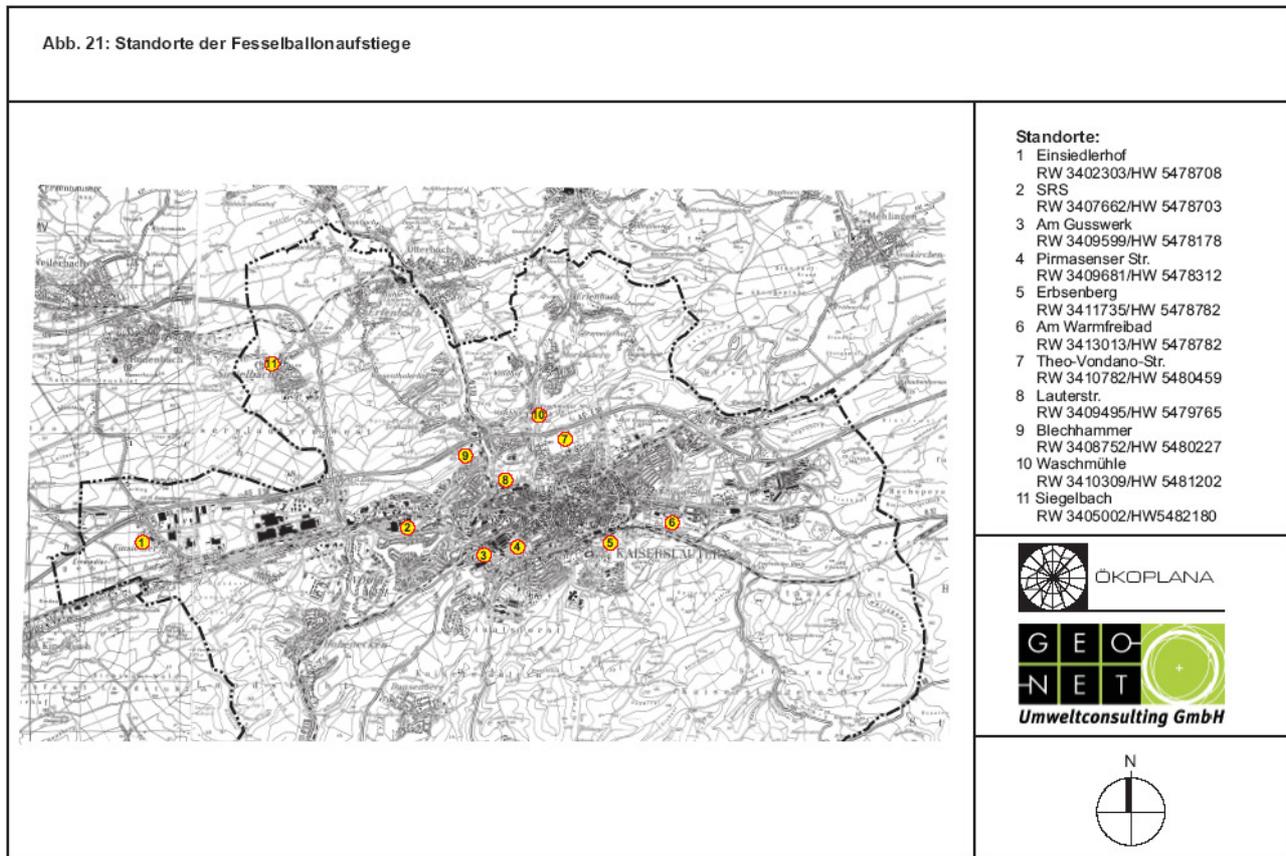
Abb. 20: Fesselballon mit Messsonde

Der am häufigsten vorkommende Typ der dem Boden aufliegenden Strahlungsinversion (Bodeninversion) entsteht bei schwachgradientigen (schwachwindig) Strahlungswetterlagen, in deren Verlauf sich nach Sonnenuntergang die bodennahe Luft aufgrund der Ausstrahlung der Erdoberfläche abkühlt. Über geneigtem Gelände fließt dabei die relativ schwere bodennahe Kaltluft dem Gefälle folgend ab, wobei lokal begrenzte Strömungen entstehen, wie z.B. Hangab- und Talabwinde.

Zur Erfassung der vertikalen Mächtigkeit lokaler Kaltluftbewegungen wurden an ausgewählten Standorten Fesselballonaufstiege und Rauchschwaden-beobachtungen (Abb. 20; Abb. 21, S. 33) durchgeführt. Hierbei wurden die Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung ermittelt. Die Fesselballonaufstiege wurden aus Gründen der Flugsicherung) auf max. 80 m ü.G. begrenzt.

Der Darstellung und Interpretation der kleinaerologischen Untersuchungen geht eine Beschreibung der zur Zeit der Vertikalsondierungen herrschenden klimatischen Situation voran, wobei Tagesgänge der Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit diskutiert werden.

Abb. 21: Standorte der Fesselballonaufstiege



4.2.3.1 Vertikalsondierungen am 01.-02.07.2008

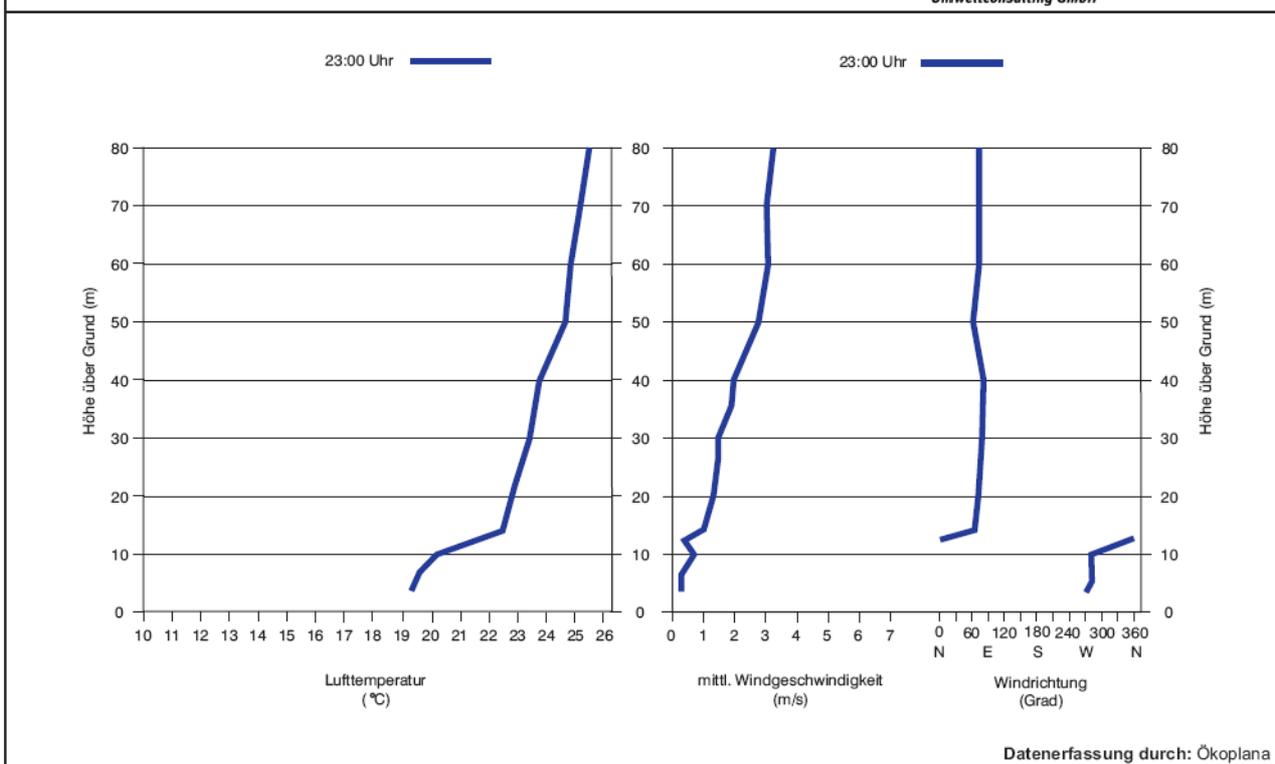
Wie in Kap. 4.2 bereits erwähnt, kommt es in der Messnacht unter dem Einfluss einer antizyklonalen Westlage im Untersuchungsgebiet zur Ausbildung lokaler Strömungssysteme, die für die Durch- bzw. Belüftung der Bebauung von hoher Bedeutung sind.

Standort 1 / Einsiedlerhof (Abb. 22, S. 34):

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse des Fesselballonaufstiegs am Standort Einsiedlerhof (westlich der Weilerbacher Straße im westlichen Stadtgebiet von Kaiserslautern). Gegen 23:00 Uhr werden bis ca. 10 m ü.G. extrem schwache westliche Luftbewegungen ($< 0.5 \text{ m/s}$) gemessen, die auf flurwindartige Ausgleichsströmungen zwischen dem kühlen Einsiedlerbruch und dem wärmeren Gewerbegebiet Einsiedlerhof zurückzuführen sind. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit und der eng begrenzten vertikalen Mächtigkeit sind die Kaltluftbewegungen sehr empfindlich gegenüber Strömungshindernissen in Form von Hochbau oder dichten Gehölzstreifen.

Oberhalb von 10 m ü.G. dreht der Wind über Nord zu ostnordöstlichen Richtungen, die regionalen bzw. überregionalen Luftströmungen zuzuordnen sind. Die lokale Kaltluftströmung aus dem Einsiedlerbruch macht sich auch deutlich im vertikalen Temperaturverlauf bemerkbar. Infolge ungehinderter Ausstrahlung (Bedeckungsgrad 0/8) kühlen die bodennächsten Luftpolster intensiv ab, so dass sich schon kurz nach Sonnenuntergang eine Bodeninversion ausbilden kann. Zwischen 3 m ü.G. und 13 m ü.G. steigt die Lufttemperatur von 19.2°C auf 22.5°C an. An der Messobergrenze (80 m ü.G.) werden Lufttemperaturen von 25.4°C registriert.

Abb. 22: Fesselballonaufstiege am 01.07.2008 - Standort 1 / Einsiedlerhof



Standort 2 /SRS (Abb. 23):

Bei den Fesselballonaufstiegen im Bereich des ehemaligen Eisenbahnausbesserungswerkes Kaiserslautern werden in Bodennähe (0 – 7 m ü.G.) stark schwankende Windrichtungsverteilungen beobachtet. Kurzzeitig auftretenden westlichen Winden (Windgeschwindigkeit ca. 0.3 m/s) stehen regional/überregional angelegte östliche Winde entgegen, die immer wieder bodennah durchgreifen. Ein prägnanter Einfluss lokaler Strömungssysteme kann somit nicht beobachtet werden.

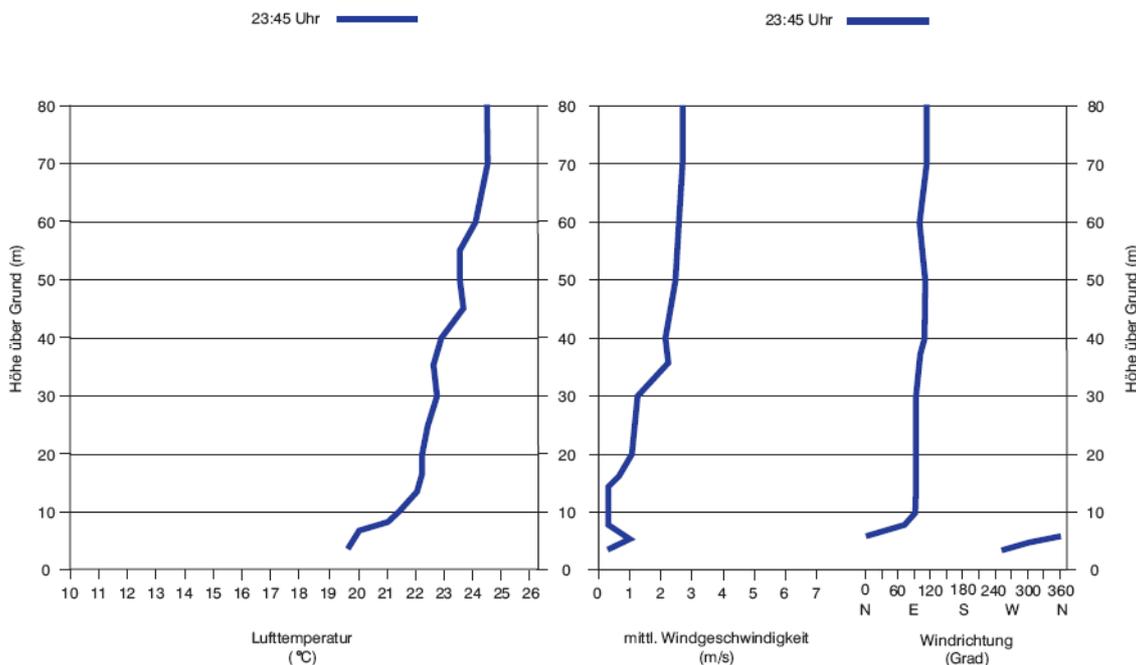
Ähnlich wie am Standort Einsiedlerhof kann auch hier anhand der vertikalen Lufttemperaturverteilung der Aufbau einer Bodeninversion registriert werden. Zwischen 5 m ü.G. und 80 m ü.G. nimmt die Lufttemperatur um ca. 4.7°C zu.

Standort 3 / Am Gusswerk (Abb. 24):

Der Standort Am Gusswerk beschreibt das örtliche Windfeld südwestlich der Pfaff-Werke. Wie die Windrichtungsverteilung zeigt, kann gegen 00:15 Uhr bis in ca. 15 m ü.G. deutlich der Einfluss von Kaltluftströmungen aus dem Hangeinschnitt entlang der Hohenecker Straße gemessen werden. Die Lokalströmung erreicht mittlere Windgeschwindigkeiten bis ca. 1.0 m/s. Der Eisenbahndamm nördlich des Aufstiegsstandortes kann noch überströmt werden.

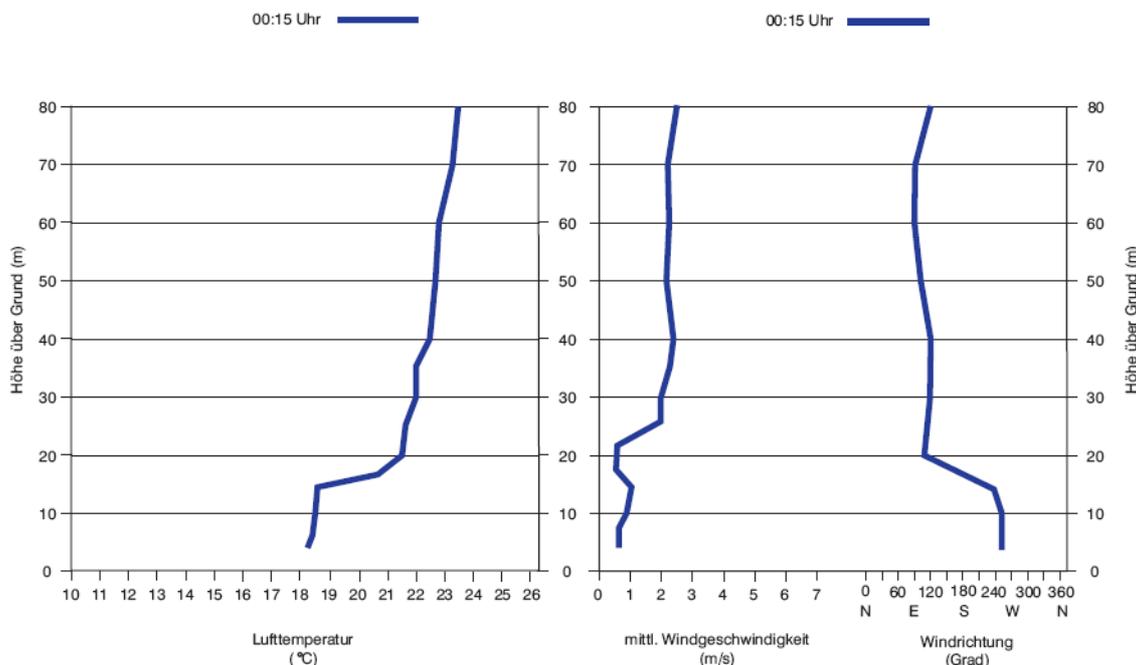
Innerhalb dieser Kaltluftschicht werden Lufttemperaturen von 18.3 – 18.6°C registriert. Oberhalb von 15 m ü.G. dreht der Wind zu östlichen Richtungen, was mit einem deutlichen Anstieg der Lufttemperatur verbunden ist. Die thermische Gunstwirkung der kaltluftbedingten Lokalströmung wird offenbar.

Abb. 23: Fesselballonaufstiege am 01.07.2008 - Standort 2 / SRS



Datenerfassung durch: Ökoplane

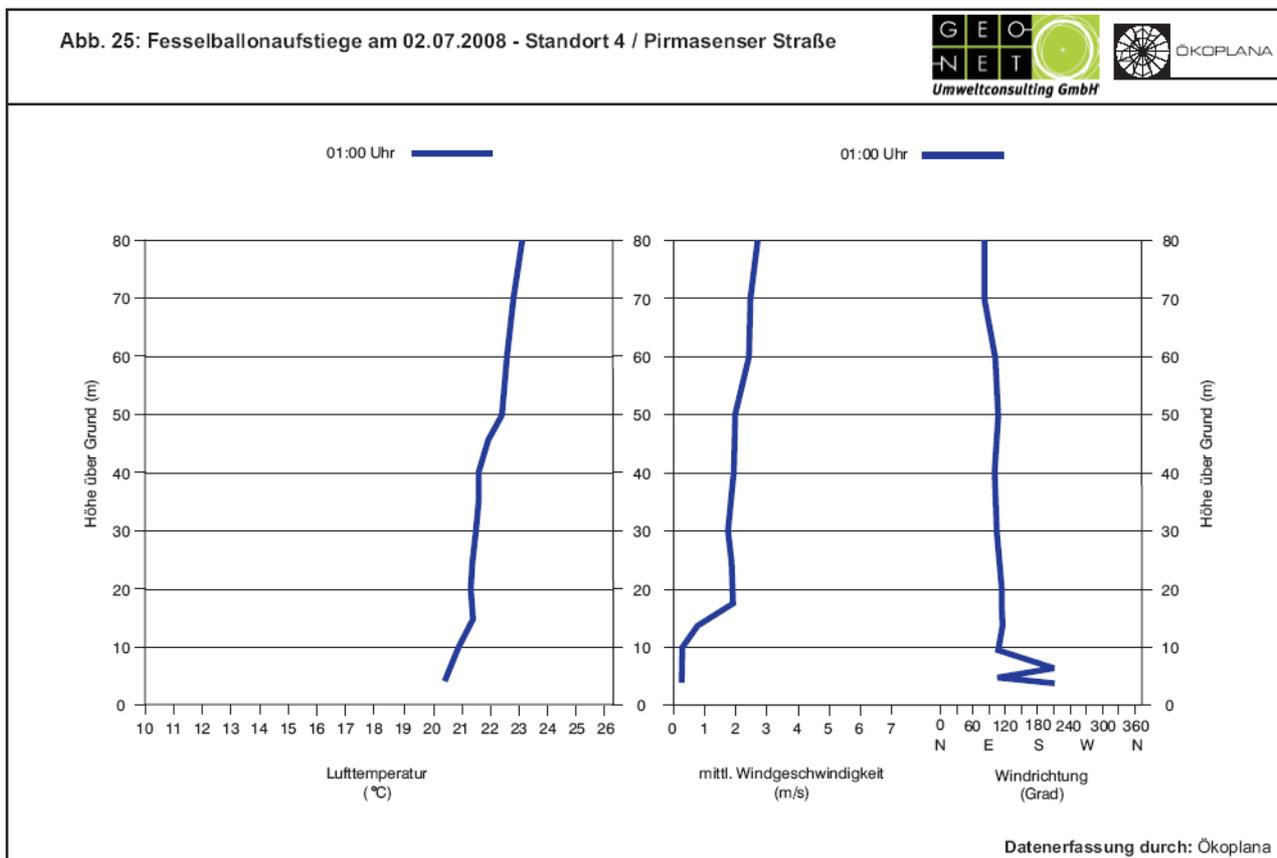
Abb. 24: Fesselballonaufstiege am 02.07.2008 - Standort 3 / Am Gusswerk



Datenerfassung durch: Ökoplane

Standort 4 / Pirmasenser Straße (Abb. 25):

Am Waschplatz einer Tankstelle in der Pirmasenser Straße zeigt sich noch zeitweise der Einfluss der Kaltluftströmung entlang der Hohenecker Straße (bis ca. 7 m ü.G.). Die Strömungsgeschwindigkeit ist im Lee des Bahndamms jedoch sehr gering und auch die abkühlende Wirkung des Kaltluftstroms ist bereits deutlich reduziert. Die Gunstwirkung der Lokalströmung wird somit in Richtung Stadtzentrum durch den Bahndamm erheblich gestört.



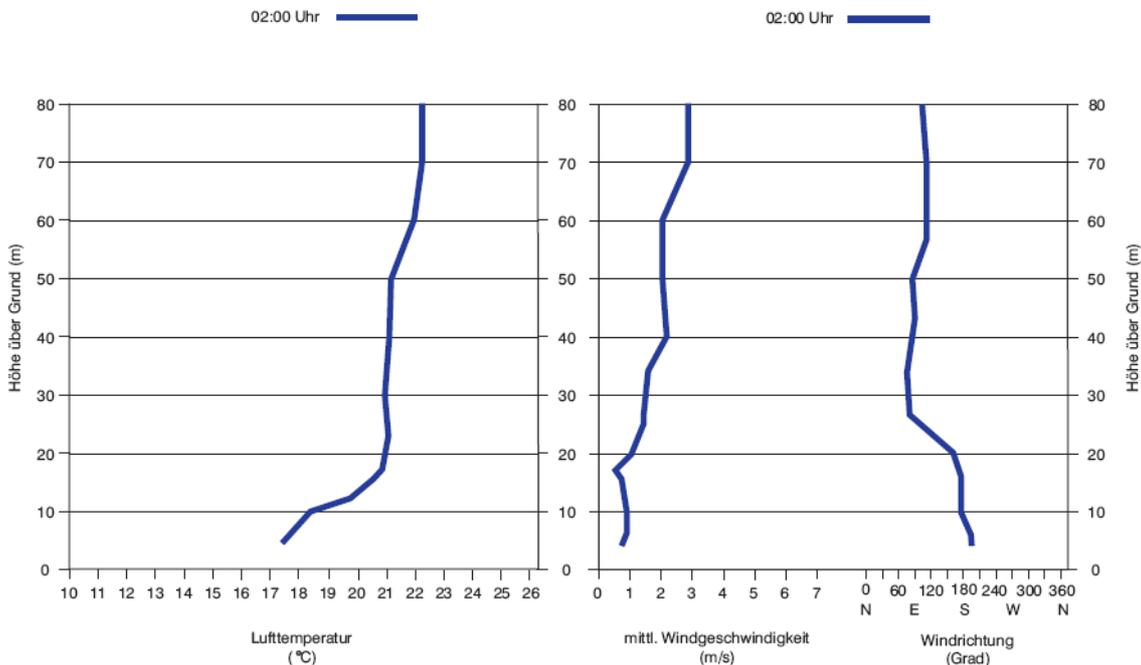
Standort 5 / Erbsenberg:

Im Bereich des Hangeinschnittes Erbsenberg östlich des Fritz-Walter-Stadions zeigt sich gegen 02:00 Uhr bis in eine Messhöhe von 20 m ü.G. eine schwache südliche Luftströmung, die auf autochthone Kaltluftströmungen und Führungseffekte des Reliefs zurückzuführen ist (Abb. 26, S. 37). Der schmale Hangeinschnitt fungiert als Kaltluftammel- und Kaltluftabflussbereich. Aufgrund seines eng begrenzten Kaltlufteinzugsgebiets mit der Bebauung Betzenberg bleiben die hiervon ausgehenden thermischen Positiveffekte (→ rasche abendliche Abkühlung) im Wesentlichen auf die Bebauung südlich der Barbarossastraße begrenzt.

Standort 6 / Am Warmfreibad:

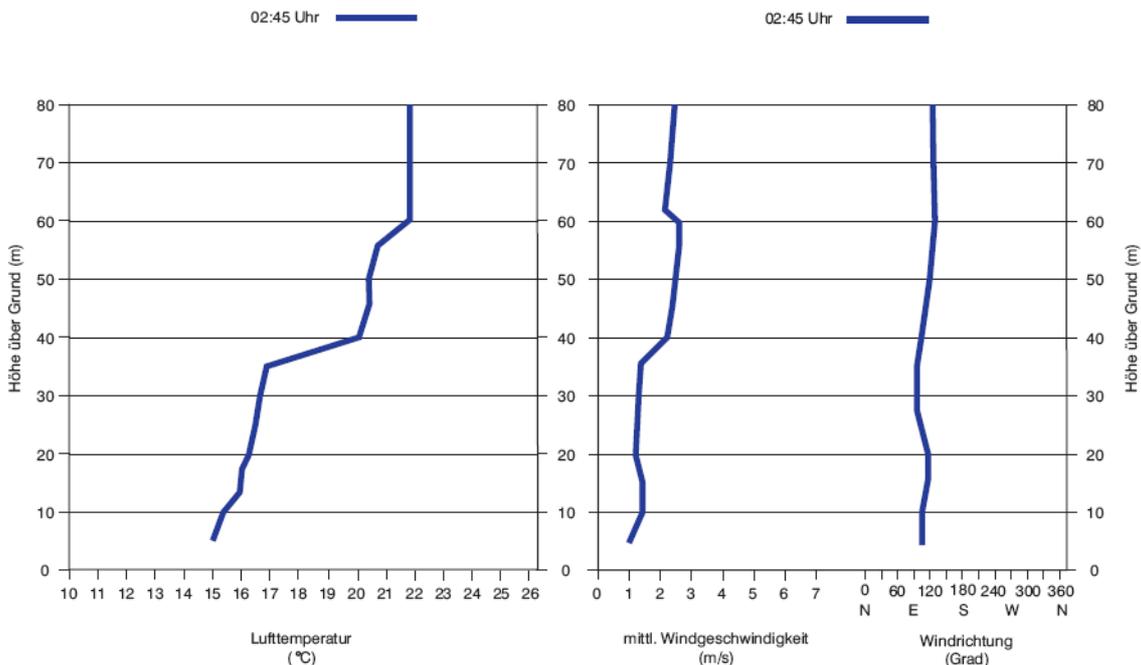
Wie bereits die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station *Technische Werke* gezeigt hat, funktioniert das Lautertal entlang der Entersweilerstraße nach Sonnenuntergang als Kaltluftammel- und Kaltluftabflussgebiet, über welchem sich am 02.07.2008 (02:45 Uhr) ein ca. 35 m mächtiger Kaltluftstrom entwickeln kann (Abb. 27, S. 37). Dies wird durch den vertikalen Verlauf der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit dokumentiert. Der Kaltluftstrom hebt sich mit seinen kühleren Luftmassen deutlich von der wärmeren östlichen Höhenströmung ab, die oberhalb von 35 m ü.G. das Strömungsgeschehen bestimmt.

Abb. 26: Fesselballonaufstiege am 02.07.2008 - Standort 5 / Erbsenberg



Datenerfassung durch: Ökoplane

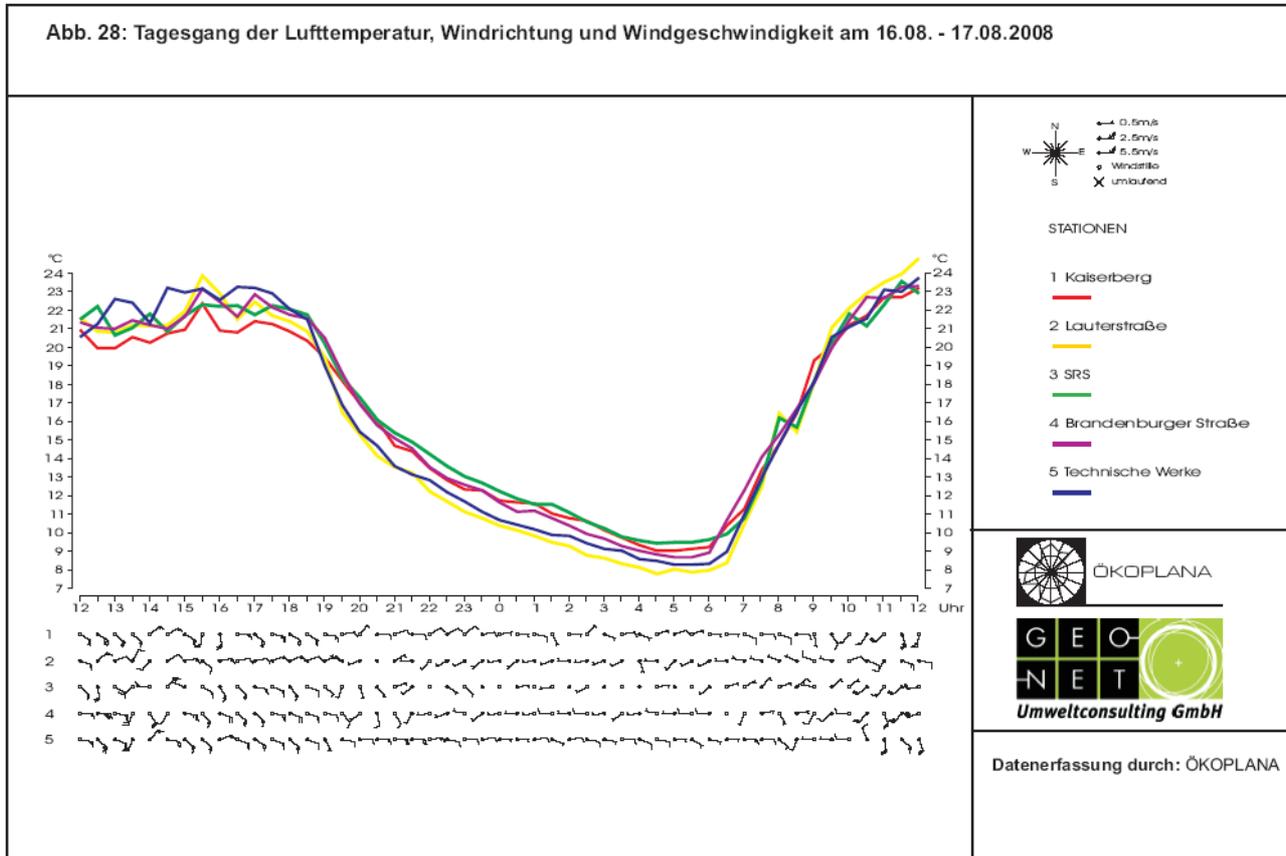
Abb. 27: Fesselballonaufstiege am 02.07.2008 - Standort 6 / Am Warmfreibad



Datenerfassung durch: Ökoplane

4.2.3.2 Rauchschwadenbeobachtungen am 16.-17.08.2008

Den Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 16.-17.08.2008 bei einem südöstlichen Gradientwind zeigt Abb. 28:



Großwetterlage: Trog über Mitteleuropa (TrM)

Wetterablauf: Tagsüber ist es heiter bis wolzig. Am Abend lösen sich die Wolkenfelder weitgehend auf, so dass bodennah Kaltluftentstehen kann. In der zweiten Nachthälfte ziehen wieder vermehrt Wolkenfelder auf

Tagsüber stellen sich entsprechend der großräumigen Luftdruckverteilung an der Höhenstationen *Kaiserberg* vorwiegend südöstliche Luftströmungen ein, die mittlere Geschwindigkeiten bis 3.0 m/s erreichen. An den übrigen Stationsstandorten überwiegen ebenfalls schwache südöstliche bis östliche Luftströmungen

In den Nachtstunden werden an der Station *Kaiserberg* konstant schwache Winde aus östlichen Richtungssektoren registriert, die auf regionale Strömungsprozesse zwischen Pfälzer Wald und der Kaiserslauterer Senke zurückzuführen sind. Im Lautertal unterhalb des Kaisersbergs zeichnet die Station *Lauterberg* nach 19:00 Uhr westliche bis südwestliche Winde auf. Dies deutet darauf hin, dass bodennahe Kaltluft aus dem Lautertal zwischen Neumühlepark und dem Stadtteil Engelshof flurwindartig zuströmt.

Lokale Kaltluftbewegungen bestimmen auch an den Stationen *Brandenburger Straße* (Kaltluftabfluss aus der südlichen Hangzone) und *Technische Werke* (Kaltluftzustrom über das östliche Lautertal) das ortsspezifische Strömungsgeschehen. Im Bereich der Station *SRS* tritt in den Nachtstunden vorwiegend Stagnation (Windstille) auf.

Zwischen den einzelnen Messstationen ergeben sich am Tag Temperaturunterschiede bis ca. 2.6°C. Das Temperaturmaximum (23.8°C) stellt sich gegen 15:30 Uhr an der Station *Lauterstraße* ein. Nach 18:30 Uhr setzt allgemein rascher Temperaturrückgang ein.

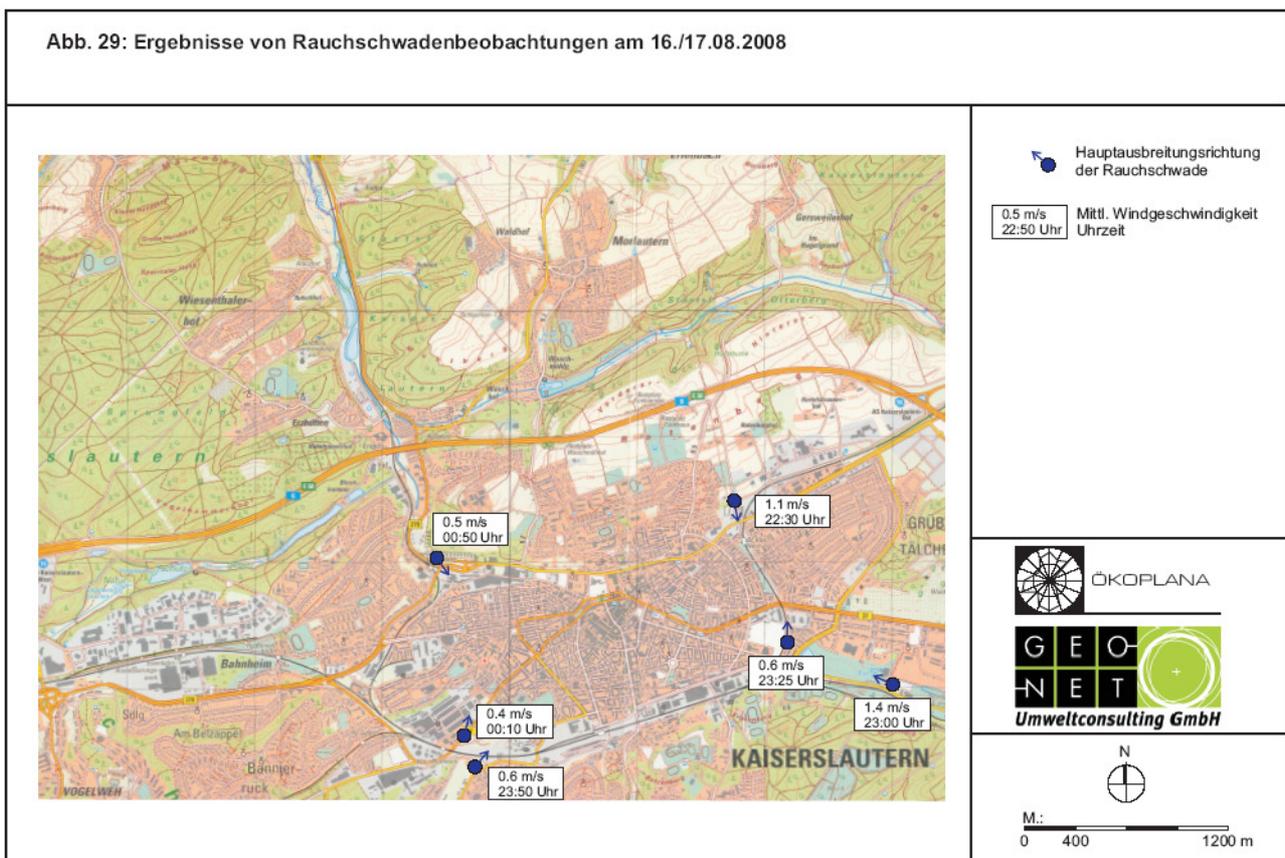
Die Bildung bodennaher Kaltluft über den vegetationsbedeckten Flächen führt vor allem in den Kaltluftammel- und Kaltluftabflussbereichen (z.B. Lautertal) zu intensiver Abkühlung. Als Folge der sich entwickelnden Bodeninversion nimmt die Lufttemperatur mit der Höhe zu, so dass sich in der Nacht zwischen der Höhenstation *Kaiserberg* und dem Messstandort *Lauterstraße* im Lautertal ein positiver Temperaturgradient bis ca. 2.0°C einstellt.

Rauchschwadenbeobachtungen

Mit Hilfe von Rauchtabletten und einem Hitzdrahtanemometer wurden an ausgewählten Standorten im Kaiserslauterer Stadtgebiet lokale Kaltluftbewegungen erfasst. Die Ergebnisse sind in Abb. 29 dargestellt.

Gegen 22:30 Uhr wird im Hangeinschnitt Baalborner Weg ein steter Kaltluftabfluss nach Süden registriert. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt im Mittel ca. 1.1 m/s. Wie bereits Untersuchungen von ÖKOPLANA im Jahr 2007 gezeigt haben, reicht die abkühlende Wirkung der Hangkaltluft über die Mainzer Straße hinweg bis in den Bereich Nordbahnstraße.

Abb. 29: Ergebnisse von Rauchschwadenbeobachtungen am 16./17.08.2008



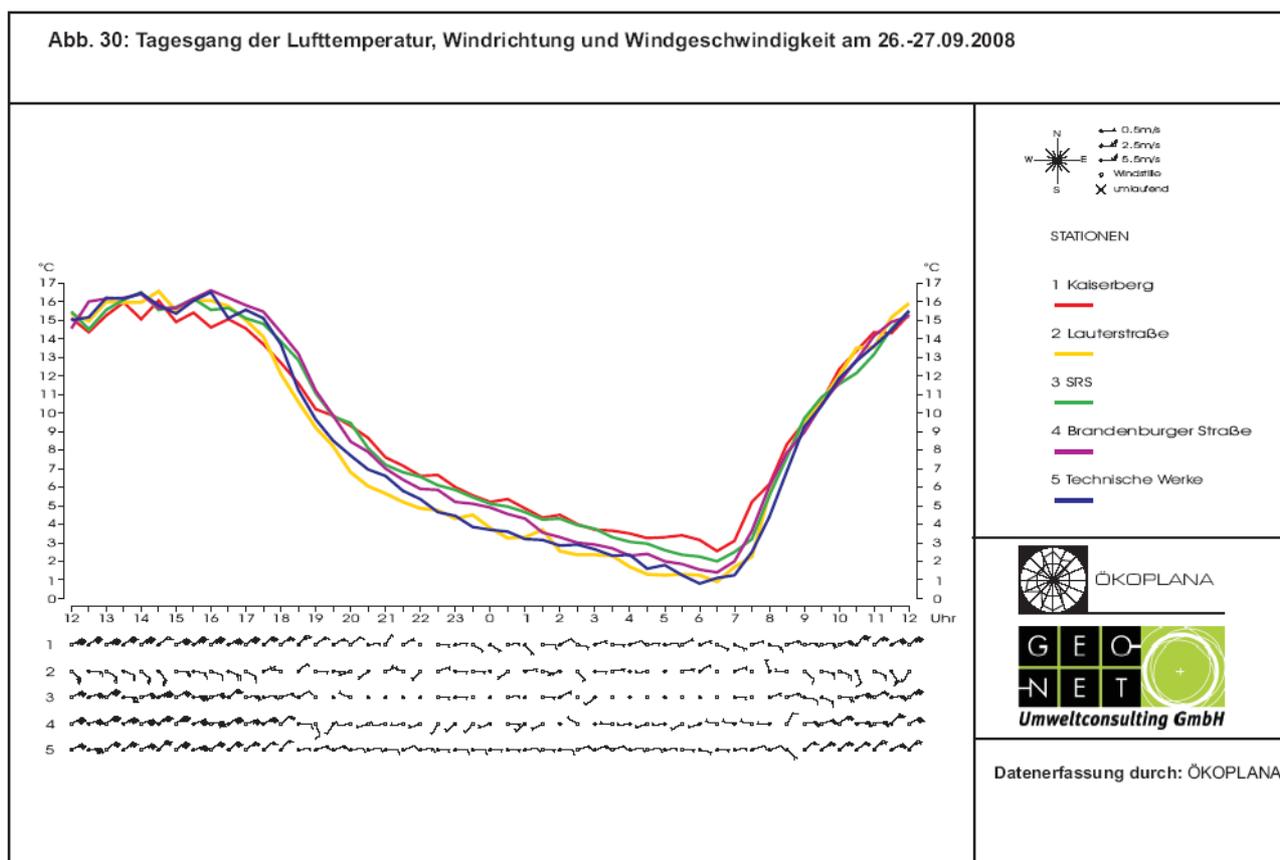
Gegen 23:00 Uhr weisen die Rauchschwaden am Warmfreibad den Talabwindes entlang des östlichen Lautertals nach. Er erreicht bodennah mittlere Windgeschwindigkeiten bis 1.4 m/s. Sein Einfluss kann gegen 23:25 auch am Bahndamm Im Reiserfeld östlich des Messplatzes nachgewiesen werden. Am Bahndamm und an dessen begleitenden Gehölzstrukturen kommt es zu Umlenkungen und Stagnationseffekten. Ein Übergleiten der Kaltluft konnte mit Hilfe der Rauchschwaden nicht festgestellt werden.

An den Messpunkten Brandenburger Straße (23:50 Uhr) und Königstraße (00:10 Uhr) zeigte sich anhand der Rauchschwaden deutlich der Einfluss von Kaltluftzuflüssen aus dem Kaiserslauterer Staatsforst, wobei die Hoheneckerstraße Trippstadter Straße als Strömungsleitbahnen fungieren. Die Beobachtungen an der Königstraße zeigen, dass die aus südlichen Richtungen zuströmende Kaltluft über den Bahndamm hinwegstreicht und somit auch bspw. im Bereich der Pfaff-Werke wirksam werden kann (→ Intensivierung der nächtlichen Abkühlung).

Die Rauchschwadenbeobachtungen im Bereich der Station *Lauterstraße* dokumentiert den Zustrom bodennaher Kaltluft aus dem Lautertal in Richtung Kulturzentrum Kammgarn. Der Einwirkungsbereich der Kaltluft bleibt aufgrund des Reliefs und der Straßenführungen auf die unmittelbar angrenzende Bebauung begrenzt.

4.2.3.3 Vertikalsondierungen und Rauchschwadenbeobachtungen am 26.-27.09.2008

Den Tagesgang der Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit am 26.-27.09.2008 bei einem kräftigen nordöstlichen Gradientwind zeigt Abb. 30:



Großwetterlage: Hochdruckbrücke über Mitteleuropa (BM)

Wetterablauf: Tagsüber ist es überwiegend heiter. In den Nachtstunden ist es weitgehend wolkenlos. Es herrschen ideale Bedingungen für nächtliche Kaltluftbildung.

Wie die Tagesgänge zeigen, bewirkt der kräftige Nordostwind (mittlere Windgeschwindigkeit an der Station *Kaiserberg* bis ca. 5.0 m/s) am Tag eine intensive Durchmischung der bodennahen Luftschichten, so dass sich zwischen den einzelnen Stationsstandorten nur recht Temperaturdifferenzierungen ergeben.

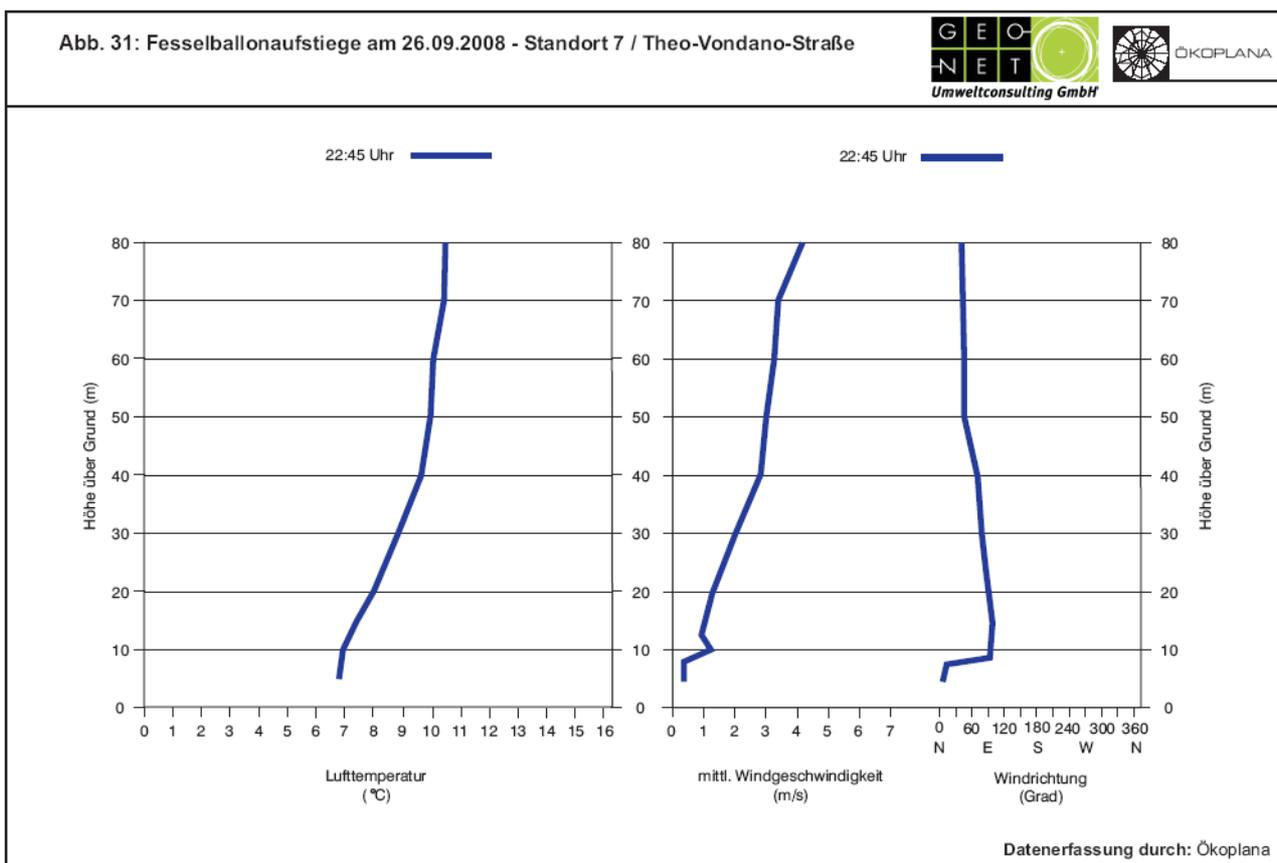
Nach Sonnenuntergang stellt sich wieder das für Strahlungsnächte typische Strömungsgeschehen ein. Während an der Höhenstation *Kaiserberg* regionale bzw. überregional angelegte Winde aus östlichen Richtungen aufgezeichnet werden, sind im Lautertal sowie im Bereich der Brandenburger Straße lokale Kaltluftströmungen zu registrieren.

Am Messstandort *SRS* überwiegen Stagnationserscheinungen. Nur kurzzeitig werden schwache Winde aus östlichen Richtungen gemessen. Entsprechend des Einflusses durch bodennahe Kaltluftmassen werden an den Stationsstandorten *Lauterstraße* und *Technische Werke* die niedrigsten Lufttemperaturen gemessen.

Vertikalsondierungen

Standort 7 / Theo-Vondano-Straße

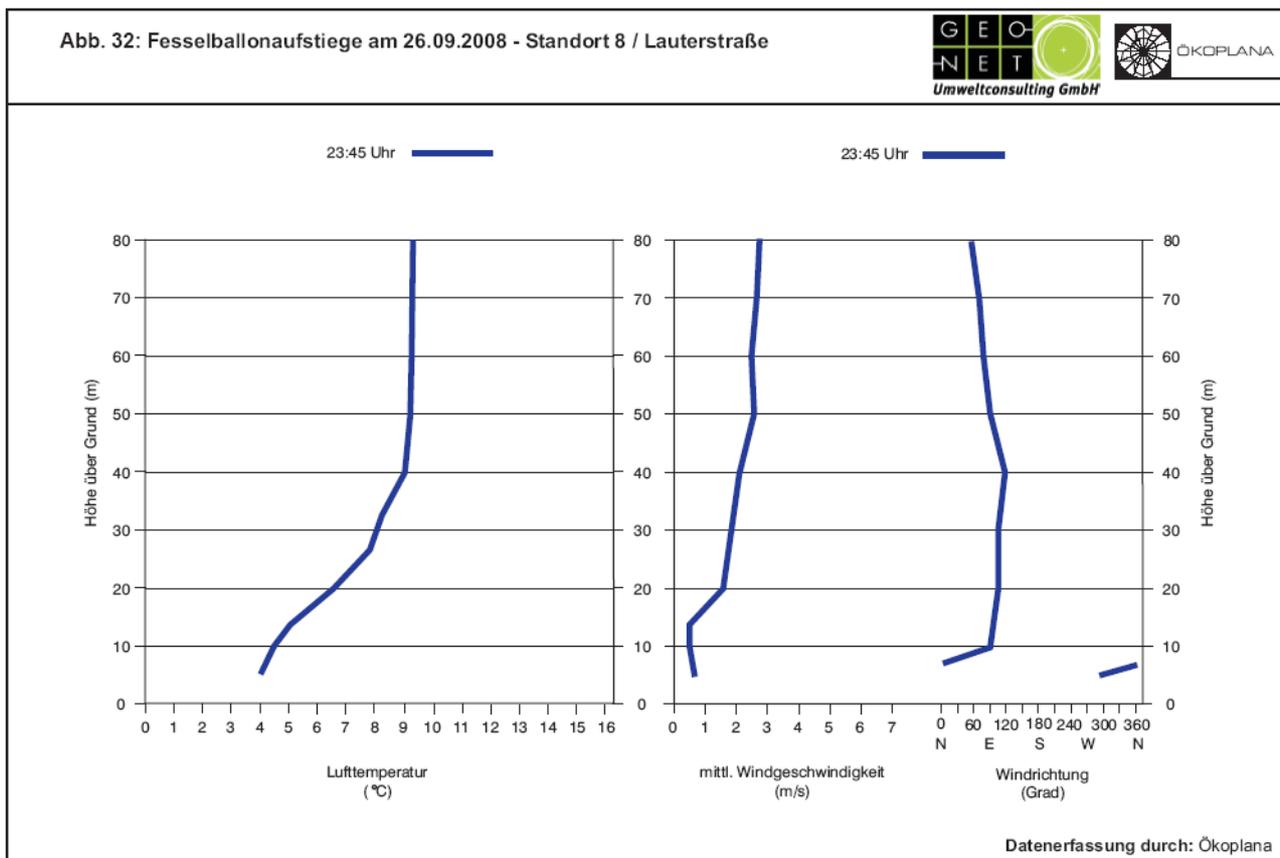
Im Bereich Theon-Vondano-Straße zwischen der Autobahn A6 und der Alex-Müller-Straße wird derzeit ein Wohngebiet entwickelt. Die Messungen dokumentieren, dass sich trotz bereits bestehender Bebauung noch ein schwacher, geringmächtiger Hangabwind ausbilden kann. Bis ca. 8 m ü.G. werden nördliche Richtungen beobachtet, die mittlere Windgeschwindigkeiten um 0.3 m/s erreichen (Abb. 31).



Oberhalb von 8 m ü.G. dreht der Wind auf östliche bis ostnordöstliche Richtungen, was mit einem deutlichen Anstieg der Windgeschwindigkeit verbunden ist. Diese Regionalströmung kann bis zur Messobergrenze in 80 m ü.G. registriert werden. Der vertikale Verlauf der Lufttemperatur dokumentiert den Aufbau einer Bodeninversion. Zwischen 5 m ü.G. und 70 m ü.G. nimmt die Lufttemperatur um ca. 3.2°C zu. Oberhalb von 70 m herrscht nahezu Isothermie.

Standort 8 / Lauterstraße:

Der Fesselballonaufstieg am Standort 8 beschreibt die Verhältnisse am Stationsstandort *Lauterstraße* am Neumühlepark. Zwischen 5 und 8 m ü.G. werden gegen 23:45 Uhr schwache westliche bis nördliche Windrichtungen gemessen. Darüber fängt der Ballon zunehmend an zu pendeln und stabilisiert sich bei etwa 12 m ü.G. zunehmend bei östlichen Richtungen. In dieser Höhenzone ist die mittlere Windgeschwindigkeit sehr gering (ca. 0.5 m/s). Der Aufstieg belegt die Aufzeichnung der Messstation, dass sich in Strahlungsnächten im Bereich des Neumühleparks ein flurwindartiger Talaufwind einstellt (Abb. 32).

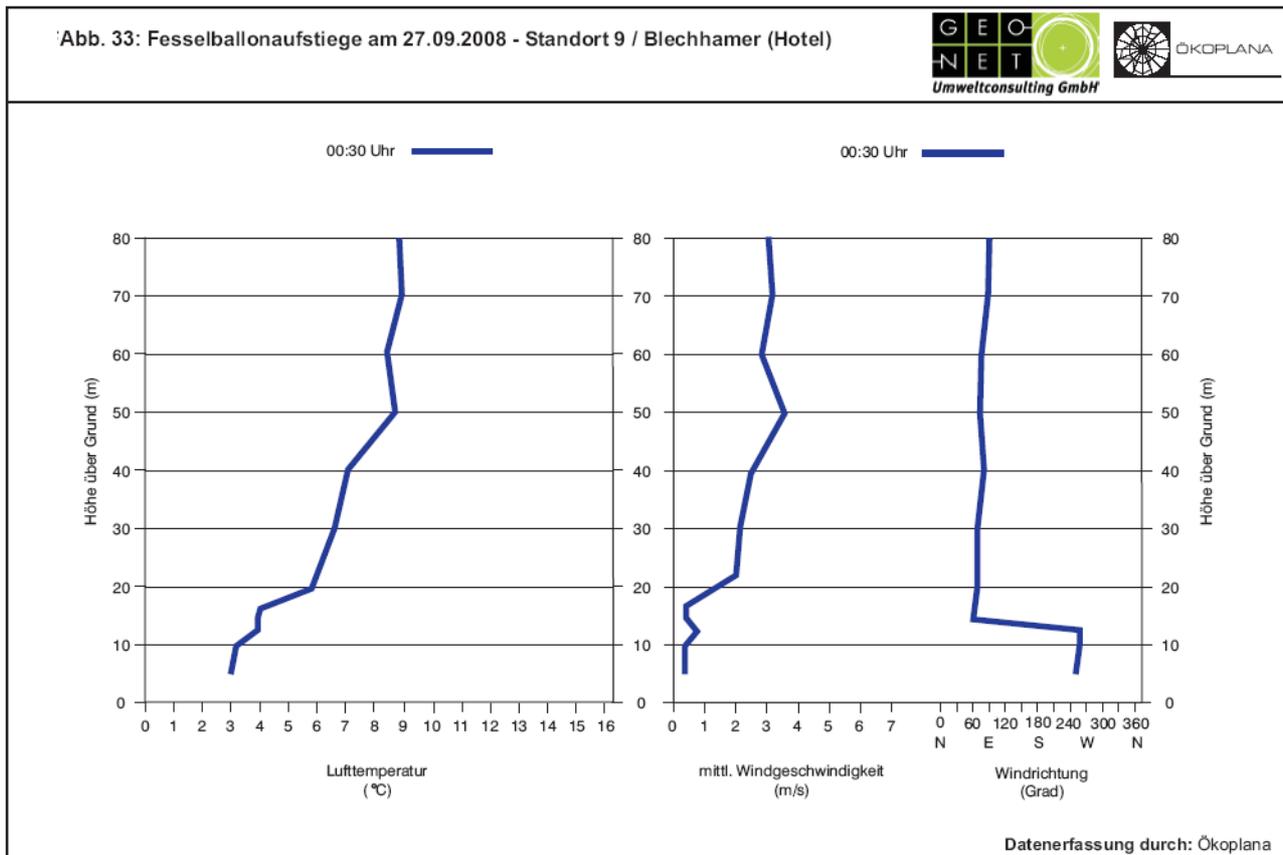


Die vertikale Mächtigkeit von weniger als 15 m weist darauf hin, dass die resultierende klimatische Gunstwirkung jedoch räumlich eng begrenzt bleibt. Hangabwinde über den unteren Steilabfall des Kaiserbergs konnten außerhalb des Neumühleparks nicht gemessen werden.

Standort 9 / Blechhammer:

Gegen 00:30 Uhr wurden am Hotel-Restaurant Blechhammer bis 80 m ü.G. Vertikalsondierungen durchgeführt (Abb. 33, S. 43). Der z.T. dicht bewaldete Hangeinschnitt südlich der Autobahn A 6 bildet eine Kaltluftammelgebiet, über welches sich ein schwacher Talabwind entwickeln kann. Er erreicht zum Zeitpunkt des Messungen eine vertikale Mächtigkeit von ca. 12 m. Die abkühlende Wirkung der örtlichen Kaltluft zeigt sich bis ca. 17 m ü.G. Oberhalb von 12 m ü.G. zeigt sich zunehmend der Einfluss der nordöstlichen bis östlichen Höhenströmung.

Abb. 33: Fesselballonaufstiege am 27.09.2008 - Standort 9 / Blechhamer (Hotel)



Standort 10 / Waschmühle (Freibad):

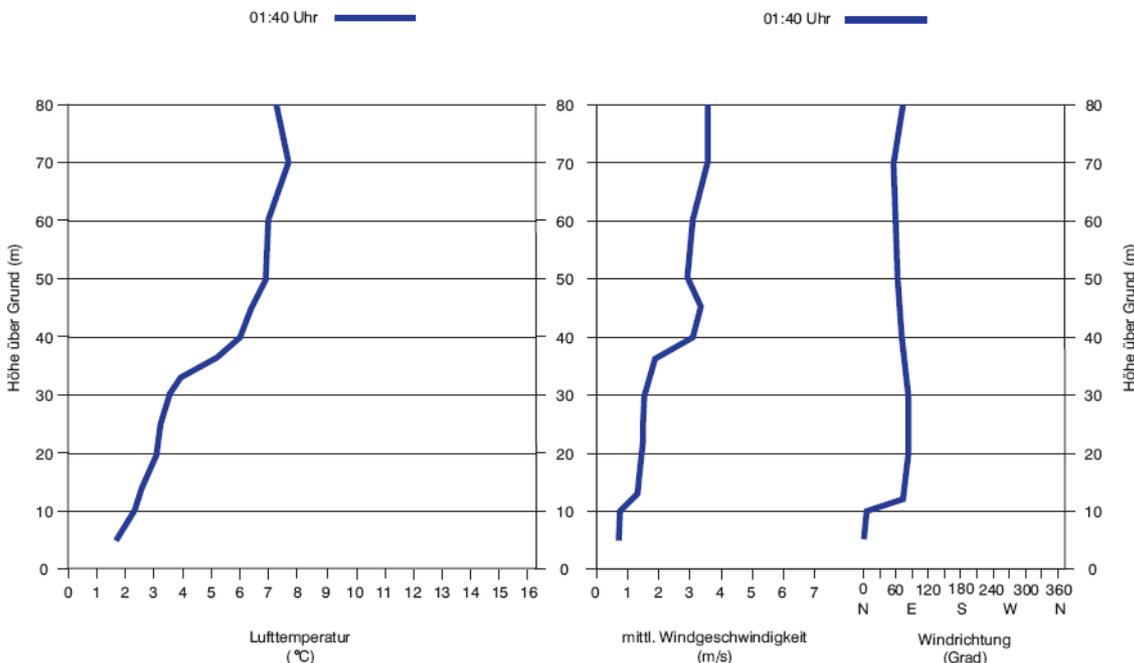
Am Messstandort Waschmühle (Freibad-Parkplatz) dominiert bis 10 m ü.G. der Kaltluftabfluss aus dem Hangeinschnitt Haselstraße und Ottersberger Straße (nördliche Strömungsrichtung), der mittlere Windgeschwindigkeiten um 0.8 m/s erreicht (Abb. 34, S. 44). Darüber dreht der Wind zu östlichen bis nordöstlichen Richtungen, die auf lokale Kaltluftbewegungen entlang des Eselbachtals und die östliche Regionalströmung zurückzuführen sind.

Die Obergrenze der Talkaltluft spiegelt sich im vertikalen Windgeschwindigkeitsprofil und im vertikalen Temperaturverlauf wider. Zwischen 30 und 40 m ü.G. ist ein deutlicher Windgeschwindigkeits- und Temperaturanstieg zu messen, der den Übergangsbereich zwischen Lokal- und Regionalströmung kennzeichnet.

Standort 11 / Siegelbach (Bushaltestelle Zoo):

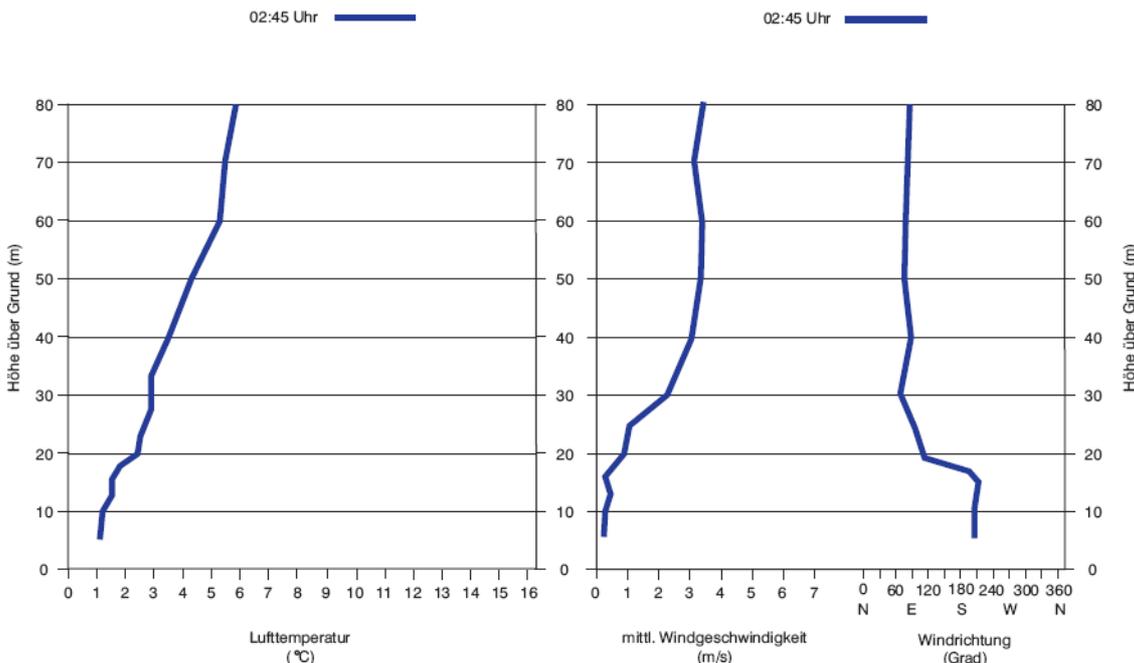
Die Fesselballonaufstieg am Standort Siegelbach dokumentiert das lokale Strömungsgeschehen im Südwesten von Siegelbach (Abb. 35, S. 44). Der Hangeinschnitt zwischen Zum Tierpark Fischereck fungiert als Kaltluftammel- und Kaltluftabflussbereich. Die hier nach Nordosten abfließende Kaltluft trägt im Ortszentrum zu einer Verbesserung der thermischen Umgebungsbedingungen bei. Am 27.09.2008 besitzt der Kaltluftstrom gegen 02:45 Uhr eine vertikale Mächtigkeit von ca. 18 m. Die recht niedrigen Windgeschwindigkeiten (deutlich unter 1.0 m/s) sind typisch für Kaltluft. Der Einfluss der Kaltluft zeigt sich auch anhand des Temperaturprofils. Im Übergangsbereich zwischen Lokal- und Höhenströmung ist ein auffallender Temperaturanstieg zu erkennen.

Abb. 34: Fesselballonaufstiege am 27.09.2008 - Standort 10 / Waschmühle (Freibad)



Datenerfassung durch: Ökoplane

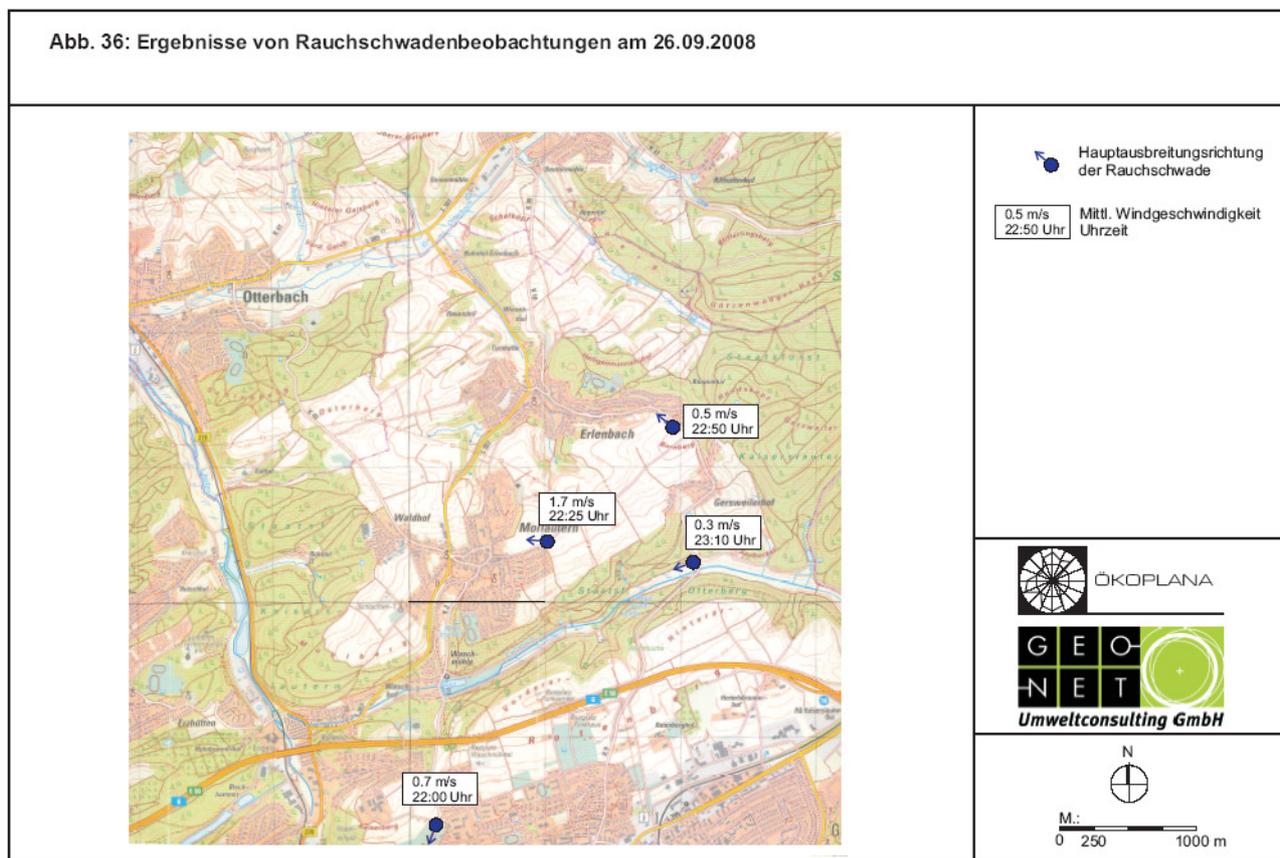
Abb. 35: Fesselballonaufstiege am 27.09.2008 - Standort 11 / Siegelbach (Bushaltestelle)



Datenerfassung durch: Ökoplane

Rauchschwadenbeobachtungen

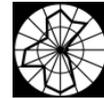
Neben Fesselballonaufstiegen wurden am 26.09.2008 auch Windfeldbeobachtungen mittels Rauchschwaden durchgeführt. Wie Abb. 36 zeigt, werden gegen 22:00 Uhr östlich des Kaiserberg im Bereich Burggraben schwache Hangabwinde beobachtet. Die abfließende Kalt- und Frischluft ist für die klimaökologische Situation entlang der Lauterstraße von nicht zu unterschätzender Bedeutung.



Die Rauchschwadenbeobachtungen am Wasserturm in Moorlautern gegen 22:25 Uhr dokumentieren die recht günstigen Belüftungsverhältnisse in Kuppenbereichen des Kaiserslauterer Stadtgebiets. Über den Ackerflächen werden bei vorherrschenden Ostwinden mittlere Windgeschwindigkeiten von ca. 1.7 m/s aufgezeichnet. Die örtlich gebildete Kaltluft wird in freien Lagen durch den kräftigeren Höhenwind/Regionalwind immer wieder rasch ausgeräumt, so dass keine ausgeprägten lokalen Kaltluftbewegungen entstehen können. Nur in windgeschützteren Lagen (Standort Bornberg/K9 – 22:50 Uhr) können sich seichte Hangabwinde entwickeln. Die gegen 23:10 Uhr gezündeten Rauschschwaden im Eselsbachtal weisen schwache Kaltluftbewegungen (0.3 m/s) aus östlichen Richtungen nach.

4.3 Verteilung der Lufttemperatur nach Messfahrten im Gesamtstadtgebiet von Kaiserslautern am 01.-02.07. 2008

Zur Verdeutlichung des Einflusses von Geländere relief und Flächennutzung auf das lokale Klimageschehen und zur flächenhaften Beurteilung klimaökologischer Funktionsabläufe werden nachfolgend die Ergebnisse flächendeckender Temperaturmessfahrten erläutert. Voraussetzung für die Ermittlung der flächenhaften Verteilung des städtischen Lufttemperaturfeldes ist eine geeignete Auswahl von Messstrecken zu einem möglichst dichten Netz. Dabei wurde auf folgende Grundforderungen geachtet:



- Mit Hilfe der Messstrecken müssen unterschiedliche Bebauungs- und Flächennutzungsstrukturen erfasst werden, um bei der Auswertung mögliche Ursachen des jeweiligen Temperaturverhaltens zu ermitteln.
- Im Interesse einer kontrollierbaren Auswertung sind die Messfahrtstrecken so zu planen, dass bestimmte Punkte (Stationsstandorte, "Schleifpunkte") in zeitlichem Abstand mehrfach angefahren werden. So ist ein unmittelbarer Einblick in die während der Messfahrtdauer erfolgten Temperaturänderungen möglich.

Für die Messfahrten standen vier Fahrzeuge zur Verfügung, die jeweils mit einem elektrisch ventilierten Psychrometer (THERM 2286-2, Fa. Ahlborn) ausgestattet wurden. Das rasch auf Temperaturänderungen reagierende NTC-Widerstandsthermometer besitzt eine Auflösung von 0.01 °C. Die Messhöhe betrug 1.8 m ü.G.

Die Messfahrten fanden zwischen 22:30 Uhr und 03:30 Uhr statt. Die lange Andauer der Messfahrten wurde notwendig, um ein flächendeckendes Bild von der Lufttemperaturverteilung im Gesamtstadtgebiet zu erhalten. Alle Daten wurden auf den Zeitpunkt 02:00 Uhr korrigiert.

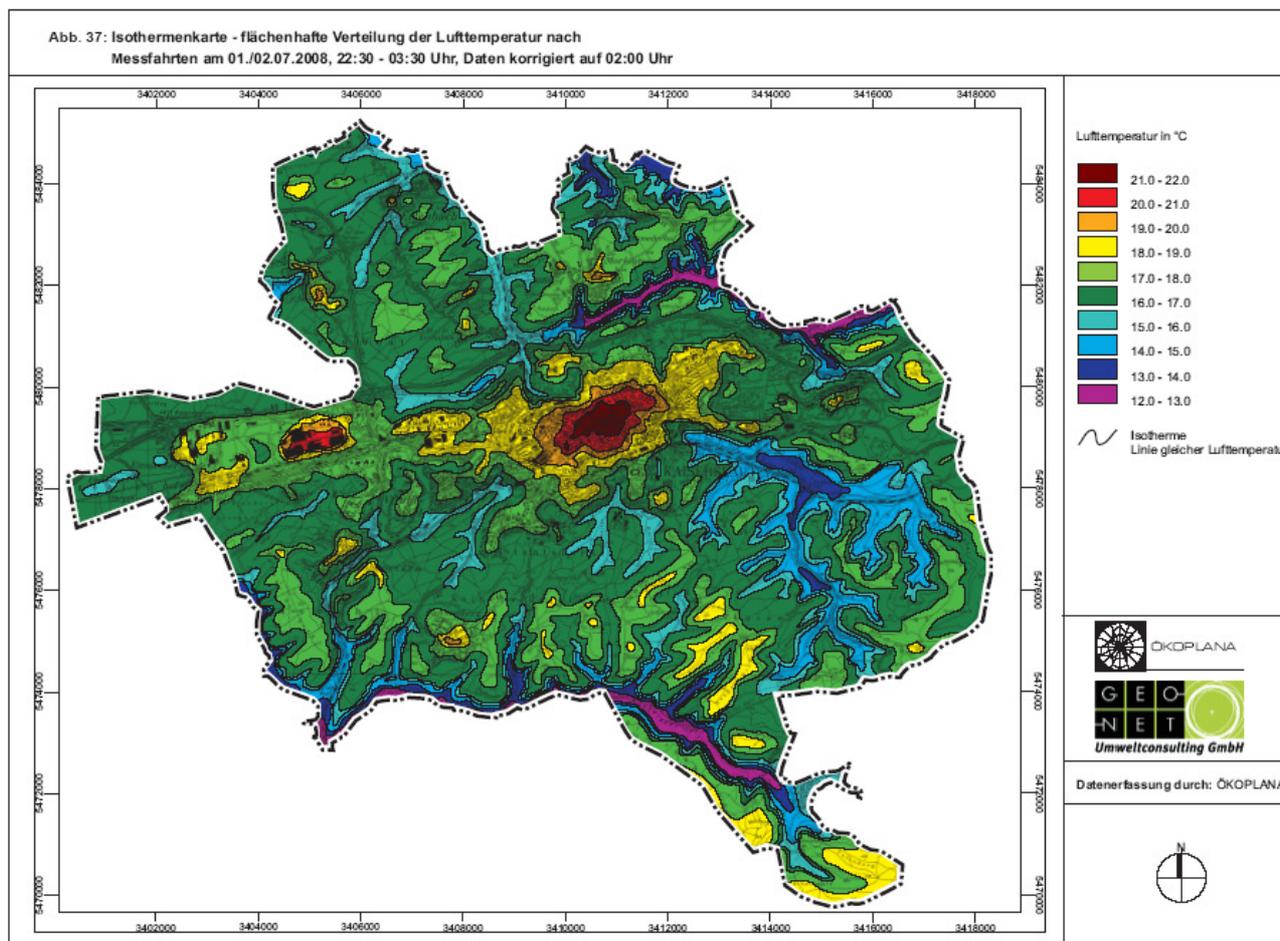
Eine Analyse der Temperaturverteilung erfolgt vorwiegend nach Sonnenuntergang, da sich im Verlauf der nächtlichen Abkühlungsphase die durch unterschiedliche Flächennutzung bzw. Oberflächenmaterialien (vegetationsbedeckte Oberflächen bzw. Baukörper) bedingten thermischen Unterschiede am deutlichsten ausbilden. Abhängig von der Flächennutzung, der Lagebeziehung zu klimaökologisch wirksamen Ausgleichsräumen und dem Gelände relief bilden sich nach Sonnenuntergang wärmere und kühlere Bereiche. Hierfür ist sowohl die kleinräumige als auch die großräumigere (regionaler Maßstab) Kaltluftentstehung und Kaltluftbewegung von wesentlicher Bedeutung.

Bereits vor Sonnenuntergang beginnen sich die Bodenoberfläche sowie die darauf befindlichen Materialien und damit auch die darüber liegenden Luftschichten abzukühlen. Über Vegetationsflächen (z.B. Wiesen, Ackerflächen) ist diese Abkühlung besonders intensiv. In ebenem Gelände stagniert die so entstehende Kaltluft größtenteils am Ort ihrer Entstehung, wenn sie nicht durch eine Luftströmung höherer Geschwindigkeit ausgeräumt wird. Die flächenhafte Verteilung der Lufttemperatur wird dabei zum Indiz für diese Erscheinungen und für die klimaökologische Leistungsfähigkeit der Freiflächen und Freiräume.

Die Isothermenkarte (Abbildung 37) zeigt die flächenhafte Verteilung der Lufttemperatur während einer klimaökologisch relevanten Strahlungsnacht. In der Darstellung der Lufttemperaturverteilung markiert die jeweilige Isotherme (Linie gleicher Lufttemperatur) den Übergang zu einem anderen Temperaturwert. Im vorliegenden Fall umfasst die Fläche zwischen zwei Isothermen eine Änderung der Lufttemperatur von 1.0°C.

Wie die Tagesgänge der Lufttemperatur und des Windes dokumentieren (s. Abbildung 18, S. 29), entwickelt sich im Untersuchungsgebiet nach Sonnenuntergang ein räumlich differenziertes Strömungsgeschehen, das sich auch auf die Verteilung der Lufttemperatur auswirkt. Auf der Isothermenkarte lassen sich deutlich die flächennutzungsspezifischen thermischen Unterschiede im Stadtgebiet von Kaiserslautern erkennen.

Die maximale Temperaturdifferenz beträgt ca. 9.0°C. Die tiefsten Werte (12.0 – 13.0°C) wurden entlang des Eselsbachs östlich der Waschmühle und entlang des Aschbachtals im südlichen Stadtgebiet von Kaiserslautern registriert. Die Talzonen fungieren als Kaltluftammel- und Kaltluftabflussbereiche für zuströmende Hangkaltluft.



Die höchste Lufttemperaturen (21.0 – 22.0°C) werden erwartungsgemäß im Stadtzentrum von Kaiserslautern gemessen. Zwischen Mannheimer Straße im Nordosten, den Pfaff-Werken im Südwesten und dem Kolping-Platz im Südosten führt die große Bebauungsdichte (→ hohes Wärmespeicherungspotenzial) zu einer deutlich abgeschwächten nächtlichen Abkühlung. Folge ist die Ausbildung einer deutlichen „Wärmeinsel“.

Im Westen von Kaiserslautern bilden das Gewerbegebiet Einsiedlerhof, die Opel-Werke sowie das Gewerbegebiet West einzelne Wärmepole. Hier werden gegen noch 02:00 Uhr Lufttemperaturen über 18.0°C gemessen, was im Wesentlichen auf den hohen Versiegelungsgrad zurückzuführen ist. Ein zusammenwachsen der „Wärmepole“ wird durch lokale Kaltluftbildung über verbliebenen Freiflächen sowie die Kaltluftzuflüsse aus den angrenzenden Waldflächen (z.B. zwischen den Opel-Werken und dem Gewerbegebiet West) unterbunden. Die benachbarten Bahngleise bilden sowohl am Tag als auch in der Nacht klimatisch wirksame Strömungsleitbahnen.

Im südlichen Stadtgebiet von Kaiserslautern bleibt die nächtliche Überwärmung einzelner Siedlungen und Ortschaften räumlich eng begrenzt. Im Stadtteil Hohenecken werden nur im Ortszentrum Lufttemperaturen von knapp über 18.0°C aufgezeichnet. Hier macht sich zum einen die locker durchgrünte Bebauungsstruktur und um anderen das hohe klimaökologische Ausgleichspotenzial der umliegenden Waldflächen thermisch positiv bemerkbar.

Die etwas höheren Lufttemperaturen im Stadtteil Dansenberg (max. Lufttemperatur ca. 19.3°C) sind vorwiegend auf die Höhenlage (ca. 350 m ü.NN) zurückzuführen. Die Bebauung befindet sich im Einflussbereich der wärmeren Höhenströmung, so dass die bodennah entstehende Kaltluft verstärkt ausgeräumt wird. Als Folge bleibt die nächtliche Abkühlung im Vergleich zu Tallagen reduziert.

Wie bereits erwähnt, ist im Aschbachtal in Strahlungsnächten eine intensive Abkühlung zu beobachten. Über den Wiesen kommt es aufgrund des geringen Gefälles vermehrt zu Kaltluftstagnation. In den Übergangsjahreszeiten und im Winter ist daher in dieser Lage vermehrt Nebelbildung zu verzeichnen. Im Süden von Kaiserslautern sind entlang der Hohenecker Straße (K3) und der L 502 recht niedrige Lufttemperaturen zu verzeichnen (15.0 – 16.0°C), die auf Kaltluftabflüsse aus den Bereichen Großer und Kleiner Scheibenkopf zurückzuführen sind. Vergleichbare thermische Verhältnisse ergeben sich in den Nachtstunden auch im Biertal und Bremertal zwischen Lämmchesberg und Betzenberg. Auch hier stellen sich lokale Kaltluftabflüsse ein, die entlang der Bremerstraße in Richtung Innenstadt abfließen.

Etwas reduziert ist die nächtliche Abkühlung entlang der L 503 zwischen Universitätswohnstadt und Lämmchesberg. Hier werden gegen 02:00 Uhr Lufttemperaturen zwischen 17.0 und 18.0°C gemessen. Die zunehmende Talbebauung führt hier zu einer Schwächung der Kaltluftbewegungen.

Wie die Isothermenkarte aufzeigt, bildet die Bahntrasse mit ihrem Dammverlauf zwischen dem klimaökologischen Ausgleichspotenzial der Waldflächen im Süden und dem „Wärmepol“, Innenstadt ein auffallendes Strömungshindernis, das zusammen mit der z.T. dichten Innenstadtbauung ein weites Vordringen der Kaltluftströme in zentrumsnahe Lagen verhindert.

Im Lautertal östlich von Kaiserslautern werden im Bereich Entersweilerhof Lufttemperaturen von 13.3°C gemessen. Zur Innenstadt von Kaiserslautern ergibt sich somit ein Temperaturgradient von ca. 8°C.

Die entlang Lauter/Entersweilerstraße nach Westnordwesten abfließende Talkaltluft sorgt südlich der Mannheimer Straße und östlich der Donnersbergstraße für rasche abendliche Abkühlung. Unterstützt wird diese noch durch die örtliche Kaltluftbildung über den Grünflächen des Volksparks. Dort werden Lufttemperaturen von ca. 15.0°C aufgezeichnet.

Die aus dem östlichen Lautertal zuströmende Kaltluft zeigt westlich der Donnersbergstraße bis zum Barbarossaring deutlich abkühlende Wirkung (→ bioklimatischer Positiveffekt). Der Eisenbahndamm zwischen Im Reiserfeld und Messeplatz wird vom Talabwind überströmt.

Die Kasernenflächen entlang der Mannheimer Straße zeigen sich insgesamt nur mäßig überwärmt. Hier macht sich das thermische Gunstpotenzial des Hauptfriedhofs und der Waldflächen (z.B. Erdbeerenhügel, Rummelberg) positiv bemerkbar.

Im Gewerbegebiet PRE-Park zwischen Kahlenberg, Autobahn A6 und Mainzer Straße werden gegen 02:00 Uhr Lufttemperaturen zwischen 17.0 und 19.0°C gemessen. Die verhältnismäßig geringe Überwärmung des Gewerbegebiets ist auch hier auf direkt angrenzenden klimaökologischen Ausgleichsräume (u.a. Kahlenberg).

Bei vorherrschenden Winden aus östlichen bis ostnordöstlichen Richtungen (siehe Abb. 18 S. 29 – Tagesgang 01./02.07.2008, Station *Kaiserberg*) sind im Gewerbegebiet Nordost zwischen Autobahn A6 und Mainzer Straße mit Lufttemperaturen zwischen 17.0 und 19.0°C deutlich niedrigere Lufttemperaturen zu verzeichnen als im Stadtzentrum.

Hier machen sich die noch recht lockere Bauungsstruktur sowie lokale Kaltluftabflüsse über die Hangzone des Rotenbergs thermisch positiv bemerkbar. Zudem trägt der Einfluss der regionalen Luftströmungen aus östlichen Richtungssektoren, die Kaltluft aus dem Umland heranzuführt, zu einer wirkungsvollen Belüftung des Gewerbegebiets bei.

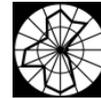


Recht günstig stellt sich auch die thermische Situation auch im Wohngebiet nördlich der Alex-Müller-Straße dar (Lufttemperaturen zwischen 16.0 und 18.0°C). Die Wohnbebauung wird nach Sonnenuntergang durch den vorherrschenden östlichen Regionalwind belüftet, wodurch thermische Belastungen nach Sonnenuntergang rasch abgebaut werden können.

Im nördlichen Stadtgebiet von Kaiserslautern werden erwartungsgemäß in den Tallagen des Eselsbach zwischen Waschmühle und Eselsfürth, im Lautertal entlang der B 270, im Wiesental nordöstlich von Erlenbach und in Siegelbach im Bereich Tierpark niedrigste Lufttemperaturen (unter 16.0°C) gemessen.

Die Überwärmung der einzelnen Stadtteile (z.B. Wiesenthalerhof, Erfenbach) bleibt von ihrer Intensität und räumlichen Ausdehnung eng begrenzt. Lufttemperaturen über 19.0°C werden nur in den Ortszentren von Moorlautern und Siegelbach aufgezeichnet.

Im Industriegebiet Nordergeben sich zum angrenzenden Freiland Temperaturdifferenzen von ca. 2.0 – 3.0°C. Eine deutlichere Temperaturdifferenzierung wird durch die derzeit noch großen Brachflächen im Industriegebiet unterbunden. Sie fungieren als bebauungsinterne Kaltluftproduktionsflächen.



5. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den meteorologischen Parametern Lufttemperatur in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln (vgl. Kap. 4.2). Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen.

5.1 Kaltlufthaushalt

5.1.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld

Ausschlaggebend für die Temperaturverteilung sind die landnutzungsabhängigen Boden- und Oberflächeneigenschaften, sowie deren Wechselwirkungen mit den atmosphärischen Prozessen in der bodennahen Grenzschicht. Innerhalb des Erdbodens sind dabei Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Bedeutung. Je größer beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist, umso schneller und tiefer kann Wärme in das entsprechende Material eindringen, aber auch wieder von diesem abgegeben werden. 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. Zur Validierung und Absicherung der Ergebnisse des Klimamodells FITNAH wurden am 01. und 02. Juli 2008 Temperaturmessfahrten durch das Büro Ökoplane durchgeführt. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung in der räumlichen Ausprägung zwischen gemessen und modellierten Werten.

Wie bereits in Kap. 4.3 beschrieben, ist die Temperaturverteilung innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weist die innerstädtische Blockbebauung Temperaturen von mehr als 21°C auf und geht mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung von ca. 95% im Stadtzentrum einher. Die sich an den direkten Innenstadtbereich anschließende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 20°C bis 21°C ein mittleres Temperaturniveau. Ähnlich hohe Temperaturen sind auch im Bereich ausgedehnter Gewerbegebiete wie z.B. im Westen von Kaiserslautern anzutreffen. Entsprechend zum Befund der Temperaturmessfahrt treten diese Areale als Wärmepole hervor. Die ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbauung weist hingegen unter den Siedlungsflächen das geringste Temperaturniveau auf, wobei 19°C selten überschritten werden.

Vergleichsweise moderate Temperaturen von 17°C bis 18°C treten über den Schienenverkehrsflächen auf, die im Gegensatz zu den Straßen einen Versiegelungsgrad von lediglich 25 % besitzen. Im Temperaturfeld treten die unbebauten, vegetationsgeprägten Freiflächen mit deutlich geringeren Temperaturen hervor, wobei auf ihre Rolle als Kaltluft produzierende Flächen auch in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

Die niedrigsten Werte im Untersuchungsgebiet sind mit 12°C bis 13°C im Lautertal bei Erfenbach anzutreffen, was in der starken langwelligen Ausstrahlung der dort angrenzenden ausgedehnten Ackerflächen nach Sonnenuntergang begründet liegt.

Ähnlich niedrige Temperaturen treten innerhalb der übrigen größeren Talungen auf (z.B. Aschbachtal). Hier führt die Kanalisierung der an den benachbarten Hängen abfließenden Kaltluft zu den niedrigen Temperaturen.

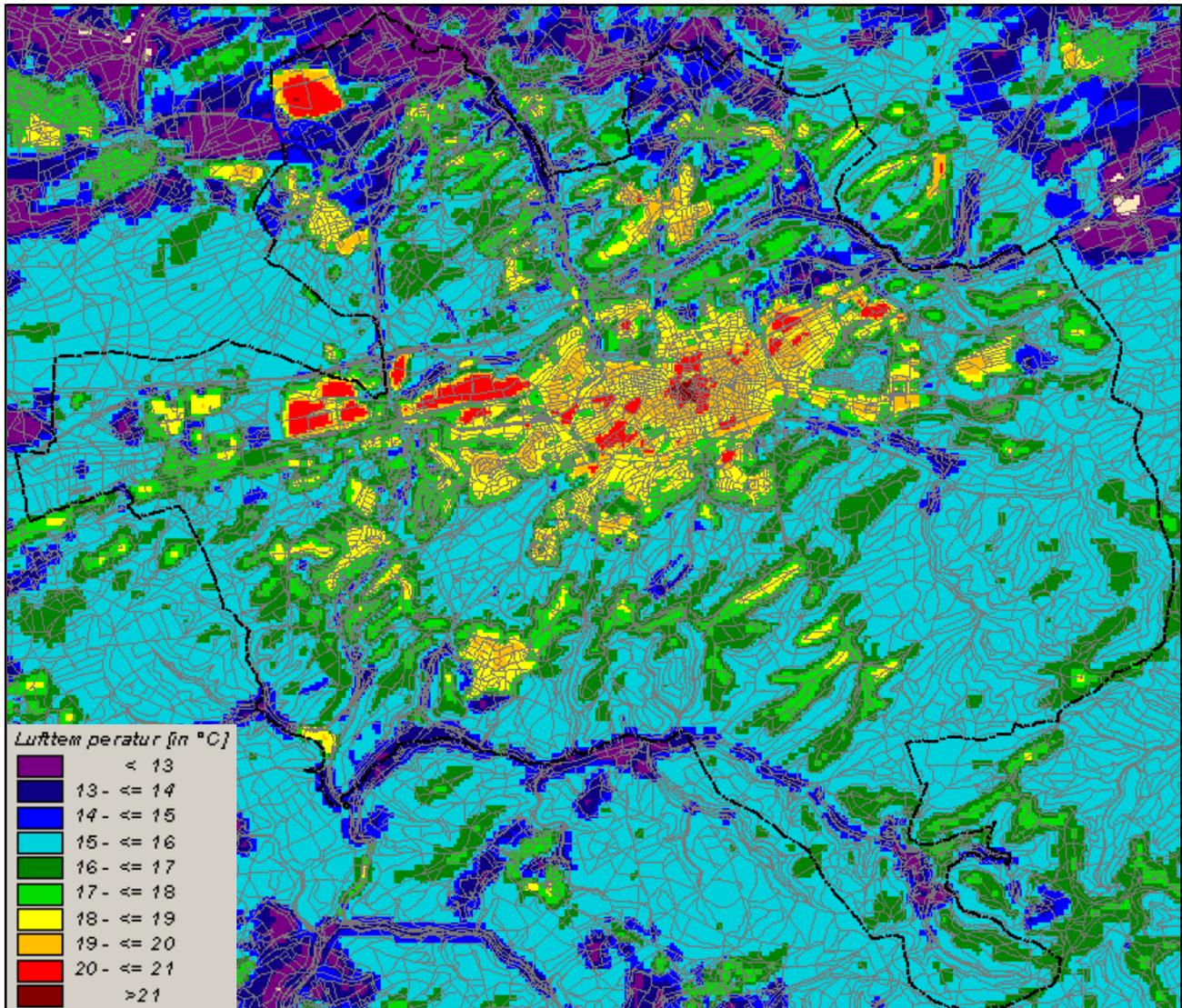


Abbildung 38: Modellierte Lufttemperatur in 2 m über Grund

Im Gegensatz zu den weitläufigen Freiflächen des Umlandes weisen die innerstädtischen Freiflächen ein höheres Temperaturniveau auf. Zu den größten städtischen Grünflächen zählt z.B. der Volkspark, für den ein Temperaturniveau zwischen 15°C und $15,5^{\circ}\text{C}$ modelliert wurde. Dies deckt sich mit den Werten der Temperaturmessfahrt. 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.

Aber auch Waldareale besitzen in Abhängigkeit von der Höhenlage ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau von 15°C bis 16°C . Bei Waldflächen dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur. Im Temperaturfeld werden auch die mit bis zu 19°C vergleichsweise warmen Scheitelbereiche der meist bewaldeten Höhenzüge sichtbar. Dies ist auf die thermische Schichtung zurückzuführen, bei der die abgekühlte Luftmasse aufgrund ihrer höheren Dichte hangabwärts fließt.

Während sich also die Kaltluft in den Senkenbereichen und Tiefenlinien sammelt, verbleibt die wärmere Luft an den Scheitelbereichen, von denen der Kaltluftabfluss seinen Anfang nimmt. Daraus ergibt sich eine Temperaturinversion, bei der vergleichsweise warme Luft über kälteren Luftmassen lagert.

5.1.2 Autochthones Windfeld

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 (u.a. KIESE et al. 1992). Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bäume und Bauten abgebremst wird. Die Flur-/Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können.

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.

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes. Abbildung 39 zeigt die Kernstadt Kaiserslautern, wobei die bebaute Fläche rot dargestellt ist. Als Untergrenze für die Wirksamkeit einer Kaltluftströmung gilt in der vorliegenden Untersuchung, auf Grundlage der gebietstypischen Ausprägung, eine Mindestgeschwindigkeit von 0,1 m/s. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit sind über Pfeilrichtung bzw. Pfeillänge ausgedrückt, wobei die unterlegten Rasterzellen die Windgeschwindigkeit flächenhaft darstellen. Abgebildet sind alle Rasterzellen mit einer Windgeschwindigkeit von $\geq 0,1$ m/s. Die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten liegen im Untersuchungsgebiet verbreitet in einer Größenordnung von 0,5 bis 1,0 m/s und können lokal auf mehr als 2,0 m/s ansteigen.

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 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 m/s auf (Abb. 39). 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.

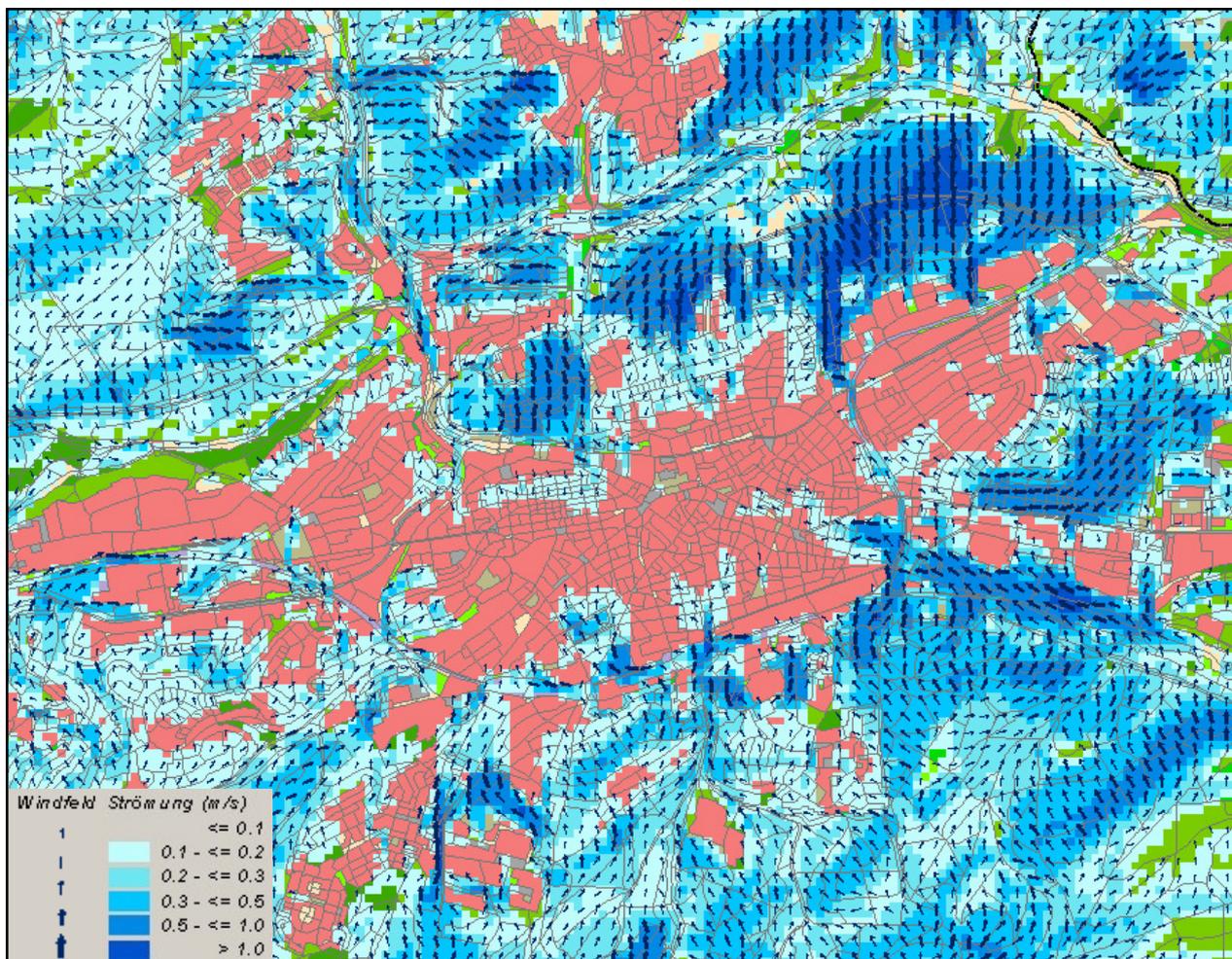


Abbildung 39: Strömungsgeschwindigkeit und -Richtung im Kerngebiet

Die Eindringtiefe der Kaltluft in die Siedlungsräume und damit auch das Maß der bioklimatischen Gunstwirkung während sommerlicher Hochdruckwetterlagen hängt ab von der Bebauungsstruktur und der Intensität der Kaltluftdynamik. Ganz allgemein wird eine vergleichsweise gering überbaute Einzel- und Reihenhausbebauung besser durchströmt als eine Block- und Blockrandbebauung. Die Spanne der Eindringtiefe beträgt innenstadtnah zwischen 500 m im Bereich der Axel-Müller-Straße und bis zu 400 m ausgehend von der Lauterstraße (Abb. 39). Hier ermöglichen intensive Kaltluftabflüsse auf den gegenüberliegenden Hängen eine flächenhafte Durchlüftung des Siedlungsraums. Eindringtiefen von bis zu 800 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. Die von Ökoplane (2007) für letztgenannten Bereich ermittelte Eindringtiefe bis zur Nordbahnstraße (vgl. Kap. 4.2.3.2) wird durch die Klimamodellierung wiedergegeben. Auf die im Stadtgebiet Kaiserslautern ausgewiesenen Leitbahnen wird in Kap. 6 weiter eingegangen. Innerhalb der durchströmten Bebauung beträgt die Windgeschwindigkeit meist bei 0,1 m/s bis 0,3 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 m/s auf.

5.1.3 Kaltluftvolumenstrom

Die Durchlüftung von Siedlungsgebieten trägt zum Abbau von humanbiometeorologischen Belastungen bei (MORISKE & TUROWSKI 2003). So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Frischluft aus Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen gesenkt werden, was zu einem Abbau der Wärmebelastung des Menschen, insbesondere in den Sommermonaten, führt. Ist diese herangeführte, kühlere Luft mit Luftschadstoffen belastet, so kann diese nicht mehr als Frischluft sondern lediglich als Kaltluft angesprochen werden. Zur Beurteilung der Durchlüftungssituation ist folglich die geeignete Zuordnung von Belastungsräumen und Ausgleichsräumen, welche die entsprechende Kaltluft zur Verfügung stellen, sowie ein Strömungssystem, das einen Luftmassentransport garantieren kann, notwendig. Die Effektivität des Luftaustauschs vor Ort kann bei bekanntem Windfeld berechnet werden.

Als quantitatives Merkmal dient hierfür der Kaltluftvolumenstrom, der das transportierte Volumen an Kaltluft durch eine definierte vertikale Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung angibt. Dabei wird das transportierte Luftvolumen über die absolute Höhe der Kaltluftschicht aufsummiert (integriert). Die Höhe der Kaltluft gibt damit die Höhe der vertikalen Fläche vor, als Breite dy der Fläche wird im vorliegenden Fall die Breite einer Rasterzelle angenommen. Die Höhe der Kaltluftschicht wird über die horizontale Windgeschwindigkeit definiert, die innerhalb der Kaltluft einen Wert $> 0,1$ m/s aufweisen sollte. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 4 Uhr morgens gewählt, zu der die Kaltluftschicht ihre maximale Mächtigkeit erreicht hat. Die Effektivität des Luftaustauschs vor Ort kann somit bei bekanntem Windfeld wie folgt berechnet werden. Als Maßzahl hierfür wird der Kaltluftvolumenstrom Vol eingeführt:

$$Vol = \int_0^Z \int_y^{y+dy} v dz dy, \quad \text{mit:}$$

Vol: Kaltluftvolumenstrom in m^3/s

Z: Mächtigkeit der bodennahen Kaltluftschicht

v: Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft in x-Richtung

Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den *Zustrom von Kaltluft* und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials. Die Klassifizierung des Volumenstroms orientiert sich dabei am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Untersuchungsgebietes. Die qualitative Bewertung dieses Klimaparameters zeigt Tab. 6, dessen Grundlage das in Kap. 3.2.4 (S. 14) beschriebene Verfahren zur Z-Transformation ist. Die Klassifizierung des Kaltluftvolumens auf Grundlage der Z-Transformation versteht sich daher als ungefähre Angabe.

| Mittlerer Z-Wert | Kaltluftvolumen in m^3/s | Bewertung |
|-------------------------------|----------------------------|-------------|
| < -1 (untere S_1 -Schranke) | < 300 | Sehr gering |
| -1 bis 0 | 300 bis 700 | Gering |
| 0 bis 1 | 700 bis 1100 | Mittel |
| > 1 (obere S_1 -Schranke) | > 1100 | Hoch |

Tabelle 6: Qualitative und quantitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Volumenstrom gilt in der vorliegenden Untersuchung ein mindestens geringer Rasterzellenwert von mehr als 300. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des Strömungsfeldes einher. Abbildung 40 zeigt den Volumenstrom zusammen mit dem Strömungsfeld. Sehr hohe Massenströme treten innenstadtnah vor allem über der Abdachung des Kaiserbergs und den weiter östlich lokalisierten Hängen des Rotenbergs auf. Da diese Bereiche wenig bewaldet sind, wird die Kaltluft hier rasch beschleunigt, so dass in der Folge auch überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumina transportiert werden. Deutlich zeichnen sich außerdem einige Leitbahnbereiche ab, welche als raugkeitsarme Strukturen große Mengen an Kaltluft kanalisieren und an die Siedlungsräume heranführen. Dazu zählen u.a. der Hangeinschnitt am Baalborner Weg, der Volkspark sowie der Hauptfriedhof. Hinsichtlich einer Leitbahnfunktion erweisen sich vor allem Kleingarten- und Friedhofsflächen aufgrund ihrer im Vergleich zu Waldflächen geringeren Oberflächenrauigkeit als günstig.

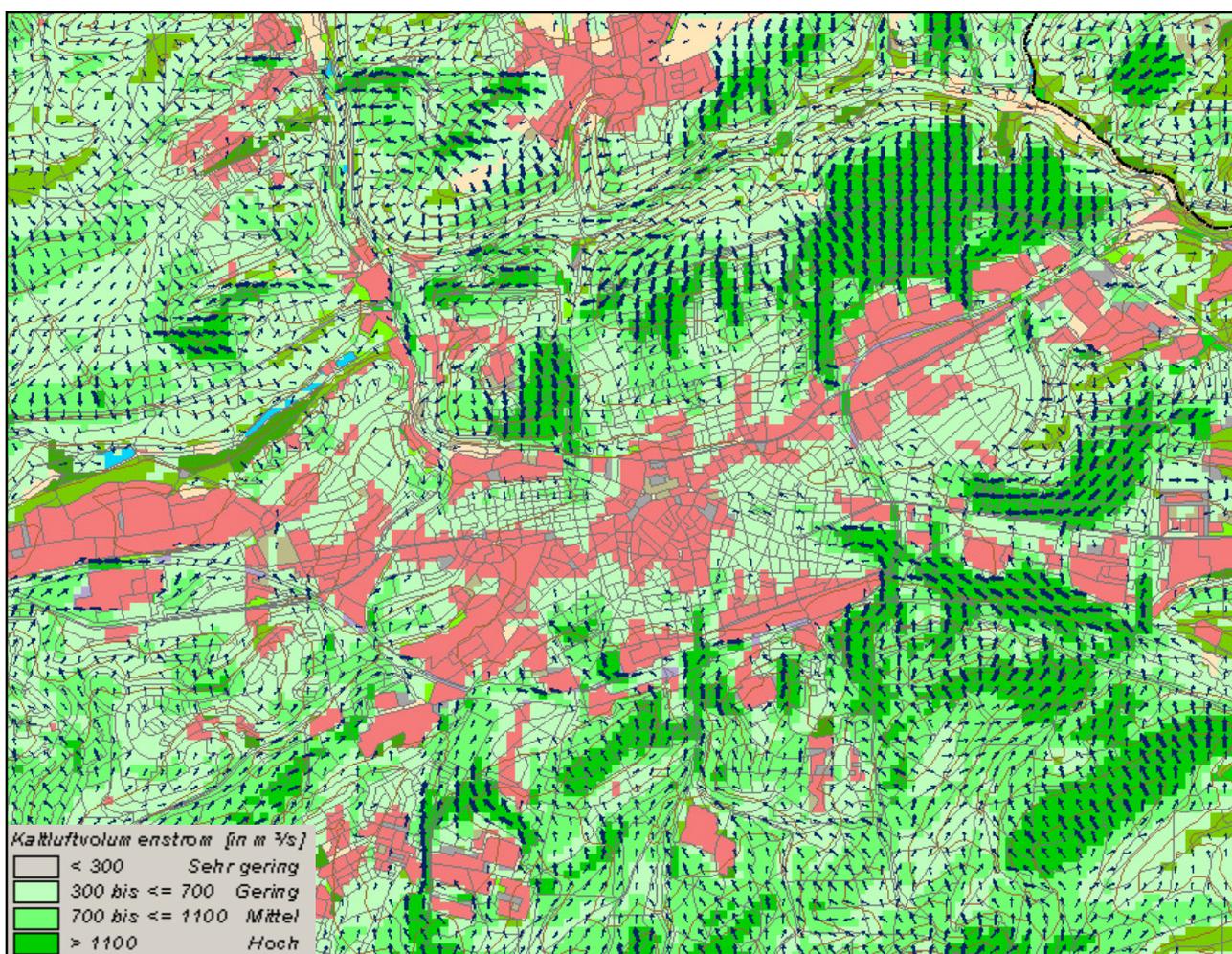


Abbildung 40: Kaltluftvolumenstrom und Strömungsfeld im Kerngebiet

Innerhalb der Bebauung verringert sich der Massenstrom rasch auf ein mittleres Niveau, bevor er auf niedrige Werte absinkt. Im innenstadtnahen Raum liegen somit keine nennenswerten Kaltluftvolumenströme mehr vor. In den dörflichen und weniger stark überbauten Stadtteilen Kaiserslauterns ist, abhängig von der Lage im Raum, verbreitet ein mittlerer Kaltluftvolumenstrom zu beobachten. Die hohen Werte sind daher mit der Reliefsituation einerseits und der Struktur der Kaltluft produzierenden Grünfläche andererseits verknüpft. Über den Kuppenbereichen der Höhenzüge treten hingegen meist geringe bis sehr geringe Volumenströme auf. Sie befinden sich in der, verglichen mit den Talbereichen, vergleichsweise warmen Temperaturzone (→ Temperaturinversion).

5.1.4 Fazit

Mit der durchgeführten Klimaaanalyse konnten verschiedene Parameter zur oberflächennahen Lufttemperatur und zum Kaltlufthaushalt im Raum Kaiserslautern flächendeckend berechnet werden. Um die Modellergebnisse zu validieren, wurden umfangreiche Feldmessungen während vergleichbarer meteorologischer Rahmenbedingungen durchgeführt. Die eigenbürtigen, lokalen Strömungsphänomene, die durch die Modellrechnung abgebildet werden, können in ihrer räumlichen Ausprägung zum großen Teil über die Messungen belegt werden. Angaben zur Lufttemperatur, Strömungsrichtung und -Geschwindigkeit der Kaltluft liegen in den gleichen Größenordnungen.

Die vorliegenden Modellergebnisse können somit als geeignet angesehen werden, um sie als Grundlage für die sich anschließende Ableitung der klima- und immissionsökologischen Funktionen im Stadtgebiet Kaiserslautern anzuwenden.

5.2 Lufthygiene

Die durchgeführte lufthygienische Untersuchung der verkehrsinduzierten Luftschadstoffbelastung beruht auf der Einbindung der durch das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs HBEFA (UBA 2004) ausgewiesenen Emission in das numerische Simulationsmodell FITNAH (vgl. Kap. 5.3). Ausgehend von den Verkehrsmengen für die relevanten Straßenabschnitte wurde für das Stadtgebiet Kaiserslautern die Ausbreitungssituation für die verkehrstypische Leitkomponenten Stickstoffdioxid (NO₂) und Feinstaub (PM₁₀) (Bezugsjahr 2006) während einer austauscharmen Wetterlage berechnet. Darüber hinaus sind auch die gewerblichen NO₂-Immissionen für diese Wetterlage separat als Zusatzbelastung modelliert worden.

Die Modellierung von Immissionsfeldern geht dabei über den punkthaften Charakter von Messungen hinaus und macht zudem die räumliche Komponente bei der Ausprägung von Luftschadstoffe deutlich. Bei der Interpretation der vorliegenden Modellergebnisse sollte allerdings berücksichtigt bleiben, dass sich diese noch auf der Mesoskalenebene bewegen und z.B. Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst wurden. Bei der Bewertung der Modellergebnisse muss bedacht werden, dass mikroskalige Sondersituationen innerhalb der angewandten Rasterauflösung nur begrenzt wiedergespiegelt werden können. Die Immissionsbelastung wird im Rahmen der eingesetzten Methodik vor allem durch Verkehrsmenge und Fahrsituation beeinflusst. Im Mittelpunkt der vorliegenden Ausbreitungsrechnung steht somit vielmehr die flächenhafte Belastungssituation im Stadtgebiet Kaiserslautern und die Ausweisung von lufthygienischen Belastungsschwerpunkten.

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 Simulationsrechnungen für die Schadstoffausbreitung erfolgten in den unter Kap. 3.2.4 beschriebenen Untersuchungsgebieten mit einer Rasterauflösung von 100 m im Umland bzw. 50 m im Kerngebiet. 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 innerhalb des Kerngebietes eingegangen, welches die relevanten Hot-Spots mit einschließt. Die Ergebniskarten für den Gesamttraum sind dem Anhang beigefügt.

5.2.1 Verkehrsbedingte Luftbelastung

5.2.1.1 Stickstoffdioxid (NO₂)

Bei dem Szenario einer austauscharmen Wetterlage ist von einer hohen Belastungssituation auszugehen, da die atmosphärischen Verdünnungsprozesse nicht durch die übergeordnete Strömung, sondern lediglich durch kleinräumig wirksame Prozesse erfolgen. Diese Windsysteme bilden sich, angetrieben durch Kaltluftabflüsse und strukturbedingten Temperaturunterschieden, zwischen bebauten und unbebauten Flächen aus. Das Immissionsfeld wird somit ausschließlich durch die Immissionssituation und die eigenbürtigen aus dem Umland bzw. Stadtraum entstehenden Strömungssystemen geprägt. Die NO₂-Immission im Kerngebiet in Abb. 41 dargestellt, wobei zur Verdeutlichung das aggregierte Strömungsfeld als 100 m x 100 m Raster mit abgebildet ist.

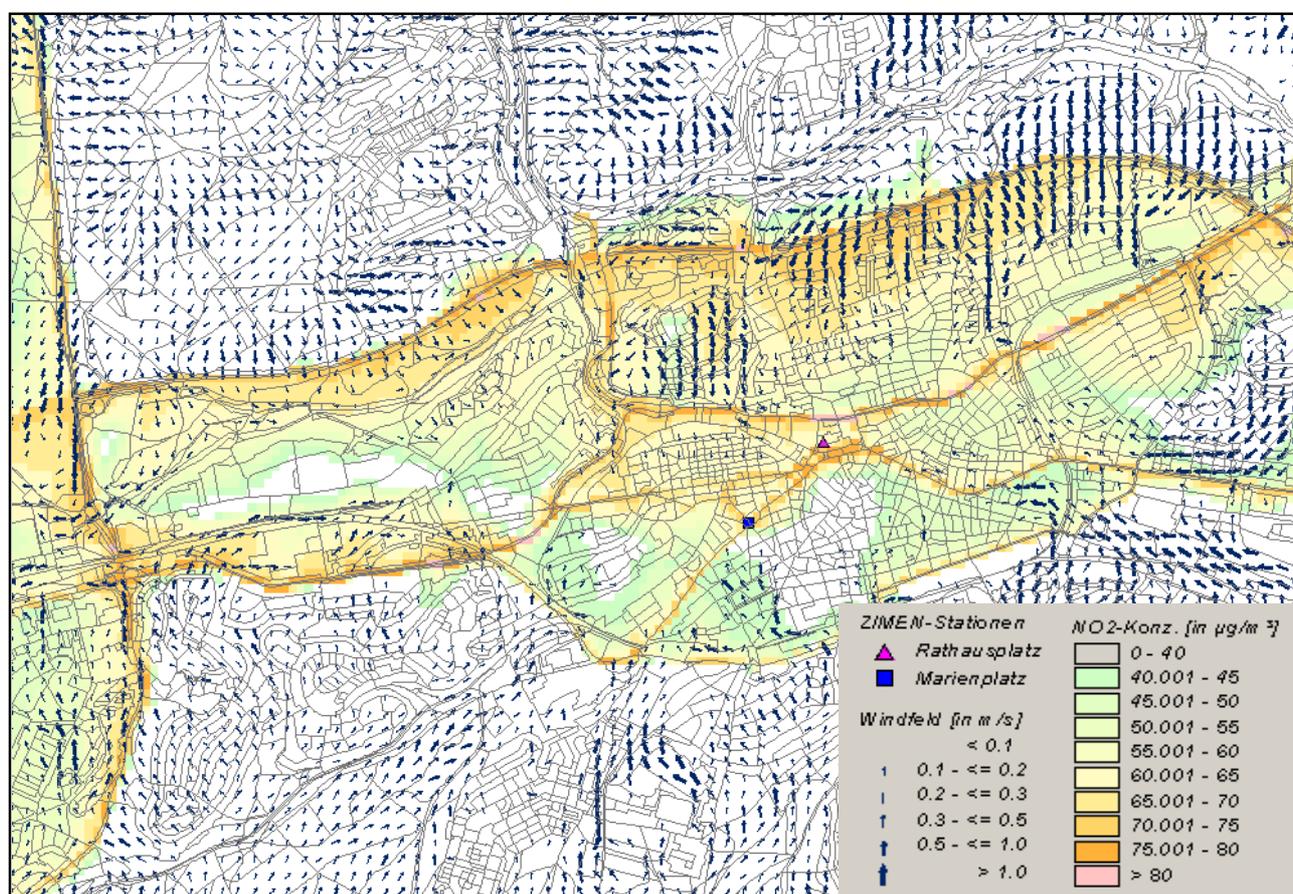


Abbildung 41: Windfeld und NO₂-Immission im Kerngebiet während einer austauscharmen Wetterlage

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 57 000 Kfz/Tag
- Opelkreisel (bis zu 41 000 Kfz/Tag)

- Pariser und Mainzer Straße (bis zu 37 900 Kfz/Tag)
- Lauterstraße (bis zu 34 800 Kfz/Tag)
- Hohenecken-Pirmasens-Road (bis zu 31 170 Kfz/Tag)
- Berliner Straße (bis zu 23 300 Kfz/Tag)

Dies spiegelt sich im Immissionsfeld wieder, wobei die höchsten Immissionen von bis zu $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 im Straßenraum der Mainzer Straße anzutreffen sind. Hohe Verkehrszahlen mit entsprechenden Emissionen einerseits und eingeschränkter Luftaustausch andererseits begünstigen das Auftreten von Belastungen. Ähnlich hohe Konzentrationen von mehr als $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden für die Pariser Straße modelliert, wobei dies vor allem den Bereich westlich der Brandenburger Straße betrifft. Vergleichbare NO_2 -Konzentrationen wurden auch im Verlauf des Opelkreises sowie der Lauterstraße modelliert. Im innenstadtnahen Raum liegen die Konzentrationen des Straßenraums meist in einer Größenordnung von $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 , wobei die Werte im Siedlungsraum rasch auf ein niedrigeres Niveau absinken.

Das Konzentrationsniveau wird dabei wesentlich von vorhandenen Kaltluftbewegungen mitbestimmt. Wie Abb. 41 zeigt, geht die räumliche Ausprägung der Immissionen mit dem Kaltluftströmungsfeld einher und führt zu deren Verdriftung. Die abgebildeten Pfeile drücken die Strömungsrichtung sowie über ihre Größe die Windgeschwindigkeit aus. So sind die mit NO_2 beaufschlagten Bereiche meist im Lee der überströmten Straßenabschnitte anzutreffen, was sich deutlich am Verlauf der A 6 zeigt. Hier führt die von den nördlich gelegenen Hängen einströmende Kaltluft zu einer Verfrachtung von NO_2 , welche, ausgehend vom Straßenraum, bis zu $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 in einer Entfernung von 700 m betragen kann. Ein ähnlicher Effekt ist, wenn auch etwas schwächer ausgeprägt, im Bereich Opelkreisel sowie entlang der Pariser und Mainzer Straße zu beobachten. Innerhalb der Siedlungsräume betragen die NO_2 -Konzentrationen meist zwischen $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 .

Die Ergebnisse charakterisieren sowohl hinsichtlich der Immissionen als auch der Wetterlage eine „Worst-Case“-Situation, so dass sich die Immissionsfelder in einer ersten Näherung mit der Kurzzeitbelastung der 22. BImSchV (2002) vergleichen lassen (vgl. Kap. 3.2.1.3). Dahingehend sind die modellierten Werte in etwa mit den Messergebnissen des 98-Perzentsils an den ZIMEN-Stationen vergleichbar. Das ist der Konzentrationswert eines Schadstoffs, der in einem Jahr höchstens an 2% der Messzeiten (98 Perzentil) überschritten wird.

Während an der Station Rathausplatz ein 98-Perzentil von $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für das Jahr 2006 gemessen wurde, konnte mit der Modellrechnung ein Wert von $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ermittelt werden. Der Durchschnitt der Jahre 2002 bis 2006 liegt bei $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 . Am St. Marienplatz steht den gemessenen $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 ein berechneter Wert von $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber, wobei das Mittel der Jahre 2002 bis 2006 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 beträgt. Die vorliegenden Ergebnisse liegen damit in einer mit den gemessenen Werten vergleichbaren Größenordnung, wenngleich die NO_2 -Konzentration am Standort Rathausplatz eher unterschätzt wird.

5.2.1.2 Feinstaub (PM10)

Insgesamt ergeben sich für die Komponente PM10 ähnliche Belastungsschwerpunkte wie für die NO_2 -Immission. Abbildung 42 zeigt das Immissionsfeld für Feinstaub während einer austauscharmen Wetterlage, wie sie im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung zu erwarten ist. Dabei wird die Verfrachtung der Immissionen durch die auftretenden Kaltluftbewegungen vor allem im Verlauf der A 6 sichtbar, so dass meist im Lee der Autobahn Immissionen anzutreffen sind.

Auf vielen Abschnitten im Verlauf von Mainzer Straße/Lauterstraße sowie Pariser Straße steigen die Immissionen in den Fahrbahnbereichen lokal auf über $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an. Im Straßenraum des Opelkreisels treten bis zu $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM₁₀ auf. Trotz der um bis zu 15 tsd. Kfz/Tag höheren Verkehrsmenge sind die maximalen Feinstaub-Konzentrationen entlang der A 6 meist geringer als bei den innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen und gehen kaum über $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM₁₀ hinaus. Die Ursache liegt darin begründet, dass im Bereich der Kaltluftabflüsse eine stärkere Verdünnung der Feinstaub-Konzentration erfolgt. Im innerstädtischen Raum sind die Austauschbedingungen durch die Bebauung hingegen oft reduziert, so dass sich hier vergleichsweise hohe PM₁₀-Immissionen anreichern können.

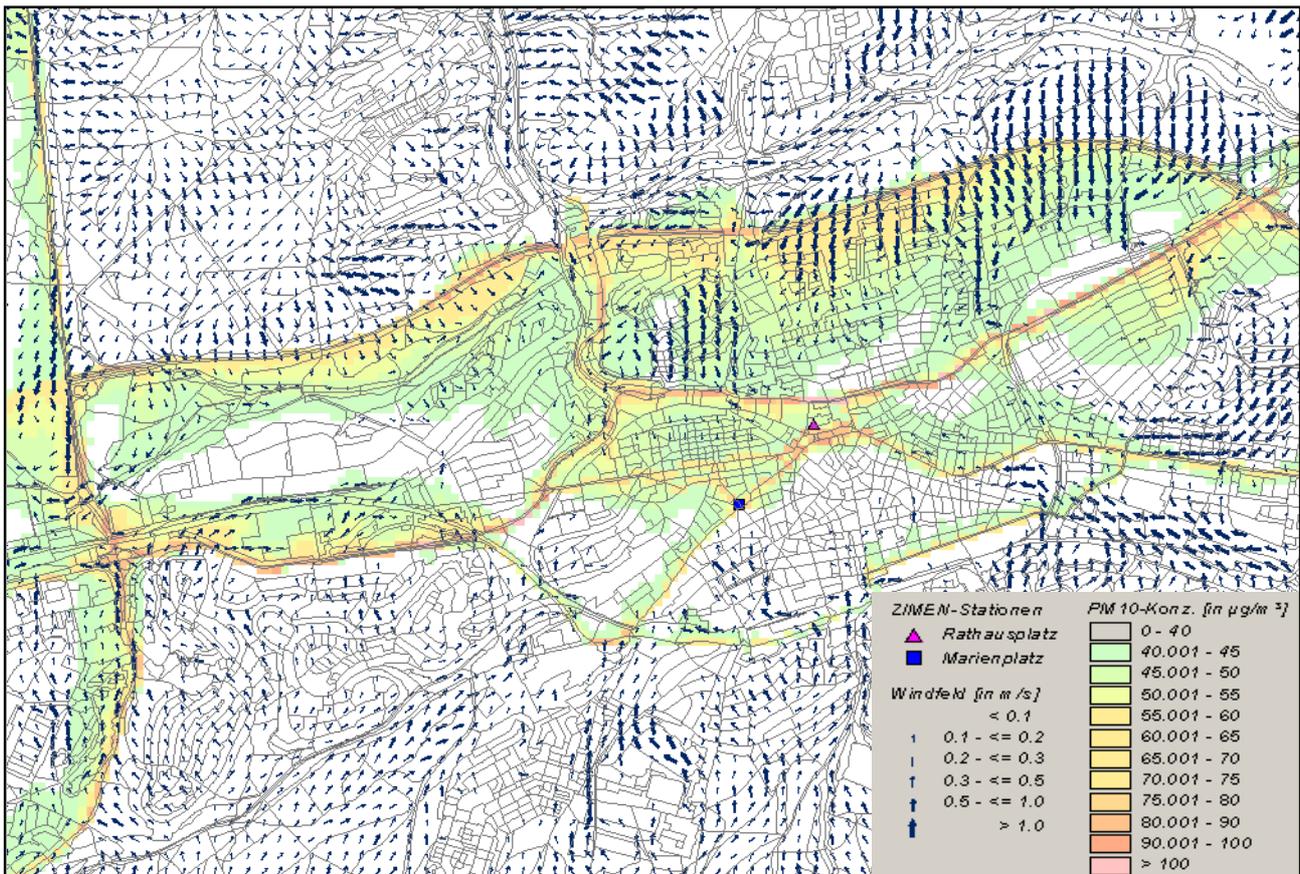


Abbildung 42: Windfeld und PM₁₀-Immission im Kerngebiet während einer austauscharmen Wetterlage

Im näheren Umfeld von Burgstraße und Fruchthallstraße liegt ein Immissionsniveau von $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vor, wobei die Verkehrsstärke jeweils bis zu 18 tsd. Kfz/Tag beträgt. An der nördlich gelegenen Messstation Rathausplatz tritt eine berechnete Feinstaub-Konzentration von $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf. Das gemessene Mittel der Jahre 2002 bis 2005 ergibt für das 98-Perzentil der Kurzzeitbelastung $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (LUWG 2009).

Das Feinstaub-Messsystem wurde Ende 2006 an den Standort St. Marienplatz umgesetzt. Im Bereich der Königstraße (bis zu 13 tsd. Kfz/Tag), in deren Nähe sich die Station St. Marienplatz befindet, liegt die PM₁₀-Belastung zwischen $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diesem Modellwert steht ein gemessenes mittleres 98-Perzentil der Jahre 2006 bis 2008 in Höhe von $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber, wobei der maximale Tagesmittelwert für diesen Zeitraum $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM₁₀ beträgt.

Im Siedlungsraum der Innenstadt betragen die Konzentrationswerte für Feinstaub häufig zwischen 40 und $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aufgrund der räumlichen Ausprägung des berücksichtigten Hauptstraßennetzes ist der Norden Kaiserslauterns tendenziell höher mit Immissionen beaufschlagt als das südliche Stadtgebiet.

5.2.2 Gewerbliche NO₂-Immission

Neben der verkehrsbedingten Luftbelastung stellen die Emissionen aus Gewerbe und Industrie eine weitere relevante Quelle dar. Wie am Beispiel der verkehrsbezogenen Schadstoffkomponenten bereits erläutert, wird das Immissionsfeld vor allem durch das lokale Strömungsverhalten der Kaltluft gesteuert. Bedeutsame Emissionen von Gewerbetrieben sind vor allem im westlichen Stadtgebiet Kaiserslauterns verortet. Dabei werden die freigesetzten Schadstoffe mit der Strömung verdriftet, wie Abb. 43 beispielhaft für die Komponente NO₂ zeigt. Die Konzentration der Immissionen wird durch die freigesetzte Stoffmenge einerseits und die Höhe der Freisetzung (Schlothöhe) andererseits bestimmt. Die höchsten Konzentrationen treten westlich der Innenstadt auf, wo bei einer Freisetzungshöhe von 5 m lokal bis zu 43 µg/m³ NO₂ berechnet wurden. Ein weiterer Immissionsschwerpunkt ist westlich des Hauptbahnhofs lokalisiert, welcher sich aus mehreren Einzelquellen zusammensetzt. Da die Emissionen hier in größeren Quellhöhen zwischen 17 m und 64 m freigesetzt werden, ist ein deutliches Verdriften der Immissionen in nördliche Richtung zu beobachten.

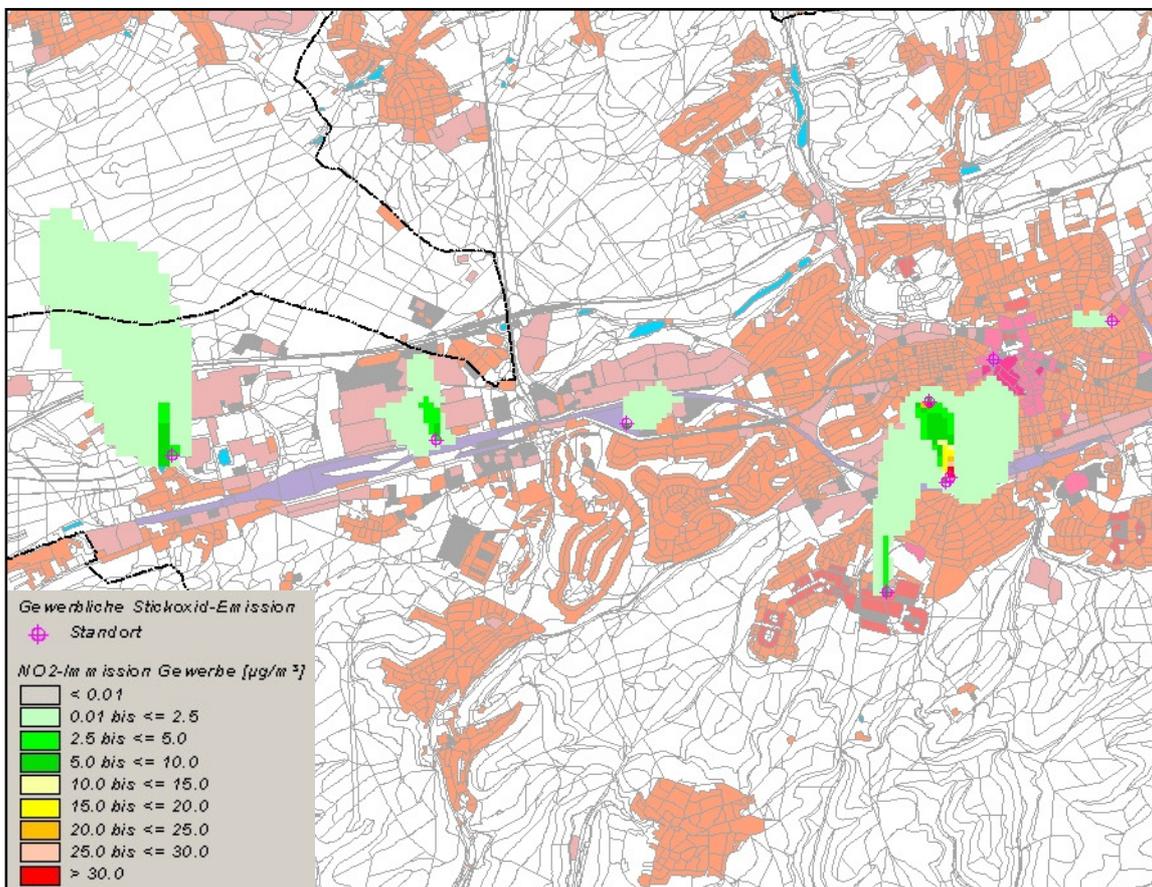


Abbildung 43: Gewerbebezogene NO₂-Immission im westlichen Stadtgebiet

Die maximale Zusatzbelastung an gewerbebezogenem NO₂ beträgt westlich des Hauptbahnhofs bis zu 37 µg/m³ und geht in einer Entfernung von 300 m vom Freisetzungsort auf unter 10 µg/m³ zurück (dunkelgrüne Farben). Im Bereich der übrigen betrachteten Gewerbebestände sind die Werte generell geringer und gehen nicht über 10 µg/m³ hinaus. Die Konzentrationen innerhalb der durch Gewerbeimmissionen beaufschlagten Flächen betragen, abgesehen von den „Hot-Spots“, meist weniger als 2,5 µg/m³ NO₂ (hellgrüne Farbe). Die absolute Reichweiten bis zum Abklingen der Immissionen betragen, ausgehend von der Quelle, bis zu 1000 m südlich der Innenstadt und 2000 m im Bereich Einsiedlerhof. Diese durch Gewerbeimmissionen geprägten Bereiche werden als eigener Legendenpunkt in die Klimafunktions- und Planungshinweiskarte aufgenommen.

7. Klimaökologische Funktionen

Im Folgenden wird auf die Klimafunktionskarte als Teilergebnis 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
- 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 des Stadtgebietes 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 Ausgangspunkt 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.

7.1 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 kaltluftproduzierenden 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. 792 ha für die sehr hohe und 3 799 ha für die hohe Kaltluftlieferung beträgt der Flächenanteil dieser Kategorie an der Gesamtgrünfläche ca. 7 % bzw. 34 %.

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 Einwirkungsbereich vergrößern. Die Flächensumme dieser mittleren Kategorie beträgt ca. 5 814 Hektar, was einem Anteil von ca. 52 % an der Gesamtgrünfläche entspricht.

Grünflächen, die durch eine *geringe Kaltluftlieferung* charakterisiert sind, haben mit 684 Hektar einen Anteil von lediglich ca. 6 % 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 Wirkungsbereich 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 relevant.

Tabelle 7 fasst die ausgewiesenen Kategorien zusammen:

| Kaltluftlieferung | Gesamtgröße der Klasse in Hektar | Anteil am Grünflächenbestand |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Sehr hoch | 792 | 7 % |
| Hoch | 3799 | 34 % |
| Mittel | 5814 | 52 % |
| Gering | 684 | 6 % |

Tabelle 7: Bilanzierung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Kaiserslautern

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

7.2 Siedlungsräume

Wie in Kap. 3.2.4 beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke in vier Klassen auf Basis des Bewertungsindex PMV (Predicted Mean Vote) ausgewiesen worden. Unter Berücksichtigung der verkehrsbedingten Immissionen ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Bereiche einerseits sowie günstige bzw. sehr günstige Areale andererseits. Letztere sind meist, durch die von kaltluftproduzierenden Grünflächen ausgehende *Kaltlufteinwirkbereiche*, nur gering überwärmt und durch eine ausreichende Durchlüftung gekennzeichnet. Kaltlufteinwirkbereiche innerhalb der Bebauung sind durch die Schraffur gekennzeichnet. Es werden insgesamt ca. 36 % des Siedlungsraums durchlüftet.

Abbildung 43 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte die Belastungssituation im Innenstadtbereich von Kaiserslautern, wobei belastete Bereiche orange und violett 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 Leitbahnfunktionen 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 Reihenhausbebauung 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.

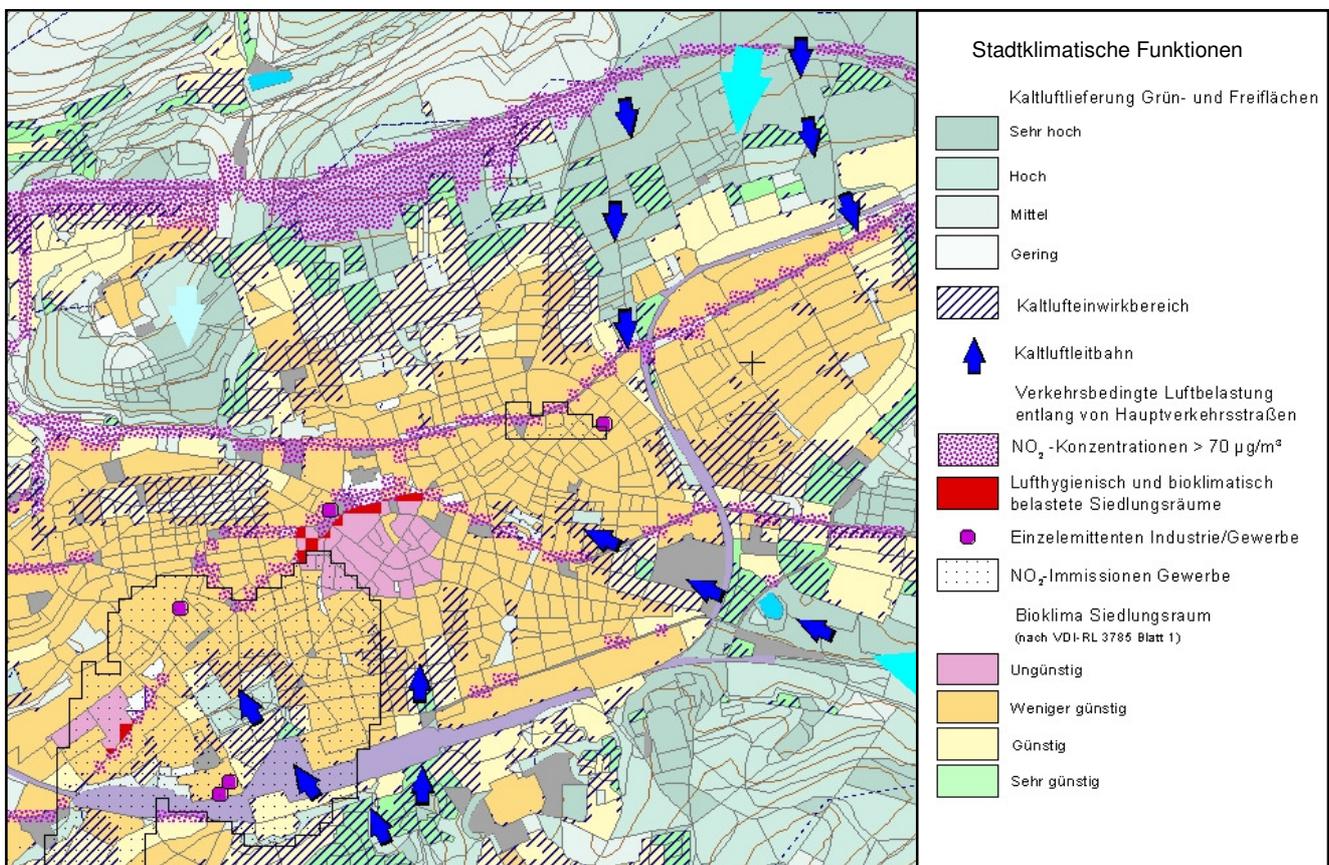


Abbildung 44: Klimafunktionen im Bereich Kaiserslautern-Ost

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.

Darüber hinaus können auch in den äußeren Stadtteilen vereinzelte Baublöcke mit weniger günstigen Bedingungen hervortreten, wenngleich die Belastungsintensität nicht der des Innenstadtbereiches entspricht. Dabei handelt es sich meist um vergleichsweise kleine Baublöcke im Bereich des 100 m Rasters (s. Kap. 3.2.4). In den dörflich geprägten Stadtteilen kann die bioklimatische Situation aber generell als günstig beurteilt werden.

Die Darstellung der *verkehrsbedingten Luftbelastung* entlang von Hauptverkehrsstraßen ergänzt das Spektrum auftretender Belastungen (vgl. Kap. 6.3, S.59). 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 70 µg/m³ Stickstoffdioxid (NO₂) modelliert wurde. Dieses Niveau entspricht in etwa dem mittleren 98%-Wertes der Jahre 2002 bis 2008 an der ZIMEN-Messstation Rathaus.

In diesem Zusammenhang sind Siedlungsräume vor allem entlang von Abschnitten der folgenden Hauptverkehrsstraßen beaufschlagt:

- Autobahn 6
- Verlauf Lauterstr. – Ludwigstr. – Mainzer Str.
- Pariser Straße
- Bereich Burgstr./Fruchthallstr.

Die Ausbreitungsrechnung zeigt, dass zudem auch Abschnitte weiterer Hauptstraßen potenziell lufthygienisch belastet sind. Die höchste Belastungssituation ist gegeben, wenn neben der bioklimatischen auch eine

lufthygienische Belastung vorliegt. Die Kombination beider Elemente zu *bioklimatisch und lufthygienisch belasteten* Bereichen ist in der Klimafunktionskarte als eigene Signatur enthalten. Diese Belastung ist lediglich im Innenstadtbereich anzutreffen sowie lokal in der Königstraße in Höhe der Pfaff-Werke. Diese Belastungsbereiche erstrecken sich jedoch nicht über den gesamten Straßenverlauf, so dass nur einzelne Straßenabschnitte bzw. Baublöcke betroffen sind. In den peripheren, dörflichen Stadtteilen ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Belastungsstufe als sehr gering einzuschätzen.

Im Umfeld von gewerblichen Einzelemittenten sind zudem die bodennahen NO₂-Immissionen während austauscharmer Wetterlagen ausgewiesen worden. Von dieser Zusatzbelastung werden vor allem der Südwestliche Innenstadtbereich bis zum Bahndamm sowie Areale in den westlich gelegenen Gewerbegebieten beaufschlagt.

7.3 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 7 Leitbahnen ausgewiesen, die sich im Kaltluftströmungsfeld mit überdurchschnittlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich abzeichnen:

- Bereich Baalborner Weg
- Bereich Wartenberger Weg
- Östliches Lautertal/Volkspark
- Tiefenlinie des Vogelwoog
- 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.

8 Planungskarte Stadtklima

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. Eine tabellarische Zusammenstellung der Hinweise ist im Anhang enthalten.

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

8.1 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.

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 8 fasst die Flächenanteile der ausgewiesenen Kategorien zusammen:

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

Tabelle 8: 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.

8.2 Siedlungsräume

Die Siedlungsräume zeichnen sich durch eine unterschiedliche Bebauungsdichte aus. Daraus resultieren unterschiedliche **bioklimatische Bedingungen**, die während sommerlicher, austauscharmer Strahlungswetterlagen durch lokale Luftaustauschprozesse mitbestimmt werden (vgl. Kap. 7.2, S. 62). Daraus folgt auch eine differenzierte planerische Betrachtung. Eine Wohnbebauung, welche **günstige bioklimatische Bedingungen** aufweist, ist meist durch eine offene Bauungsstruktur, einem überdurchschnittlich hohen Grünflächenanteil sowie einer wirksamen Kaltluftströmung gekennzeichnet.

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

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

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

Für diese Gebiete können die folgenden Empfehlungen gegeben werden:

- Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils
- Erhalt aller Freiflächen
- Reduzierung/Vermeidung von Emissionen
- Herabsetzung des Versiegelungsgrades

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

8.3 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, 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. 7.3 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**.

9 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 auf (Abb. 44). Eine Flächenbilanzierung der vorliegenden Belastungsklassen ergibt:

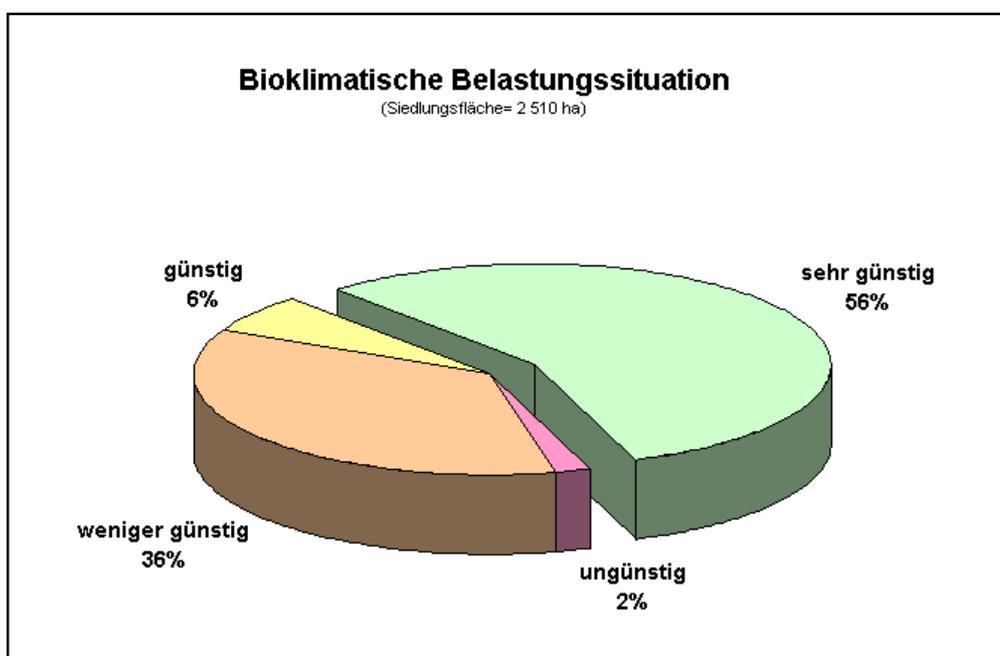
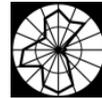


Abbildung 45: Flächenanteile der bioklimatischen Belastungssituation im Stadtgebiet

- 2 % der Siedlungsfläche sind als bioklimatisch ungünstig einzuordnen
- 27 % sind mit weniger günstigen Bedingungen mäßig belastet
- 6 % weisen durch günstige bioklimatische Verhältnisse eine geringe Belastung auf
- 56 % des Siedlungsraumes sind als sehr günstig zu beurteilen
- Lediglich 0,1 % des Siedlungsraums ist bioklimatisch und zugleich lufthygienisch belastet

Die durchgeführte Ausbreitungsrechnung für den verkehrstypischen Luftschadstoff Stickstoffdioxid (NO₂) hat zudem die lufthygienischen Belastungsbereiche im Hauptstraßennetz während austauscharmer Wetterlagen deutlich gemacht. Dessen Größe beträgt 253 ha, was einem Anteil von etwa 1,8 % 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.



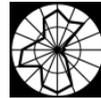
Als klima- und immissionsökologisches Qualitätsziel ergibt sich die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung wichtiger Oberflächenstrukturen zur Verbesserung bzw. Erhaltung bioklimatisch günstiger Verhältnisse sowie der Luftqualität. Durch die Kenntnis der wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie Kaltluftentstehungsflächen, Luftleitbahnen und Komforträumen sowie ihrer qualitativen Einordnung steht mit der vorliegenden Untersuchung eine wichtige Grundlage zur Umsetzung dieser Ziele bereit.

10 Literatur

- BAST (2005): PM10-Emissionen an Außerortsstraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM10-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsrechnungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft 125, Bergisch-Gladbach, Juni 2005.
- DÜRING, I., Lohmeyer, A (2004): Modellierung nicht motorbedingter PM10-Emissionen von Straßen. KRdL-Experten-Forum „Staub und Staubinhaltsstoffe“, 10./11. November 2004, Düsseldorf. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, KRdL-Schriftenreihe Band 33.
- EICHHORN, J. (1995): Validierung eines Prognosemodells zur Vorhersage Kfz-bedingter Schadstoffimmissionen. Annal. Meteorol. 31, 339-340.
- 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.
- 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
- LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOBASISINFORMATIONEN (2008): ATKIS DLM für das Stadtgebiet Kaiserslautern und das nähere Umland.
- LUWG (2009): Daten des Zentralen Immissionsmessnetzes ZIMEN für die Stationen KL-Rathaus und KL-Marienplatz.
- MORISKE, H.-J. und E. TUROWSKI (2003): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. 9. Ergänzungslieferung
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- RÖCKLE, R. und C.-J. RICHTER (1995): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. PEF-Bericht 136, Forschungszentrum Karlsruhe.
- RODI, W. (1980): Turbulence models and their application in hydraulics. IAHR Section on Fundamentals of Division II: Experimental an mathematical fluid dynamics, Delft.
- SCHÄDLER, G. et al. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. PEF Bericht 138, Forschungszentrum Karlsruhe.
- STADT KAISERSLAUTERN (2008): Höheninformationen des digitalen 3D-Stadtmodells.
- STADT KAISERSLAUTERN (2008): Verkehrsmengen der Lärmkartierung.



- STEINICKE & STREIFENEDER (1996): Klima- und lufthygienische Untersuchung der Stadt Kaiserslautern – unter besonderer Berücksichtigung aktueller Planungen. Freiburg i. Br.
- ÖKOPLANA (2007): Klimagutachten zur geplanten Erweiterung des Gewerbegebietes Nordost – im Bereich „Hertelsbrunnen“ – in Kaiserslautern. Mannheim.
- UBA (2004): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 2.1/Februar 2004. 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 (1997): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (2008): Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.
22. BImSchV (2002): 22. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft-22. BImSchV), 11.09.2002, zuletzt geändert durch Art. 2 v. 13. 7.2004 I 1612.



- Anhang -

Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

Legende

Ausgleichsräume

- Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen
- Sehr hoch
- Hoch
- Mittel
- Gering

Kaltlufteinzugsgebiete

- Kaltluftvolumenstrom und Strömungsrichtung in den Kaltlufteinzugsgebieten

- Mittel / Hoch / Sehr hoch

Wirkungsräume

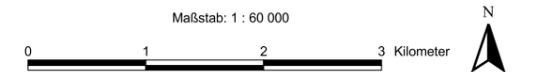
- Einwirkbereiche der Kaltluftentstehungsgebiete
- Wirkungsbereich der autochthonen Strömungssysteme innerhalb der Bebauung
- Verkehrsbedingte Luftbelastung der Siedlungsräume entlang von Hauptverkehrsstraßen *
- NO₂-Konzentrationen > 70 µg/m³
- Lufthygienisch und bioklimatisch belastete Siedlungsräume
- Einzelemitenten Industrie/Gewerbe
- Gewerbliche bodennahe NO_x-Immissionen während austauscharmer Weiterlagen
- Bioklimatische Belastung der Siedlungsräume (nach VDI-RL 3785 Blatt 1)

- Ungünstig
- Weniger günstig
- Günstig
- Sehr günstig

Luftaustausch

- Kaltluftleitbahn
- Gewässer
- Straßenfläche
- Gleisfläche
- Siedlungsfläche der Nachbargemeinden
- Höhenlinie (15 m-Abstand)
- Stadtgrenze Kaiserslautern

* Der potenziellen verkehrsbedingten Luftbelastung liegen die mit FITNAH für eine austauscharme Wetterlage modellierten Stickstoffdioxid-Immissionen zugrunde (Bezugsjahr 2006).



Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
Referat Umweltschutz
67653 Kaiserslautern
Tel. 06 31 - 365-0
Fax 06 31 - 365-2553

Auftragnehmer:

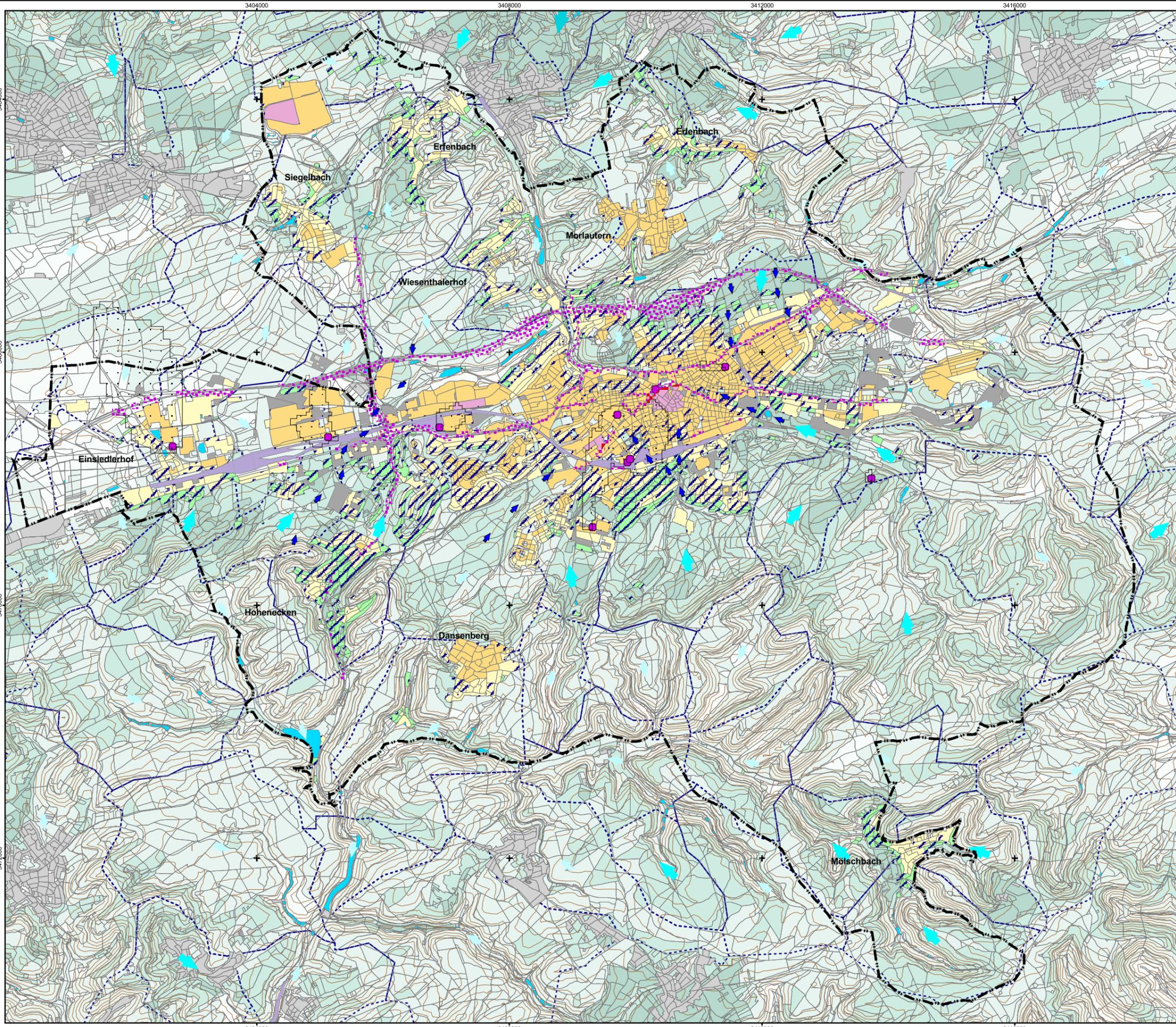


Große Pfahlstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
www.geo-net.de



Seckenheimer Hauptstr. 98
68239 Mannheim
Tel.: (0621) 474626
Fax: (0621) 475277
www.oekoplana.de

Hannover, Juli 2009



Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

Planungshinweise Stadtklima

Legende

Grün- und Freiflächen

Hohe stadtklimatische Bedeutung

 Kaltluftentstehungsgebiete mit Zuordnung zu belasteten Siedlungsräumen. **Hohe Empfindlichkeit** gegenüber Nutzungsintensivierung. Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen, Emissionen reduzieren.

Mittlere stadtklimatische Bedeutung

 Kaltluftentstehungsgebiete mit Zuordnung zu Siedlungsräumen mit günstigem Kleinklima. **Mittlere Empfindlichkeit** gegenüber Nutzungsintensivierung. Luftaustausch mit der Umgebung erhalten. Bei nutzungsintensivierenden Eingriffen Baukörperstellung beachten sowie Bauhöhen möglichst gering halten.

Geringe stadtklimatische Bedeutung

 Freiflächen mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete und/oder unbedeutender Kalt-/Fruchtluftproduktion. **Geringe Empfindlichkeit** gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßvolle Bebauung, die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, ist möglich.

Siedlungsräume

Wirkungsbereich der autochthonen Strömungssysteme innerhalb der Bebauung

 Gute Durchlüftung; überwiegend **günstige** bioklimatische Bedingungen

Klimatisch günstige Siedlungsräume

 Bewertungskategorie nach VDI: **Sehr günstig**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung. Günstiges Bioklima erhalten, **mittlere Empfindlichkeit** gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen bei Beachtung der Baukörperstellung, Bauhöhen möglichst gering halten.

 Bewertungskategorie nach VDI: **günstig**
Siedlungsstruktur mit meist guter Durchlüftung. Günstiges Bioklima erhalten, **geringe Empfindlichkeit** gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen bei Beachtung der Baukörperstellung, Bauhöhen möglichst gering halten.

Belastungsbereiche

Bewertungskategorie nach VDI: weniger günstig

 Siedlungsräume mit **geringer, in Einzelfällen mäßiger** bioklimatischer Belastung. **Sehr hohe Empfindlichkeit** gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine weitere Verdichtung, Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils, Erhalt aller Freiflächen, Entsiegelung und ggf. Begrünung der Blockinnenhöfe.

Bewertungskategorie nach VDI: ungünstig

 Siedlungsräume mit **mäßiger, in Einzelfällen hoher** bioklimatischer Belastung. **Hohe Empfindlichkeit** gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine weitere Verdichtung, Verbesserung der Durchlüftung und Erhöhung des Vegetationsanteils, Erhalt aller Freiflächen, Entsiegelung und ggf. Begrünung der Blockinnenhöfe.

Potenzielle verkehrsbedingte Luftbelastung der Siedlungsräume entlang von Hauptverkehrsstrassen *

 NO₂-Immission > 70 µg/m³; lufthygienischer Belastungsbereich während austauschamer Wetterlagen
* Der potenziellen verkehrsbedingten Luftbelastung liegen die mit FITNAH für eine austauschame Wetterlage modellierten Stickstoffdioxid-Immissionen zugrunde (Bezugsjahr 2006).

Einzelemitenten Industrie/Gewerbe

 Gewerbliche bodennahe NO₂-Immissionen während austauschamer Wetterlagen

Luftaustausch

Abgrenzung der Kaltluftzugsgebiete

 Kaltluftleitbahnen mit hoher Bedeutung
Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen. Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Bauhöhe möglichst gering halten, Neubauten längs zur Leitbahn ausrichten, Randbebauung möglichst vermeiden, Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.

Kaltluftleitbahnen mit mittlerer Bedeutung

 Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen. Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. Bauhöhe möglichst gering halten, Neubauten längs zur Leitbahn ausrichten, Randbebauung möglichst vermeiden, Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils.

Gewässer

Straßenfläche

Gleisfläche

Siedlungsfläche der Nachbargemeinden

Höhenlinie (10 m-Abstand)

Stadtgrenze Kaiserslautern

Maßstab: 1 : 60 000

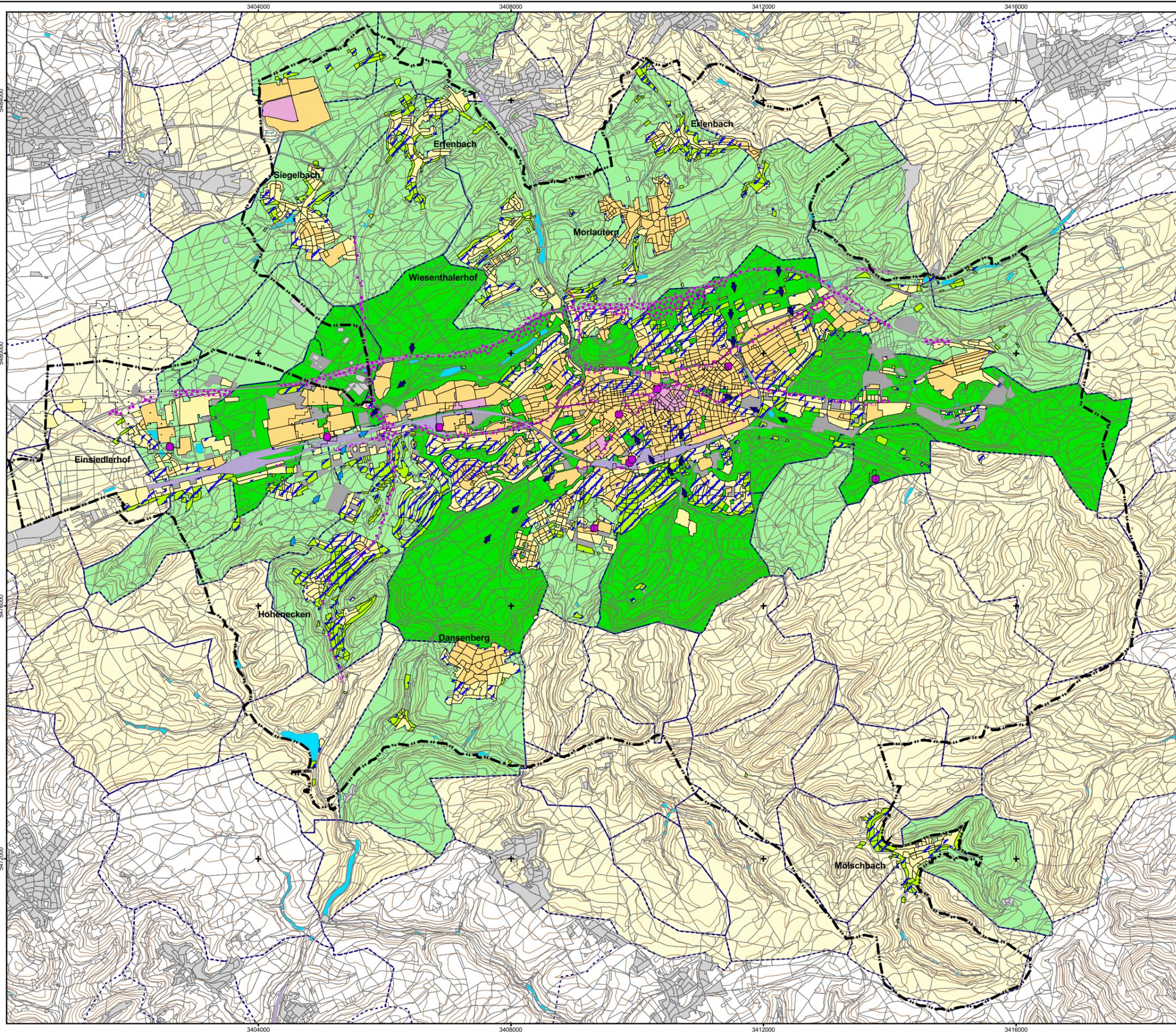


Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
Referat Umweltschutz
67653 Kaiserslautern
Tel. 06 31 - 365-0
Fax 06 31 - 365-2553

Auftragnehmer: 
Umweltentwicklung GmbH
Große Pfahlstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
www.geo-net.de

 Oekoplana
Seckenheimer Hauptstr. 98
68239 Mannheim
Tel.: (0621) 474626
Fax: (0621) 475277
www.oekoplana.de

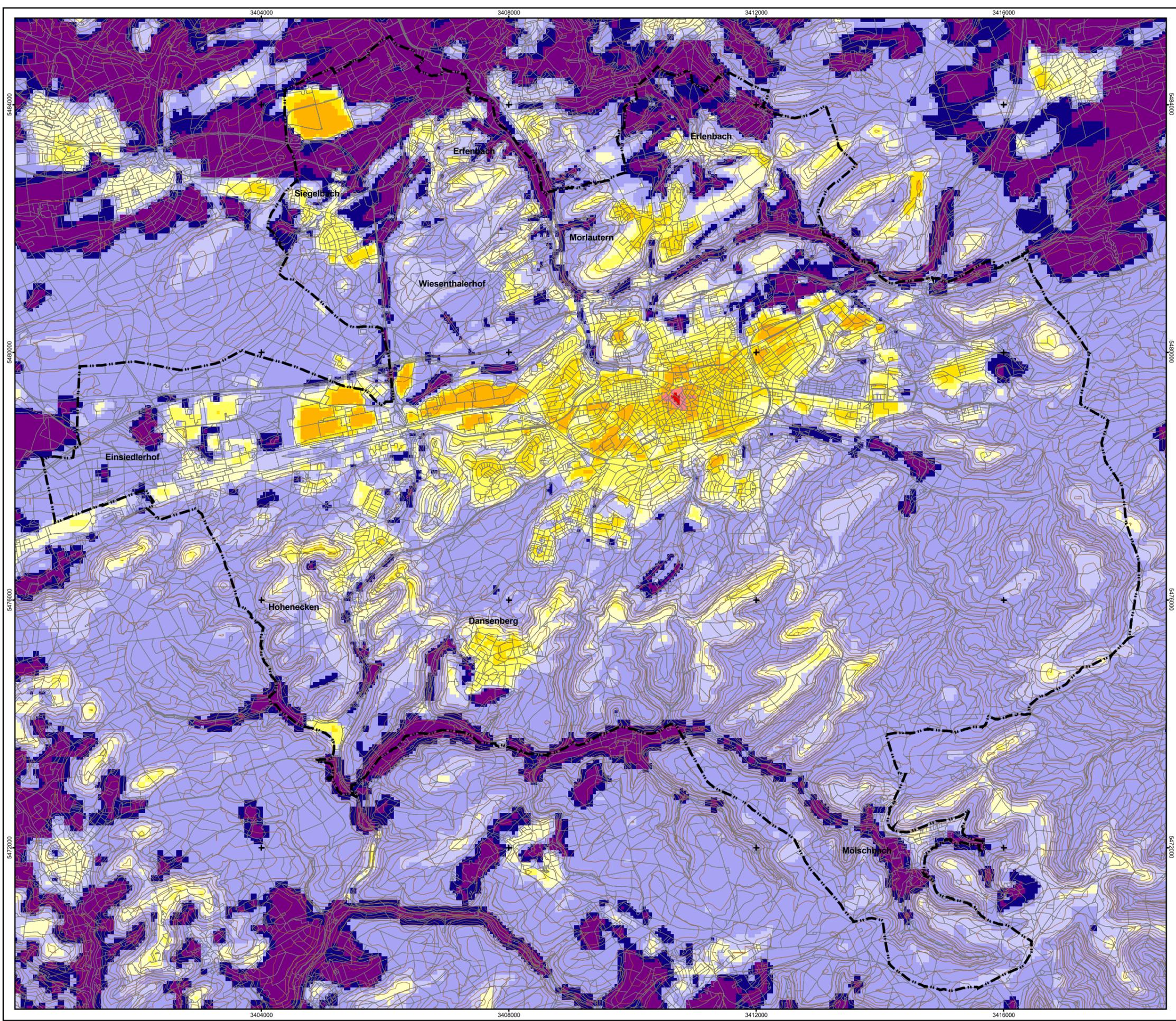
Hannover, Juli 2009



| Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen | | | | |
|--|---------------------|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Flächentyp - Stadtklimatische Bedeutung | Betroffene Funktion | Grund der Einstufung | Beurteilung der Empfindlichkeit | Maßnahmen |
| Grünflächen - hohe Bedeutung | Kaltluftlieferung | Kaltluftentstehungsgebiete mit Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsräumen. | Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. | <ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, • Mit benachbarten Freiflächen vernetzen. |
| | Kaltluftleitbahn | Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen. | Höchste Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. | <ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. • Bauhöhe möglichst gering halten, • Neubauten längs zur Luftleitbahn ausrichten. Randbebauung möglichst vermeiden. • Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, |
| Grünflächen - mittlere Bedeutung | Kaltluftlieferung | Kaltluftentstehungsgebiete mit Bezug zu bioklimatisch günstigen Siedlungsräumen. | Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. | <ul style="list-style-type: none"> • Luftaustausch mit der Umgebung erhalten. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, |
| | Leitbahn | Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungsgebieten und belasteten Siedlungsräumen. | Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. | <ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung baulicher Hindernisse, die einen Kaltluftstau verursachen könnten. • Bauhöhe möglichst gering halten, • Neubauten längs zur Luftleitbahn ausrichten. Randbebauung möglichst vermeiden. • Erhalt des Grün- und Freiflächenanteils. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, |
| Grünflächen - geringe Bedeutung | Kaltluftlieferung | Freiflächen mit geringem Einfluss auf Siedlungsgebiete und/oder unbedeutender Kalt-/Frischluffproduktion. | Geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. | <ul style="list-style-type: none"> • Maßvolle Bebauung, die den lokalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, ist möglich. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, |
| Siedlungsraum - klimatisch sehr günstig | Siedlungsraum | Siedlungsraum mit sehr günstigen bioklimatischen Bedingungen. Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit hohem Durchgrünungsgrad und guter Durchlüftung. | Mittlere Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen. | <ul style="list-style-type: none"> • Günstiges Bioklima erhalten. • Bauhöhen möglichst gering halten. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, • Baukörperstellung im Hinblick auf Kaltluftströmungen beachten. |

Fortsetzung Tab. Stadtklimatische Hinweise für Planungsentscheidungen

| | | | | |
|--|----------------------|--|---|--|
| <p>Siedlungsraum - klimatisch günstig</p> | <p>Siedlungsraum</p> | <p>Siedlungsstruktur mit günstigen bioklimatischen Bedingungen und meist guter Durchlüftung.</p> | <p>Geringe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Günstiges Bioklima erhalten. • Bauhöhen möglichst gering halten. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, |
| <p>Siedlungsraum - klimatisch weniger günstig</p> | <p>Siedlungsraum</p> | <p>Siedlungsstruktur mit weniger günstigen bioklimatischen Bedingungen.</p> | <p>Hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Möglichst keine weitere Verdichtung. • Verbesserung der Durchlüftung. • Erhöhung des Vegetationsanteils. • Erhalt aller Freiflächen. • Entsigelung und ggf. Begrünung der Blockinnenhöfe. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren. |
| <p>Siedlungsraum - klimatisch ungünstig</p> | <p>Siedlungsraum</p> | <p>Siedlungsstruktur mit ungünstigen bioklimatischen Bedingungen.</p> | <p>Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsintensivierenden Eingriffen.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Keine weitere Verdichtung. • Verbesserung der Durchlüftung. • Erhöhung des Vegetationsanteils. • Erhalt aller Freiflächen. • Entsigelung und ggf. Begrünung der Blockinnenhöfe. • Bei Verkehrseinfluss Emissionen reduzieren, |



Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

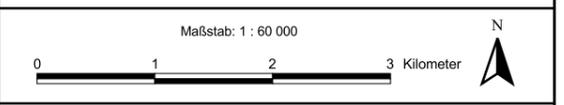
Oberflächennahe Lufttemperatur während einer austauscharmen Strahlungswetternacht

Legende
Temperatur in 2 m über Grund zum Zeitpunkt 4 Uhr in °C

| | |
|--|--------------|
| | < 14 |
| | 14 bis <= 15 |
| | 15 bis <= 16 |
| | 16 bis <= 17 |
| | 17 bis <= 18 |
| | 18 bis <= 19 |
| | 19 bis <= 20 |
| | 20 bis <= 21 |
| | 21 bis <= 22 |
| | > 22 |

Höhenlinie (15 m-Abstand)

Stadtgrenze Kaiserslautern

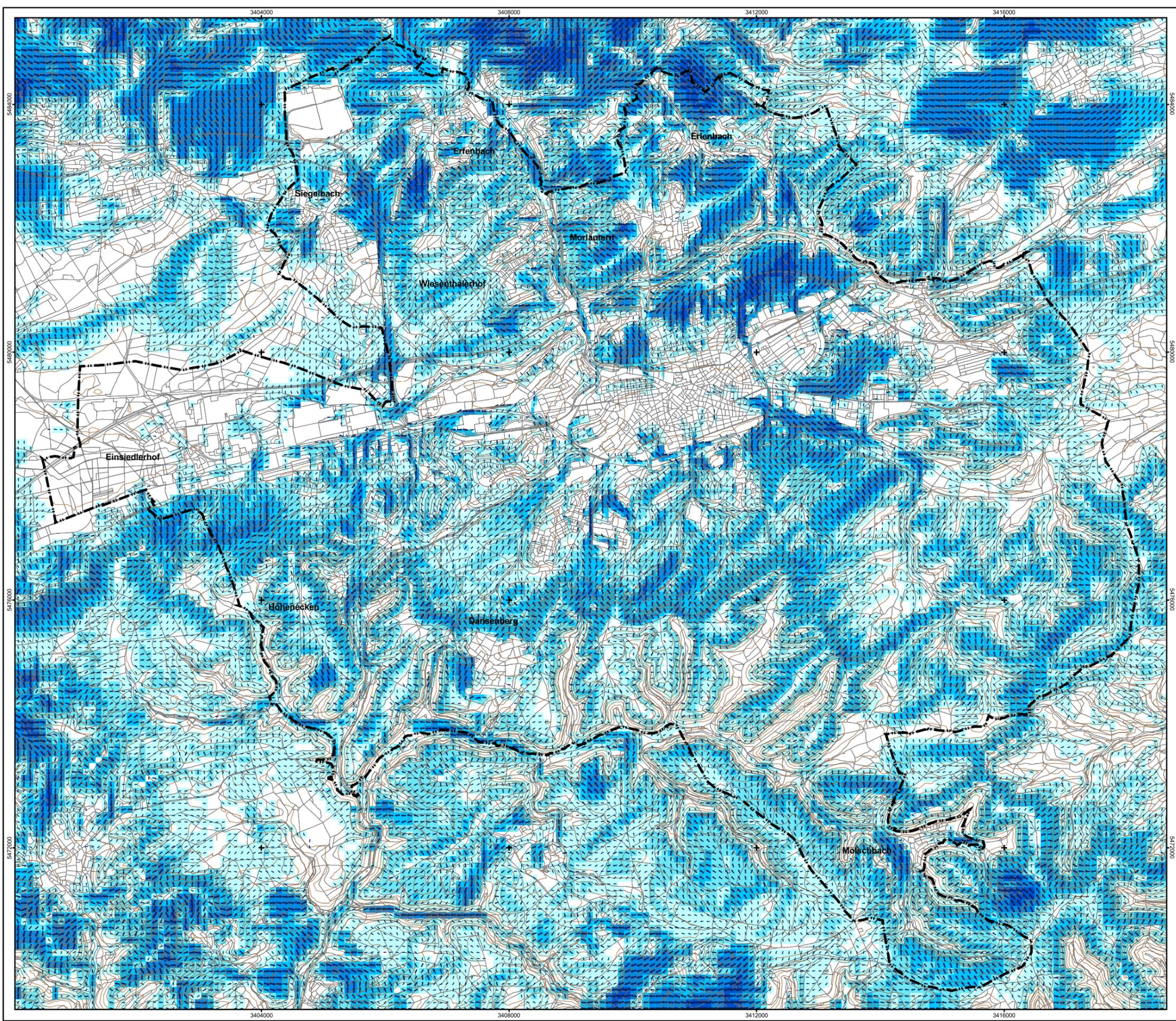


Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
Referat Umweltschutz
67653 Kaiserslautern
Tel. 06 31 - 365-0
Fax 06 31 - 365-2553

Auftragnehmer:

Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
www.geo-net.de

OKOPLANA
Seckenheimer Hauptstr. 98
68239 Mannheim
Tel.: (0621) 474626
Fax: (0621) 475277
www.eko-plana.de



Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

Autochthones Strömungsfeld und Windgeschwindigkeit während einer austauscharmen Strahlungswetternacht

Legende

Windvektoren (Geschwindigkeit in m/s; aggregierte 100 m Auflösung)

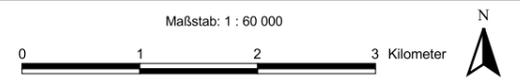
- < 0.1
- ↑ 0.1 bis =< 0.2
- ↑ 0.2 bis =< 0.3
- ↑ 0.3 bis =< 0.5
- ↑ 0.5 bis =< 1.0
- ↑ > 1

Windgeschwindigkeit in 2 m über Grund in m/s (kombinierte 100 m und 50 m Auflösung)

- < 0.1
- 0.1 bis =< 0.2
- 0.2 bis =< 0.3
- 0.3 bis =< 0.5
- 0.5 bis =< 1.0
- > 1

~ Höhenlinie (15 m-Abstand)

- - - Stadtgrenze Kaiserslautern



Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
 Referat Umweltschutz
 67653 Kaiserslautern
 Tel. 06 31 - 365-0
 Fax 06 31 - 365-2553

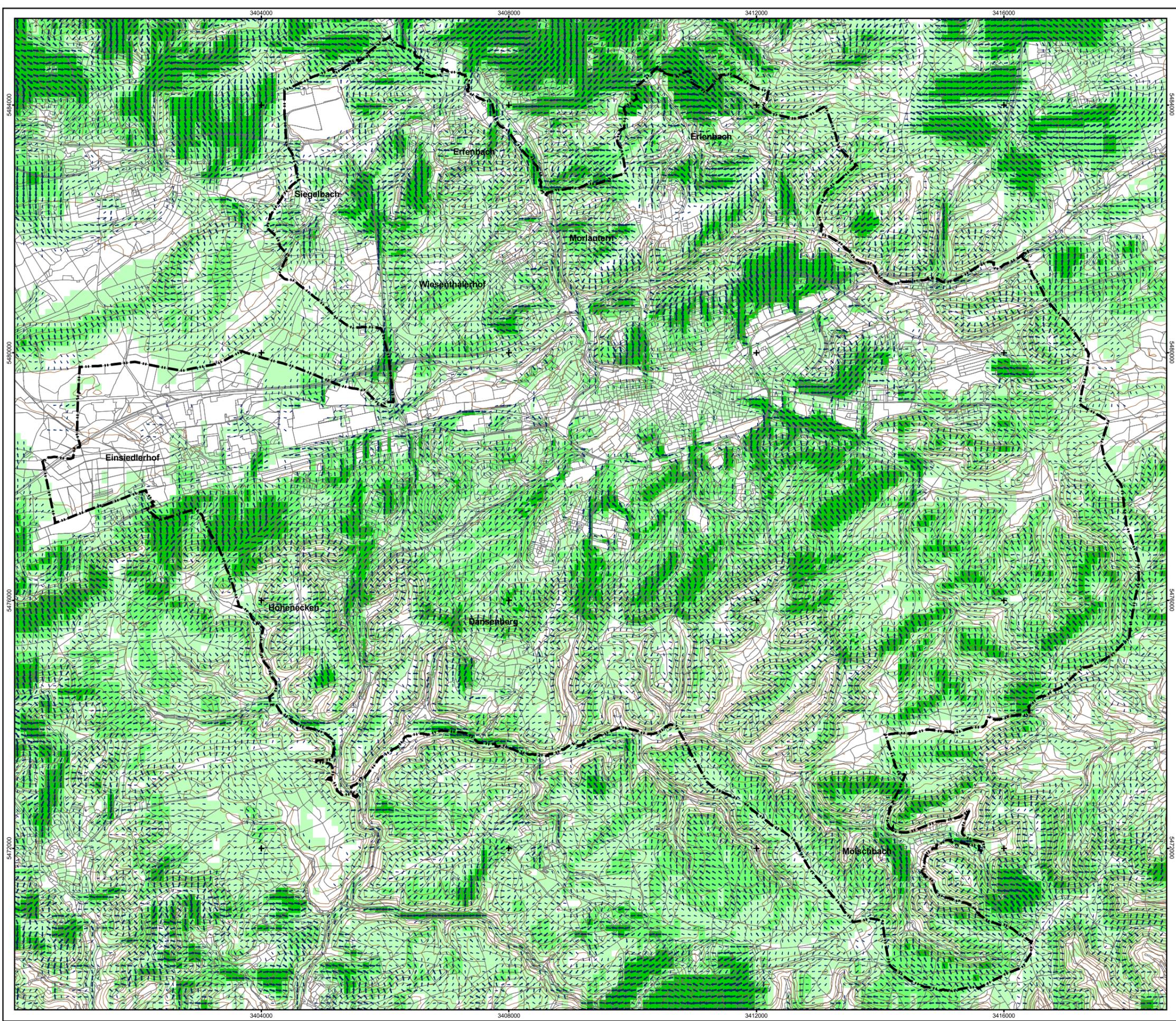
Auftragnehmer:



GEO-NET
 Umweltschulung GmbH
 Große Pflaßstraße 5 a
 30161 Hannover
 Tel. (0511) 388 72 00
 Fax (0511) 388 72 01
 www.geo-net.de



KOPLANA
 Seckenheimer Hauptstr. 98
 68239 Mannheim
 Tel. (0621) 474626
 Fax (0621) 475277
 www.oekoplana.de



Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

Kaltluftvolumenstrom und Windgeschwindigkeit während einer austauscharmen Strahlungswetternacht

Legende

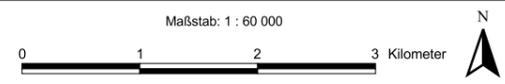
Windvektoren (Geschwindigkeit in m/s; aggregierte 100 m Auflösung)

- < 0.1
- 0.1 bis <= 0.2
- 0.2 bis <= 0.3
- 0.3 bis <= 0.5
- 0.5 bis <= 1.0
- > 1

Kaltluftvolumenstrom in m³/s (kombinierte 100 m und 50 m Auflösung)

- < 300 Sehr gering
- 300 bis <= 700 Gering
- 700 bis <= 1100 Mittel
- > 1100 Hoch

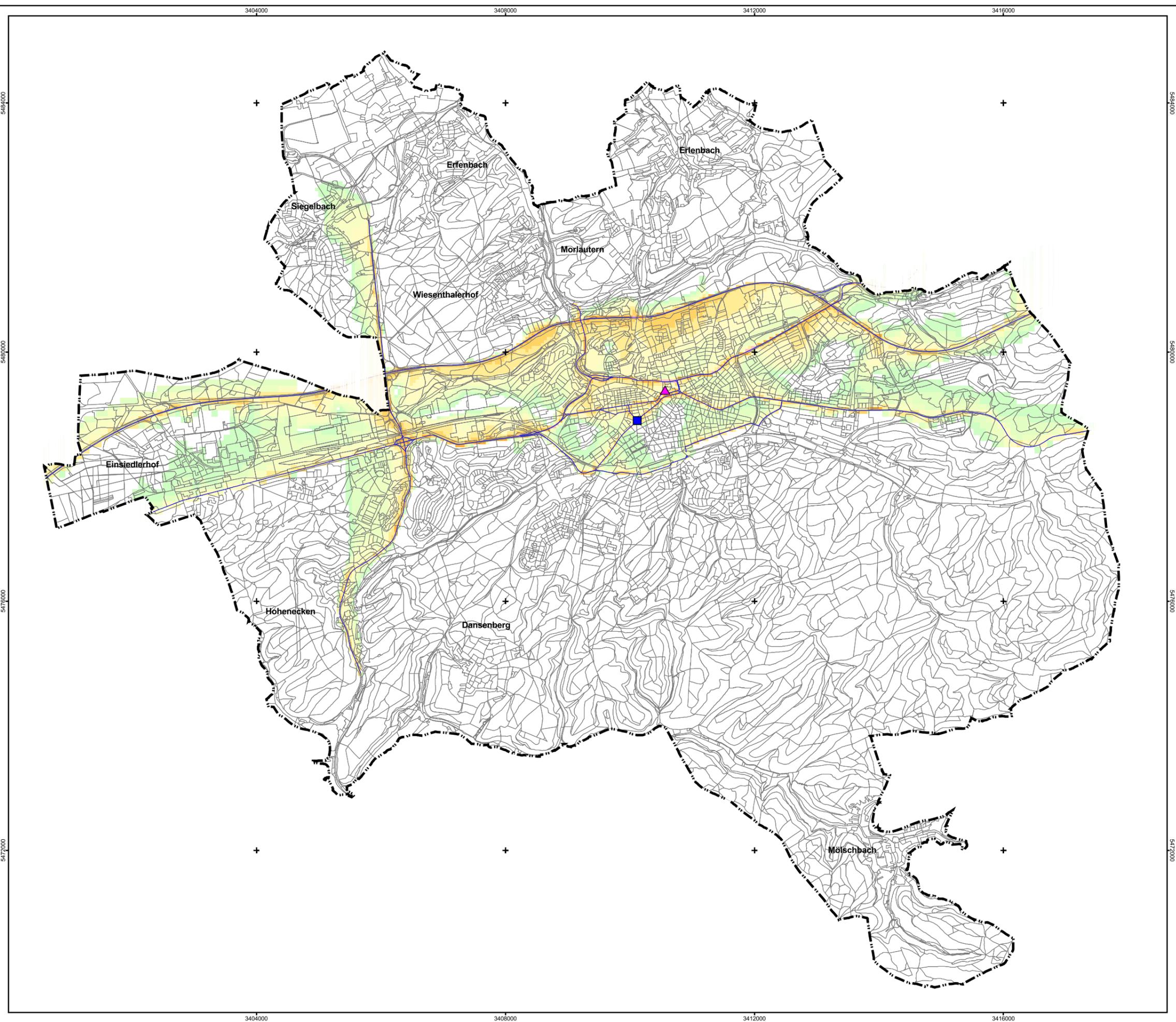
- Höhenlinie (15 m-Abstand)
- Stadtgrenze Kaiserslautern



Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
 Referat Umweltschutz
 67653 Kaiserslautern
 Tel. 06 31 - 365-0
 Fax 06 31 - 365-2553

Auftragnehmer:
 Große Pfahlstraße 5 a
 30161 Hannover
 Tel. (0511) 388 72 00
 Fax (0511) 388 72 01
 www.geo-net.de

Seckenheimer Hauptstr. 98
 68239 Mannheim
 Tel.: (0621) 474626
 Fax: (0621) 475277
 www.oekoplana.de



Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

NO₂ - Immission während einer austauscharmen Wetterlage

Legende

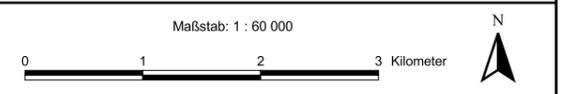
NO₂ - Immission in µg/m³

| | |
|--|--------------|
| | < 40 |
| | 40 bis =< 45 |
| | 45 bis =< 50 |
| | 50 bis =< 55 |
| | 55 bis =< 60 |
| | 60 bis =< 65 |
| | 65 bis =< 70 |
| | 70 bis =< 75 |
| | 75 bis =< 80 |
| | > 80 |

ZIMEN-Luftmessstation

- Rathausplatz
- Marienplatz

- Hauptstraßennetz
- Höhenlinie (15 m-Abstand)
- Stadtgrenze Kaiserslautern

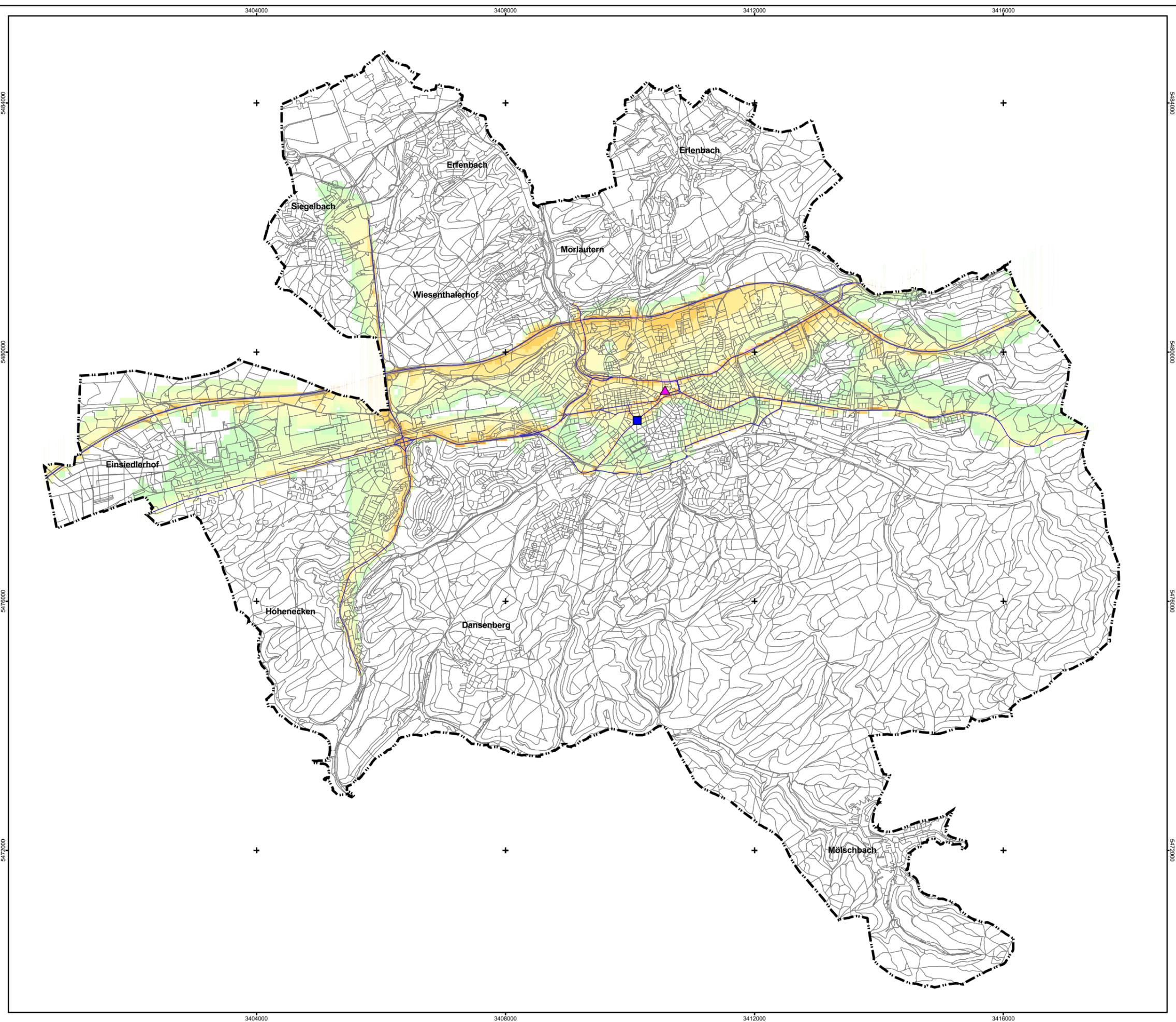


Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
 Referat Umweltschutz
 67653 Kaiserslautern
 Tel. 06 31 - 365-0
 Fax 06 31 - 365-2553

Auftragnehmer:
 Umweltconsulting GmbH
 Große Pfahlstraße 5 a
 30161 Hannover
 Tel.: (0511) 388 72 00
 Fax (0511) 388 72 01
 www.geo-net.de

ÖKOPLANA
 Seckenheimer Hauptstr. 98
 68239 Mannheim
 Tel.: (0621) 474626
 Fax: (0621) 475277
 www.oekoplana.de

Hannover, Mai 2009



Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Kaiserslautern

NO₂ - Immission während einer austauscharmen Wetterlage

Legende

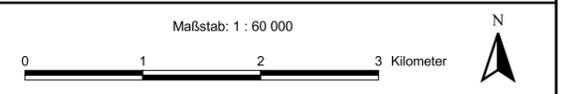
NO₂ - Immission in µg/m³

| | |
|--|--------------|
| | < 40 |
| | 40 bis <= 45 |
| | 45 bis <= 50 |
| | 50 bis <= 55 |
| | 55 bis <= 60 |
| | 60 bis <= 65 |
| | 65 bis <= 70 |
| | 70 bis <= 75 |
| | 75 bis <= 80 |
| | > 80 |

ZIMEN-Luftmessstation

- Rathausplatz
- Marienplatz

- Hauptstraßennetz
- Höhenlinie (15 m-Abstand)
- Stadtgrenze Kaiserslautern



Auftraggeber: Stadtverwaltung Kaiserslautern
 Referat Umweltschutz
 67653 Kaiserslautern
 Tel. 06 31 - 365-0
 Fax 06 31 - 365-2553

Auftragnehmer:
 Umweltconsulting GmbH
 Große Pfahlstraße 5 a
 30161 Hannover
 Tel.: (0511) 388 72 00
 Fax (0511) 388 72 01
 www.geo-net.de

ÖKOPLANA
 Seckenheimer Hauptstr. 98
 68239 Mannheim
 Tel.: (0621) 474626
 Fax: (0621) 475277
 www.oekoplana.de

Windstatistik - Station Lauterstraße

Datenkollektiv: Alle Tage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 100% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.5 | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.4 |
| 3 | 3.1 | 0.4 | 4.2 | 0.4 | 3.6 | 0.4 | 2.1 | 0.5 | 2.5 | 0.5 |
| 6 | 9.1 | 0.6 | 14.5 | 0.5 | 8.6 | 0.5 | 5.1 | 0.7 | 9.0 | 0.8 |
| 9 Ost | 10.8 | 1.1 | 11.0 | 0.7 | 10.5 | 0.8 | 10.2 | 1.4 | 11.5 | 1.3 |
| 12 | 4.5 | 1.0 | 3.1 | 0.6 | 3.4 | 0.6 | 5.8 | 1.2 | 5.6 | 1.3 |
| 15 | 1.3 | 0.9 | 1.1 | 0.7 | 1.1 | 0.8 | 1.7 | 1.1 | 1.4 | 1.0 |
| 18 Süd | 0.3 | 0.9 | 0.2 | 1.2 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.8 | 0.4 | 1.1 |
| 21 | 3.4 | 1.1 | 2.7 | 0.8 | 3.0 | 0.8 | 4.0 | 1.3 | 4.0 | 1.4 |
| 24 | 18.2 | 1.3 | 13.9 | 0.9 | 16.4 | 0.8 | 21.0 | 1.6 | 21.2 | 1.6 |
| 27 West | 32.7 | 1.4 | 30.7 | 1.1 | 28.5 | 0.9 | 34.8 | 1.5 | 37.1 | 1.8 |
| 30 | 9.8 | 0.7 | 10.4 | 0.7 | 12.3 | 0.6 | 10.3 | 0.8 | 5.7 | 1.1 |
| 33 | 3.7 | 0.5 | 5.1 | 0.5 | 4.8 | 0.4 | 3.6 | 0.4 | 1.5 | 0.6 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 2.7 | 0.0 | 2.5 | 0.0 | 6.9 | 0.0 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.1 | | 0.8 | | 0.7 | | 1.3 | | 1.5 | |

Datenkollektiv: Strahlungstage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 16% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.3 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 0.4 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 2.6 | 0.4 | 3.0 | 0.4 | 3.3 | 0.3 | 1.4 | 0.5 | 2.5 | 0.5 |
| 6 | 9.1 | 0.6 | 16.0 | 0.4 | 6.7 | 0.4 | 4.2 | 0.8 | 11.1 | 0.9 |
| 9 Ost | 12.9 | 1.1 | 13.0 | 0.4 | 8.1 | 0.4 | 12.6 | 1.7 | 18.6 | 1.4 |
| 12 | 6.0 | 1.0 | 3.0 | 0.3 | 4.8 | 0.3 | 5.9 | 1.4 | 10.0 | 1.4 |
| 15 | 1.0 | 0.8 | 0.3 | 0.3 | 1.0 | 0.3 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.0 |
| 18 Süd | 0.1 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | 3.0 | 0.9 | 3.3 | 0.3 | 2.4 | 0.4 | 3.6 | 1.5 | 2.8 | 1.1 |
| 24 | 22.0 | 0.9 | 19.7 | 0.4 | 26.4 | 0.3 | 19.6 | 1.7 | 21.1 | 1.6 |
| 27 West | 27.5 | 1.1 | 27.0 | 0.6 | 23.8 | 0.3 | 31.8 | 1.3 | 28.1 | 1.8 |
| 30 | 7.2 | 0.6 | 6.0 | 0.6 | 5.7 | 0.3 | 13.1 | 0.6 | 3.9 | 1.3 |
| 33 | 3.0 | 0.4 | 2.3 | 0.3 | 3.8 | 0.3 | 4.7 | 0.5 | 0.8 | 0.8 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 5.5 | 0.0 | 6.3 | 0.0 | 13.6 | 0.0 | 0.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 0.9 | | 0.4 | | 0.3 | | 1.3 | | 1.5 | |

Datenkollektiv: Sommertage ($T_{max} \geq 25^{\circ}C$) 18.06.2008 – 06.01.2009 / 14% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.5 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.5 | 1.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 2.9 | 0.5 | 5.6 | 0.5 | 3.6 | 0.6 | 1.6 | 0.7 | 1.0 | 0.7 |
| 6 | 9.4 | 0.8 | 16.2 | 0.6 | 8.5 | 0.6 | 4.7 | 0.9 | 9.4 | 1.3 |
| 9 Ost | 8.3 | 1.2 | 9.4 | 0.5 | 4.0 | 0.3 | 8.3 | 1.6 | 12.5 | 1.6 |
| 12 | 3.5 | 0.9 | 1.2 | 0.4 | 3.6 | 0.3 | 3.6 | 1.2 | 5.2 | 1.3 |
| 15 | 0.8 | 0.9 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.5 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |
| 18 Süd | 0.1 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | 3.5 | 1.0 | 3.7 | 0.4 | 2.7 | 0.3 | 3.1 | 1.3 | 4.7 | 1.6 |
| 24 | 22.5 | 1.2 | 19.4 | 0.5 | 21.9 | 0.4 | 25.0 | 1.6 | 23.4 | 2.0 |
| 27 West | 33.9 | 1.3 | 30.6 | 0.8 | 34.4 | 0.7 | 33.3 | 1.6 | 36.5 | 2.0 |
| 30 | 9.8 | 0.9 | 8.7 | 0.8 | 10.3 | 0.6 | 15.1 | 0.9 | 4.7 | 1.5 |
| 33 | 3.5 | 0.5 | 3.7 | 0.5 | 5.4 | 0.4 | 3.1 | 0.5 | 1.6 | 0.9 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 1.3 | 0.0 | 1.2 | 0.0 | 3.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.1 | | 0.6 | | 0.5 | | 1.4 | | 1.8 | |

Datenerfassung: ÖKOPLANA



ÖKOPLANA



Umweltconsulting GmbH

Windstatistik - Station SRS

Datenkollektiv: Alle Tage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 100% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.5 | 1.2 | 0.7 | 1.1 | 0.4 | 0.8 | 0.6 | 1.2 | 0.5 | 1.5 |
| 3 | 1.9 | 1.0 | 1.5 | 0.9 | 1.5 | 0.6 | 2.5 | 1.0 | 2.2 | 1.4 |
| 6 | 11.4 | 1.7 | 8.2 | 1.4 | 8.5 | 1.1 | 14.6 | 1.6 | 14.1 | 2.3 |
| 9 Ost | 9.3 | 1.2 | 10.1 | 1.0 | 11.2 | 0.8 | 8.3 | 1.5 | 7.4 | 1.7 |
| 12 | 3.8 | 0.6 | 5.4 | 0.4 | 4.4 | 0.4 | 2.2 | 0.8 | 3.3 | 1.0 |
| 15 | 2.9 | 0.7 | 4.9 | 0.5 | 2.3 | 0.5 | 1.7 | 0.8 | 3.2 | 1.0 |
| 18 Süd | 1.8 | 0.9 | 2.6 | 0.7 | 1.7 | 0.6 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.3 |
| 21 | 6.6 | 1.7 | 7.5 | 1.4 | 6.6 | 1.7 | 5.9 | 1.9 | 6.4 | 1.9 |
| 24 | 24.1 | 2.2 | 23.6 | 1.8 | 21.7 | 1.9 | 25.3 | 2.5 | 26.3 | 2.5 |
| 27 West | 22.2 | 2.2 | 17.6 | 1.9 | 18.2 | 1.5 | 25.9 | 2.3 | 26.9 | 2.7 |
| 30 | 4.4 | 1.4 | 2.6 | 1.4 | 4.3 | 0.9 | 6.2 | 1.3 | 4.2 | 2.1 |
| 33 | 2.1 | 1.0 | 1.5 | 1.0 | 2.2 | 0.7 | 2.4 | 0.9 | 2.0 | 1.6 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 9.1 | 0.0 | 13.7 | 0.0 | 17.1 | 0.0 | 3.4 | 0.0 | 1.6 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.6 | | 1.2 | | 1.1 | | 1.9 | | 2.2 | |

Datenkollektiv: Strahlungstage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 16% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.4 | 1.5 | 0.3 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 0.6 | 1.7 | 0.8 | 1.6 |
| 3 | 2.1 | 1.1 | 1.7 | 0.9 | 1.0 | 0.4 | 2.2 | 0.8 | 3.6 | 1.7 |
| 6 | 11.4 | 1.4 | 4.0 | 0.5 | 8.1 | 0.4 | 18.1 | 1.4 | 14.8 | 2.3 |
| 9 Ost | 11.5 | 1.0 | 8.7 | 0.5 | 14.0 | 0.4 | 10.9 | 1.5 | 11.7 | 1.8 |
| 12 | 7.1 | 0.7 | 11.3 | 0.4 | 7.6 | 0.4 | 3.1 | 1.3 | 7.0 | 1.4 |
| 15 | 3.4 | 0.7 | 7.7 | 0.4 | 2.1 | 0.3 | 0.6 | 1.4 | 4.2 | 1.1 |
| 18 Süd | 2.2 | 0.8 | 4.7 | 0.4 | 1.7 | 0.7 | 0.6 | 1.5 | 2.2 | 1.3 |
| 21 | 5.3 | 1.2 | 7.0 | 0.4 | 6.0 | 0.9 | 4.7 | 2.3 | 3.6 | 1.4 |
| 24 | 11.6 | 1.6 | 15.0 | 0.7 | 6.7 | 0.5 | 12.0 | 2.6 | 14.2 | 2.1 |
| 27 West | 19.1 | 2.0 | 11.0 | 1.4 | 9.0 | 0.5 | 29.2 | 2.2 | 27.3 | 2.6 |
| 30 | 5.3 | 1.3 | 1.7 | 0.8 | 4.3 | 0.6 | 9.7 | 1.2 | 5.0 | 2.2 |
| 33 | 2.4 | 1.2 | 1.0 | 0.7 | 1.9 | 0.3 | 4.2 | 1.1 | 2.2 | 2.2 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 18.3 | 0.0 | 26.0 | 0.0 | 37.6 | 0.0 | 4.2 | 0.0 | 3.3 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.1 | | 0.5 | | 0.3 | | 1.7 | | 2.0 | |

Datenkollektiv: Sommertage ($T_{max} \geq 25^{\circ}C$) 18.06.2008 – 06.01.2009 / 14% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.1 | 1.5 | 0.6 | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.5 | 1.4 | 0.6 | 1.1 | 0.4 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 2.0 |
| 6 | 6.9 | 1.0 | 1.9 | 0.8 | 8.9 | 0.6 | 13.0 | 1.3 | 2.6 | 1.4 |
| 9 Ost | 8.6 | 1.0 | 5.0 | 0.7 | 13.4 | 0.4 | 7.8 | 1.5 | 6.8 | 2.0 |
| 12 | 6.6 | 0.7 | 10.0 | 0.4 | 9.4 | 0.4 | 3.1 | 1.2 | 4.2 | 2.0 |
| 15 | 5.3 | 0.9 | 11.2 | 0.6 | 3.6 | 0.4 | 0.5 | 1.4 | 7.3 | 1.5 |
| 18 Süd | 4.4 | 0.9 | 8.7 | 0.6 | 3.1 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 6.3 | 1.5 |
| 21 | 8.9 | 1.4 | 11.2 | 0.8 | 7.6 | 0.9 | 6.3 | 2.1 | 11.0 | 1.9 |
| 24 | 27.4 | 2.0 | 26.9 | 1.3 | 24.6 | 1.4 | 30.2 | 2.2 | 28.3 | 2.9 |
| 27 West | 22.3 | 2.3 | 15.0 | 1.7 | 15.6 | 1.4 | 31.8 | 2.5 | 26.7 | 3.0 |
| 30 | 4.3 | 2.1 | 3.1 | 1.6 | 4.0 | 1.6 | 5.7 | 2.1 | 4.2 | 3.1 |
| 33 | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 1.9 | 1.3 | 0.4 | 0.5 | 1.7 | 1.6 | 2.2 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 3.4 | 0.0 | 4.4 | 0.0 | 8.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.6 | | 1.0 | | 0.9 | | 2.1 | | 2.5 | |

Datenerfassung: ÖKOPLANA



ÖKOPLANA



Umweltconsulting GmbH

Windstatistik - Station Brandenburger Straße

Datenkollektiv: Alle Tage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 100% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 |
| 3 | 2.7 | 1.4 | 1.9 | 1.4 | 2.6 | 1.0 | 3.1 | 1.3 | 3.2 | 1.8 |
| 6 | 9.7 | 2.2 | 7.9 | 1.9 | 7.4 | 1.6 | 11.7 | 2.3 | 12.1 | 2.8 |
| 9 Ost | 7.1 | 1.8 | 6.5 | 1.5 | 6.4 | 1.5 | 7.8 | 1.7 | 7.7 | 2.3 |
| 12 | 2.1 | 1.0 | 2.5 | 0.8 | 1.7 | 0.5 | 2.0 | 1.0 | 2.4 | 1.5 |
| 15 | 2.6 | 0.9 | 3.7 | 0.8 | 2.1 | 0.6 | 2.0 | 0.9 | 2.7 | 1.3 |
| 18 Süd | 2.9 | 1.1 | 5.1 | 0.8 | 2.5 | 0.9 | 1.8 | 1.4 | 2.6 | 1.4 |
| 21 | 11.9 | 2.0 | 13.6 | 1.7 | 11.9 | 1.7 | 10.0 | 2.3 | 12.2 | 2.2 |
| 24 | 38.0 | 2.5 | 38.0 | 2.0 | 35.2 | 2.0 | 39.5 | 2.9 | 39.6 | 3.1 |
| 27 West | 15.6 | 1.4 | 13.8 | 1.0 | 20.3 | 0.8 | 15.2 | 1.6 | 12.1 | 2.4 |
| 30 | 4.6 | 1.0 | 4.3 | 0.8 | 5.7 | 0.7 | 4.5 | 1.1 | 3.9 | 1.4 |
| 33 | 1.8 | 0.7 | 1.8 | 0.7 | 2.4 | 0.4 | 1.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 0.4 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.9 | | 1.5 | | 1.4 | | 2.2 | | 2.5 | |

Datenkollektiv: Strahlungstage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 16% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 0.6 | 1.2 | 0.4 | 0.6 | 1.4 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 3.0 | 1.2 | 1.3 | 1.0 | 2.6 | 0.6 | 4.4 | 1.4 | 3.3 | 1.5 |
| 6 | 7.5 | 2.1 | 2.3 | 1.1 | 3.3 | 0.7 | 10.8 | 1.7 | 13.3 | 2.9 |
| 9 Ost | 8.9 | 2.0 | 2.7 | 1.4 | 3.6 | 0.5 | 13.9 | 2.1 | 15.3 | 2.4 |
| 12 | 2.4 | 1.5 | 2.0 | 1.1 | 1.2 | 0.5 | 2.5 | 1.7 | 4.2 | 1.9 |
| 15 | 3.7 | 0.9 | 6.3 | 0.8 | 3.1 | 0.6 | 2.8 | 1.0 | 3.1 | 1.5 |
| 18 Süd | 4.2 | 0.7 | 10.3 | 0.7 | 3.3 | 0.6 | 1.1 | 0.9 | 3.1 | 0.8 |
| 21 | 8.9 | 1.2 | 12.3 | 0.6 | 7.9 | 0.6 | 8.1 | 2.2 | 8.1 | 1.6 |
| 24 | 26.2 | 1.8 | 33.0 | 1.0 | 19.3 | 0.6 | 26.4 | 2.7 | 28.3 | 2.7 |
| 27 West | 27.2 | 1.1 | 22.0 | 0.7 | 45.7 | 0.5 | 21.4 | 1.6 | 15.8 | 2.7 |
| 30 | 5.1 | 1.0 | 5.0 | 0.6 | 6.2 | 0.5 | 5.0 | 1.3 | 4.2 | 1.9 |
| 33 | 2.2 | 0.8 | 1.7 | 0.5 | 2.4 | 0.4 | 3.1 | 1.0 | 1.4 | 1.4 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 0.2 | 0.0 | 0.7 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.4 | | 0.8 | | 0.6 | | 2.0 | | 2.4 | |

Datenkollektiv: Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) 18.06.2008 – 06.01.2009 / 14% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.4 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 1.8 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 3.1 | 0.7 | 2.1 | 0.9 | 1.6 | 1.8 |
| 6 | 3.9 | 1.6 | 3.7 | 1.2 | 2.7 | 0.9 | 8.3 | 1.9 | 1.0 | 1.9 |
| 9 Ost | 6.0 | 1.9 | 1.9 | 1.7 | 4.9 | 0.7 | 6.3 | 2.0 | 10.4 | 2.6 |
| 12 | 2.5 | 1.7 | 2.5 | 1.1 | 0.9 | 0.6 | 2.6 | 1.6 | 4.2 | 2.4 |
| 15 | 5.7 | 1.1 | 8.1 | 0.9 | 8.0 | 0.7 | 2.1 | 1.6 | 4.7 | 1.9 |
| 18 Süd | 4.3 | 1.1 | 10.6 | 1.2 | 4.5 | 0.6 | 0.5 | 1.6 | 2.6 | 1.6 |
| 21 | 13.3 | 1.8 | 15.0 | 1.3 | 11.2 | 1.1 | 8.3 | 2.3 | 19.3 | 2.3 |
| 24 | 37.0 | 2.5 | 31.9 | 1.5 | 31.7 | 1.8 | 46.4 | 2.9 | 38.0 | 3.5 |
| 27 West | 19.1 | 1.8 | 19.4 | 1.4 | 24.1 | 1.0 | 16.7 | 2.4 | 15.6 | 3.3 |
| 30 | 4.2 | 1.2 | 5.0 | 0.7 | 5.8 | 0.9 | 3.6 | 2.0 | 2.1 | 1.8 |
| 33 | 1.8 | 0.8 | 1.9 | 0.8 | 2.2 | 0.4 | 2.6 | 1.0 | 0.5 | 1.5 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.9 | | 1.3 | | 1.2 | | 2.4 | | 2.9 | |

Datenerfassung: ÖKOPLANA



ÖKOPLANA



Umweltconsulting GmbH

Windstatistik - Station Technische Werke

Datenkollektiv: Alle Tage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 100% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.3 | 0.9 | 0.2 | 1.0 | 0.1 | 0.5 | 0.2 | 1.1 | 0.6 | 0.9 |
| 3 | 2.4 | 1.4 | 2.0 | 1.3 | 1.9 | 0.8 | 2.3 | 1.5 | 3.5 | 1.6 |
| 6 | 13.6 | 1.6 | 11.4 | 1.4 | 12.4 | 1.3 | 15.3 | 1.8 | 15.3 | 2.0 |
| 9 Ost | 23.3 | 0.8 | 36.5 | 0.8 | 35.9 | 0.7 | 11.9 | 0.8 | 9.2 | 1.1 |
| 12 | 7.3 | 0.6 | 8.3 | 0.6 | 9.4 | 0.5 | 6.9 | 0.6 | 4.5 | 1.0 |
| 15 | 3.6 | 1.0 | 4.0 | 1.0 | 3.1 | 1.0 | 3.7 | 1.0 | 3.8 | 1.2 |
| 18 Süd | 3.4 | 1.9 | 3.4 | 1.5 | 2.5 | 1.9 | 2.7 | 1.8 | 5.0 | 2.1 |
| 21 | 12.2 | 2.4 | 8.6 | 2.3 | 9.9 | 2.1 | 15.0 | 2.5 | 15.0 | 2.4 |
| 24 | 21.9 | 2.4 | 16.4 | 2.1 | 15.6 | 2.0 | 27.5 | 2.4 | 28.3 | 2.7 |
| 27 West | 8.6 | 2.2 | 6.6 | 2.0 | 5.4 | 1.8 | 10.6 | 2.1 | 12.1 | 2.5 |
| 30 | 1.1 | 1.2 | 0.7 | 1.2 | 0.6 | 0.8 | 1.6 | 1.1 | 1.6 | 1.5 |
| 33 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 0.9 | 0.7 | 0.9 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 1.5 | 0.0 | 1.2 | 0.0 | 2.8 | 0.0 | 1.4 | 0.0 | 0.4 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.6 | | 1.3 | | 1.2 | | 1.8 | | 2.1 | |

Datenkollektiv: Strahlungstage 18.06.2008 – 06.01.2009 / 16% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.1 | 0.8 | 0.3 | 0.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 1.9 | 1.8 | 0.7 | 0.6 | 0.2 | 0.9 | 1.1 | 1.8 | 5.6 | 2.0 |
| 6 | 11.9 | 1.6 | 7.7 | 0.9 | 6.0 | 0.7 | 15.6 | 1.9 | 18.7 | 2.0 |
| 9 Ost | 42.6 | 0.9 | 67.0 | 1.0 | 73.3 | 0.8 | 16.9 | 0.8 | 12.0 | 1.1 |
| 12 | 11.3 | 0.7 | 10.7 | 0.6 | 16.2 | 0.5 | 8.9 | 0.7 | 8.4 | 1.3 |
| 15 | 2.4 | 0.8 | 1.3 | 0.6 | 1.4 | 0.5 | 3.9 | 0.7 | 2.8 | 1.1 |
| 18 Süd | 2.6 | 1.5 | 3.0 | 0.9 | 1.0 | 2.1 | 4.2 | 1.6 | 2.8 | 1.5 |
| 21 | 4.8 | 1.9 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 9.2 | 1.9 | 8.4 | 1.9 |
| 24 | 12.2 | 2.4 | 4.7 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 20.3 | 2.4 | 24.5 | 2.5 |
| 27 West | 8.5 | 2.2 | 3.7 | 2.3 | 0.0 | 0.0 | 16.1 | 2.0 | 14.8 | 2.4 |
| 30 | 1.1 | 1.5 | 0.3 | 1.6 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 1.3 | 1.7 | 1.7 |
| 33 | 0.3 | 1.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.8 | 1.5 | 0.6 | 1.7 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.0 | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.3 | | 1.0 | | 0.7 | | 1.7 | | 2.0 | |

Datenkollektiv: Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) 18.06.2008 – 06.01.2009 / 14% der Tage

| Zeit Richtung | 0-23 | | 19-23 | | 0- 6 | | 7-12 | | 13-18 | |
|----------------------------------|------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|-------|-----|
| | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s | % | m/s |
| 36 Nord | 0.1 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.4 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 1.0 |
| 6 | 5.1 | 1.4 | 2.5 | 0.7 | 2.7 | 0.7 | 9.4 | 1.5 | 5.8 | 2.1 |
| 9 Ost | 27.1 | 1.1 | 46.2 | 1.1 | 48.7 | 0.9 | 7.3 | 1.1 | 5.8 | 1.8 |
| 12 | 10.7 | 0.9 | 15.0 | 0.9 | 12.9 | 0.5 | 6.3 | 1.0 | 8.9 | 1.5 |
| 15 | 4.2 | 1.3 | 5.6 | 1.2 | 3.6 | 0.9 | 2.1 | 1.1 | 5.8 | 1.6 |
| 18 Süd | 5.9 | 1.5 | 8.1 | 1.1 | 3.1 | 1.2 | 4.2 | 1.6 | 8.9 | 1.9 |
| 21 | 14.3 | 2.1 | 5.0 | 1.5 | 10.7 | 1.6 | 21.4 | 2.2 | 19.4 | 2.4 |
| 24 | 21.1 | 2.5 | 10.6 | 1.8 | 11.6 | 1.8 | 32.8 | 2.5 | 29.3 | 3.1 |
| 27 West | 10.3 | 2.5 | 6.9 | 2.4 | 4.9 | 1.9 | 15.6 | 2.4 | 14.1 | 2.8 |
| 30 | 0.7 | 1.7 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 2.2 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.6 |
| 33 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 99 Umlaufend | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 00 Windstille | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mittlere Geschwindigkeit (m/sec) | 1.7 | | 1.3 | | 1.1 | | 2.0 | | 2.4 | |

Datenerfassung: ÖKOPLANA



ÖKOPLANA



Umweltconsulting GmbH