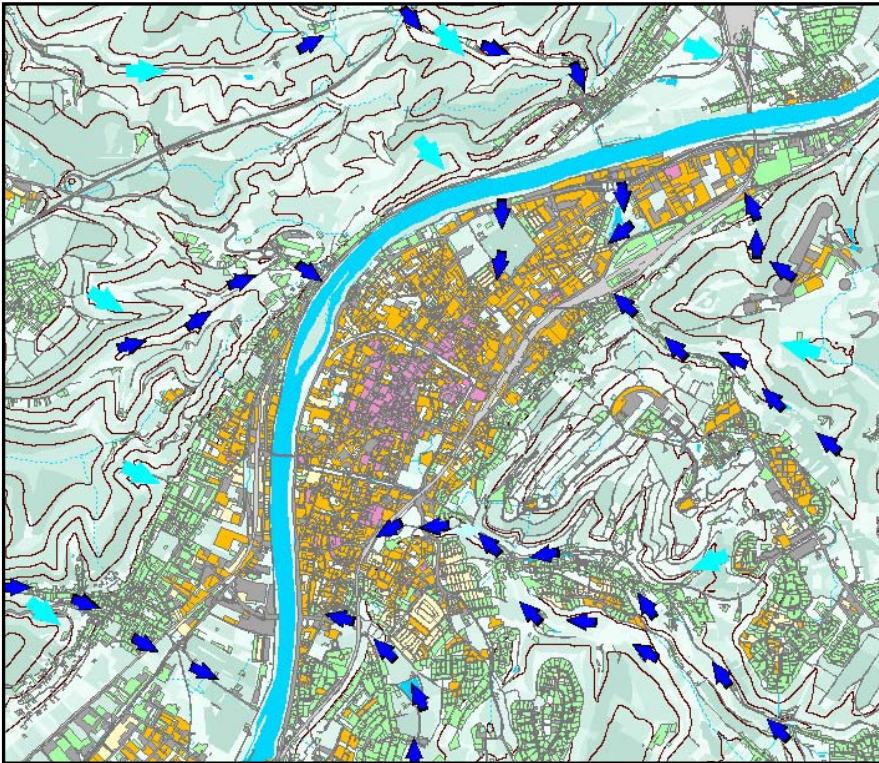


# Klima- und immissionsökologische Funktionen in der Stadt Trier

## -Entwurf Abschlussbericht-



Auftraggeber:



**Stadt Trier**  
Stadtplanungsamt  
Am Augustinerhof,  
Verwaltungsgebäude I  
54290 Trier



**GEO-NET Umweltconsulting GmbH**

Große Pfahlstraße 5a

3 0 1 6 1 Hannover

Tel. (0511) 3887200

FAX (0511) 3887201

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

Projektleiter: Peter Trute

email: [trute@geo-net.de](mailto:trute@geo-net.de)

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

Hannover, September 2009

## Inhaltsverzeichnis

Seite:

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Klimatische Situation im Raum Trier</b> .....	<b>2</b>
2.1 Allgemeine klimatische Einordnung des Untersuchungsraums .....	3
2.2 Meteorologische Situation in Trier .....	4
2.2.1 Thermische Verhältnisse.....	4
2.2.2 Langjährige Mittelwerte und Ereignistage.....	4
2.2.3 Veränderung der Vegetationsperiode .....	6
2.2.4 Inversionshäufigkeit im Untersuchungsraum.....	8
2.2.5 Windverhältnisse.....	13
2.2.6 Niederschlag .....	16
<b>3 Lufthygienische Situation - Auswertung der Datenreihen des Zentralen Immissionsmessnetzes von Rheinland-Pfalz (ZIMEN)</b> .....	<b>17</b>
3.1 Messnetz und Datenerfassung .....	17
3.2 Auswertung der Schadstoffmessreihen .....	19
3.2.1 Stickstoffoxide .....	19
3.2.1.1 Stoffeigenschaften.....	19
3.2.1.2 Emittenten .....	19
3.2.1.3 Grenzwerte.....	20
3.2.1.4 NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen.....	21
3.2.2 Feinstaub (PM 10).....	25
3.2.2.1 Stoffeigenschaften.....	25
3.2.2.2 Emittenten .....	26
3.2.2.3 Grenzwerte .....	27
3.2.2.4 PM 10-Immissionskonzentrationen.....	28
3.2.2.5 Bemerkungen zur Staubfraktion PM 2.5 .....	32

3.2.3	Ozon (O <sub>3</sub> ) .....	32
3.2.3.1	Stoffeigenschaften .....	32
3.2.3.2	Emittenten .....	33
3.2.3.3	Grenzwerte .....	33
3.2.3.4	Datenauswertung der ZIMEN-Station Trier-Universität .....	33
<b>4</b>	<b>Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis .....</b>	<b>35</b>
4.1	Geländehöhe .....	35
4.2	Nutzungsstruktur .....	35
<b>5</b>	<b>Methodik der Modellrechnungen .....</b>	<b>38</b>
5.1	Beschreibung des verwendeten Klima- u. Strömungsmodells FITNAH .....	38
5.2	Synoptische Rahmenbedingungen für die Modellrechnungen .....	40
5.3	Modellierung der verkehrsbedingten Luftschadstoffausbreitung .....	40
5.4	Abgrenzung der klimaökologischen Struktureinheiten .....	42
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Klimamodellierung .....</b>	<b>46</b>
6.1	Kaltfluthaushalt Ist-Zustand 2005 .....	46
6.1.1	Temperaturmessfahrt und bodennahes Lufttemperaturfeld .....	46
6.1.2	Autochthones Windfeld .....	50
6.1.3	Kaltluftvolumenstrom .....	52
6.2	Kaltfluthaushalt Prognose-0-Fall 2020, Prognose-Plan-Fall 2020 und Abweichung der Klimaparameter zum Ist-Zustand 2005 .....	54
6.2.1	Prognose-0-Fall 2020 .....	54
6.2.1.1	Bodennahes Lufttemperaturfeld .....	54
6.2.1.2	Autochthones Windfeld .....	56
6.2.1.3	Kaltluftvolumenstrom .....	57
6.2.2	Prognose-Plan-Fall 2020 .....	58
6.2.2.1	Bodennahes Lufttemperaturfeld .....	58
6.2.2.2	Autochthones Windfeld .....	59
6.2.2.3	Kaltluftvolumenstrom .....	60
6.3	Fazit Kaltfluthaushalt .....	61
6.4	Lufthygienische Belastung am Beispiel Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> ) .....	62
6.4.1	Stickstoffdioxid-Immission im Ist-Zustand 2005 .....	62
6.4.1.1	Jahresmittelwert .....	62
6.4.1.2	Austauscharme Wetterlage .....	64

6.4.2	Stickstoffdioxid-Immission im Prognose-0-Szenario 2020.....	65
6.4.2.1	Jahresmittelwert .....	66
6.4.2.2	Austauscharme Wetterlage .....	66
6.5	Fazit Lufthygiene.....	67
<b>7</b>	<b>Klimaökologische Funktionen.....</b>	<b>69</b>
7.1	Grün- und Freiflächen .....	69
7.2	Siedlungsräume .....	71
7.3	Luftaustausch.....	73
<b>8</b>	<b>Planungskarte Stadtklima.....</b>	<b>75</b>
8.1	Grün- und Freiflächen .....	75
8.2	Siedlungsräume .....	77
8.3	Luftaustausch.....	77
8.4	Lokalklimatische Bedeutung der Planungen bis zum Jahr 2020 .....	79
<b>9</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>80</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>82</b>

## Anhang

### Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Langjährig gemittelter Jahrgang der Lufttemperatur und der Niederschlagssummen .....	3
Abb. 2	Jahresmittel der Lufttemperatur und die Differenz.....	4
Abb. 3	Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode Petrisberg.....	7
Abb. 4	Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode Stadt.....	7
Abb. 5	Langjährig gemittelter Jahrgang der Häufigkeit von Inversionshäufigkeiten .....	8
Abb. 6	Absolute Monatssummen der Inversionsereignisse 1948 bis 1998 .....	10
Abb. 7	Absolute Monatssummen der Inversionsereignisse 1996 bis 2005 .....	12
Abb. 8	Windrichtungs- und Windstärkeverteilung .....	13
Abb. 9	Jahressummen des Niederschlags.....	15
Abb. 10	Abweichungen vom jeweiligen langjährigen Jahresmittel des Niederschlags in Prozent .....	15
Abb. 11	Jahrgang der langjährig gemittelten monatlichen Niederschlagssummen .....	16
Abb. 12	Lage der ZIMEN Stationen und DWD Stationen .....	17
Abb. 13	Monatsmittel der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen.....	22

Abb. 14	Langjährig gemittelter Jahresgang der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen aus Tagesmittelwerten.....	22
Abb. 15	Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen für das gesamte Jahr .....	23
Abb. 16	Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen für Werktage/Samstage/Sonntage.....	23
Abb. 17	Differenz der Monatsmittel der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen.....	24
Abb. 18	Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen (Kaiserstraße) .....	25
Abb. 19	Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO <sub>2</sub> -Immissionskonzentrationen für Werktage/Samstage/Sonntage.....	25
Abb. 20	Monatsmittel der PM 10-Immissionskonzentrationen (Ostallee) .....	28
Abb. 21	Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM 10-Immissionskonzentrationen für das gesamte Jahr (Ostallee).....	29
Abb. 22	Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM 10-Immissionskonzentrationen für Werktage/Samstage/Sonntage (Ostallee) .....	29
Abb. 23	Mittlere relative Anzahl der Überschreitungen des 24h-Grenzwertes pro Monat und relative Summenhäufigkeit (Ostallee).....	29
Abb. 24	Mittlere relative Anzahl der Überschreitungen des 24h-Grenzwertes je Wochentag.....	29
Abb. 25	Monatsmittel der PM 10-Immissionskonzentrationen (Kaiserstraße).....	30
Abb. 26	Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM 10-Immissionskonzentrationen für das gesamte Jahr (Kaiserstraße) .....	31
Abb. 27	Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM 10-Immissionskonzentrationen für Werktage/Samstage/Sonntage (Kaiserstraße).....	31
Abb. 28	Mittlere relative Anzahl der Überschreitungen des 24h-Grenzwertes pro Monat und relative Summenhäufigkeit (Kaiserstraße).....	31
Abb. 29	Monatsmittel der Ozon-Immissionskonzentrationen.....	34
Abb. 30	Langjährig gemittelte Tagesgänge der Ozon-Immissionskonzentrationen .....	34
Abb. 31	Rechengebiete Klimaökologie .....	42
Abb. 32	Lufttemperatur in 2 m über Grund.....	47
Abb. 33	Exemplarischer Verlauf der Temperaturmessfahrt .....	48
Abb. 34	Strömungsgeschwindigkeit und Windrichtung im Kerngebiet (Analyse 2005) .....	51
Abb. 35	Kaltluftvolumenstrom und Strömungsfeld im Kerngebiet (Analyse 2005) .....	53
Abb. 36	Abweichung der Lufttemperatur in 2 m ü.G. zwischen Prognose-0 und Ist-Zustand 2005 .....	55
Abb. 37	Abweichung der Windgeschwindigkeit zwischen Prognose-0 und Ist-Zustand 2005 .....	56
Abb. 38	Abweichung des Kaltluftvolumenstroms zwischen Prognose-0 und Ist-Zustand 2005.....	57
Abb. 39	Abweichung der Lufttemperatur in 2 m ü.G. zwischen Prognose-Plan und Ist-Zustand 2005 .....	58
Abb. 40	Abweichung der Windgeschwindigkeit zwischen Prognose-Plan und Ist-Zustand 2005 .....	59
Abb. 41	Abweichung des Kaltluftvolumenstroms zwischen Prognose-Plan und Ist-Zustand 2005 .....	60
Abb. 42	NO <sub>2</sub> -Immission im Kerngebiet (Jahresmittelwert Analyse 2005).....	63
Abb. 43	NO <sub>2</sub> -Immission im Kerngebiet (austauscharme Wetterlage Analyse 2005)).....	65
Abb. 44	Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet Analyse 2005 (austauscharme Wetterlage).....	67

Abb. 45	Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet Prognose-0 2020 (austauscharme Wetterlage).....	67
Abb. 46	Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet Analyse 2005 (Jahresmittelwert).....	68
Abb. 47	Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet Prognose-0 2020 (Jahresmittelwert).....	68
Abb. 48	Klimafunktionen im Bereich Trier-Süd (Analyse 2005).....	71
Abb. 49	Flächenanteile der bioklimatischen Belastungssituation im Stadtgebiet (Analyse 2005).....	80

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Mittlere Monatsmittel der Lufttemperatur und mittlere Monatssummen des Niederschlags und der Sonnenscheindauer.....	3
Tab. 2	Ausgewählte Mittel- und Extremwerte der Lufttemperatur .....	5
Tab. 3	Ausgewählte Ereignistage pro Jahr .....	6
Tab. 4	Lineare Trendanalysen der Monatssummen von Inversionsereignissen im Gesamtzeitraum.....	11
Tab. 5	Lineare Trendanalysen der Monatssummen von Inversionsereignissen pro Jahreszeit .....	11
Tab. 6	Langjährig gemittelte Windstärken.....	12
Tab. 7	Erfasste Komponenten der ZIMEN-Stationen in Trier .....	18
Tab. 8	Ausgewählte Schadstoffe und entsprechende Messverfahren des ZIMEN .....	18
Tab. 9	Grenzwerte für Stickstoffoxide gemäß der EU Richtlinie 1999/30/EG .....	20
Tab. 10	Zulässige Toleranzmargen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die $\text{NO}_2$ -Grenzwerte .....	20
Tab. 11	Deskriptive Statistik der $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentrationen.....	21
Tab. 12	Absolute Häufigkeit der $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentrationen $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	21
Tab. 13	Deskriptive Statistik der $\text{NO}_2$ -Konzentrationen .....	24
Tab. 14	Staubemissionen aus den verschiedenen Quellgruppen für das Jahr 1996.....	26
Tab. 15	Grenzwerte für Partikel (PM 10) nach EU-Richtlinie 1999/30/EG .....	27
Tab. 16	Deskriptive Statistik der PM 10-Immissionskonzentrationen (Ostallee) .....	28
Tab. 17	Deskriptive Statistik der PM 10-Immissionskonzentrationen (Kaiserstraße).....	30
Tab. 18	Grenzwerte für Ozon nach EU Richtlinie 1999/30/EG.....	33
Tab. 19	Deskriptive Statistik der Ozon-Immissionskonzentrationen.....	34
Tab. 20	Kennwerte zum Versiegelungsgrad und zur Strukturhöhe der Nutzungen .....	37
Tab. 21	Kaltluftlieferung der Grünflächen .....	43
Tab. 22	Einordnung Mittelwert Kaltluftvolumenstrom innerhalb der Kaltlufteinzugsgebiete.....	44
Tab. 23	Klassifizierung der bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen.....	44
Tab. 24	Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms .....	52
Tab. 25	Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Trier .....	70
Tab. 26	Qualitative Einordnung der planerisch relevanten Grünflächen im Ist-Zustand 2005.....	76
Tab. 27	Planungshinweise für Grünflächen und Siedlungsräume.....	78
Tab. 28	Flächenbilanz der Kaltluftlieferung von Grünflächen in den Szenarien.....	79

Tab. 29 Flächenbilanz der bioklimatischen Belastung von Siedlungsflächen in den Szenarien .....79

## 1 Aufgabenstellung

Das Schutzgut Klima/Luft ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und Bestandteil der Abwägung bei der Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele ist das Vorliegen flächenbezogener Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieses Schutzgutes. Aus der Kenntnis über das in einer Stadt vorherrschende Lokalklima, die dadurch mitbestimmte lufthygienische Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen sind Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft abzuleiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt somit ab auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse, die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität und das Angebot besonderer Lokalklimate.

Im Auftrag der Stadt Trier wurde vom Büro *GEO-NET Umweltconsulting GmbH* in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover) im Jahr 2008 eine *modellgestützte Analyse* zu den klimaökologischen und lufthygienischen Funktionen für das Stadtgebiet von Trier 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 *Universität Trier* (Fachbereich Klimatologie) ist an dem Projekt mit *messwertgestützten* Auswertungen zur klimatischen (Kap. 2) und lufthygienischen Situation (Kap. 3) im Raum Trier sowie der Durchführung von Temperaturmessfahrten zur Modellvalidierung (Kap. 6.1.1) beteiligt.

Die mit 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 Trier geführt. Die durchgeführten Untersuchungen haben darüber hinaus zum Ziel, die unterschiedlichen Teilflächen der Stadt Trier nach ihren klimatischen Funktionen, d.h. ihrer Wirkungen auf andere Räume, abzugrenzen.

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 (NO<sub>2</sub>) als lufthygienischer Belastungsbereich Eingang in die Klimafunktionskarte. Weiterführende Aussagen zur lufthygienischen Situation im Stadtgebiet Trier sind den entsprechenden Fachgutachten zu entnehmen.



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.

Neben dem Ausgangszustand des Jahres 2005 sind zusätzlich die Planungen bis zum Jahr 2020 berücksichtigt und als Prognose-0-Fall bzw. Prognose-Plan-Fall modelliert worden. Somit liegen neben den Klimaparametern auch die Klimafunktions- und Planungshinweiskarten für diese beiden Szenarien vor (s. Anhang).

Das methodische Vorgehen (Modell, Verfahren, Bewertungsansätze) erlaubt dabei fundierte Aussagen für den Maßstabbereich 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 Einordnung der klimatischen und lufthygienischen Situation im Untersuchungsraum auf Basis mehrjähriger Messungen (ausgewertet durch die Universität Trier) 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 Planungskarten Klima/Luft sind dem Anhang beigelegt.

## 2 Klimatische Situation im Raum Trier

### 2.1 Allgemeine klimatische Einordnung des Untersuchungsraums

Das obere Tal der Mosel durchzieht die „Lothringer Hochfläche“ in nordsüdlicher Richtung. Der weitere Verlauf führt durch das Trierer Tal zwischen dem westlichen Hunsrück und der Südeifel und weiter in das Wittlicher Becken. Das Klima im relativ eng begrenzten Moseltal im Bereich der Stadt Trier und speziell das Stadtklima kann nur im Zusammenhang mit den großräumigen Strömungsverhältnissen gesehen werden. Das Untersuchungsgebiet liegt noch im klimatischen Einflussbereich des atlantischen Ozeans und ist durch mäßig kalte Winter und nicht zu heiße Sommer gekennzeichnet. Die dominierende Windrichtung ist Südwest bis West. Im von Südwest nach Nordost verlaufenden Trierer Tal sind Winde aus Nordost die zweithäufigste

Tabelle 1: Mittlere Monatsmittel der Lufttemperatur und mittlere Monatssummen des Niederschlags und der Sonnenscheindauer an ausgewählten Stationen sowie für Gesamtdeutschland (Zeitraum 1961 bis 1990); Quelle: Klimainformationssystem (KLIS) des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Station	Höhe ü NN	Breite	Länge	Met. Parameter	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Trier-Stadt	144 m	49°45´	06°39´	Lufttemperatur in °C	1,7	2,7	5,7	9,1	13,5	16,6	18,5	17,7	14,5	10,3	5,4	2,7	9,9
				Niederschlag in mm	60,4	54,2	62,9	51,7	61,9	66,5	67,4	67,1	56,6	63,9	72,0	69,3	754,1
				Sonnenscheindauer in h	24,9	55,6	96,6	138,4	164,6	171,0	183,0	172,1	131,2	76,2	30,8	20,1	1264,5
Trier-Petrisberg	265 m	49°45´	06°40´	Lufttemperatur in °C	0,9	1,9	4,9	8,4	12,6	15,7	17,6	17,1	14,0	9,8	4,6	1,8	9,1
				Niederschlag in mm	59,8	54,9	63,6	52,8	67,9	73,4	69,9	71,0	59,4	65,4	74,4	71,8	784,3
				Sonnenscheindauer in h	43,6	76,9	114,3	156,9	203,4	206,3	225,5	200,5	152,4	103,3	49,4	40,1	1572,6
Koblenz-Horchheim	85 m	50°20´	07°36´	Lufttemperatur in °C	2,2	3,1	6,1	9,7	14,2	17,3	18,9	18,4	15,2	10,9	6,0	3,2	10,4
				Niederschlag in mm	43,3	37,2	46,2	51,0	60,3	77,6	81,0	69,9	50,5	51,7	56,1	50,0	674,8
				Sonnenscheindauer in h	39,0	67,8	101,8	145,4	185,0	186,6	197,0	178,4	140,9	97,2	48,1	35,9	1423,1
Saarbrücken-Ensheim	319 m	49°13´	07°07´	Lufttemperatur in °C	0,4	1,6	4,7	8,3	12,5	15,6	17,6	17,1	14,1	9,6	4,3	1,4	8,9
				Niederschlag in mm	68,2	59,5	66,0	60,2	80,7	83,4	71,9	72,7	62,0	71,4	84,0	83,0	862,9
				Sonnenscheindauer in h	42,1	80,4	119,2	161,0	208,3	214,4	239,6	215,8	168,0	111,7	57,3	43,1	1660,8
Saarbrücken-St. Johann	193 m	49°13´	07°01´	Lufttemperatur in °C	1,7	2,9	6,1	9,9	14,2	17,3	19,4	18,6	15,3	10,7	5,5	2,6	10,4
				Niederschlag in mm	69,1	60,6	65,8	57,9	75,2	74,0	63,2	67,5	59,5	68,0	78,6	81,3	820,7
				Sonnenscheindauer in h	31,9	71,1	101,5	137,1	172,7	189,3	205,4	174,4	141,2	94,3	42,4	32,4	1393,8
Mainz	125 m	49°59´	08°16´	Lufttemperatur in °C	1,2	2,4	5,8	9,8	14,3	17,5	19,2	18,6	15,0	10,1	5,1	2,3	10,1
				Niederschlag in mm	41,6	38,9	44,1	46,8	60,7	66,1	62,5	58,8	43,9	46,9	52,6	50,3	613,2
				Sonnenscheindauer in h	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Deutschland*				Lufttemperatur in °C	-0,5	0,4	3,5	7,3	11,9	15,2	16,8	16,4	13,2	8,9	3,9	0,7	8,1
				Niederschlag in mm	61,1	50,1	57,4	59,6	72,5	86,1	78,1	78,5	61,0	56,0	66,4	70,7	797,5
				Sonnenscheindauer in h	44,6	72,1	110,8	151,8	196,7	199,4	209,7	197,8	150,5	109,3	54,5	39,3	1536,4

\* die angegebenen Mittelwerte für Deutschland beziehen sich auf eine aus allen Stationshöhen gemittelte Höhe von 324 m ü. NN.

Windrichtung. Die registrierten Niederschlagssummen werden durch die Lage des Untersuchungsgebietes im Lee der Südwesteifel und im Luv des westlichen Hunsrücks bestimmt und erreichen durchschnittliche Werte. Eine detaillierte Übersicht über die regionalklimatischen Gegebenheiten gibt LICHT 2005. Abbildung 1 zeigt den langjährig gemittelten Jahresgang der Lufttemperatur und der Niederschlagssummen an der Station Trier-Petrisberg für den Zeitraum 1961 bis 1990 (265 m ü. NN). Tabelle 1 zeigt die mittleren Werte der Lufttemperatur, der Niederschlagssummen und der Summen der Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1961 bis 1990 an ausgewählten Stationen in Rheinland-Pfalz und dem Saarland.

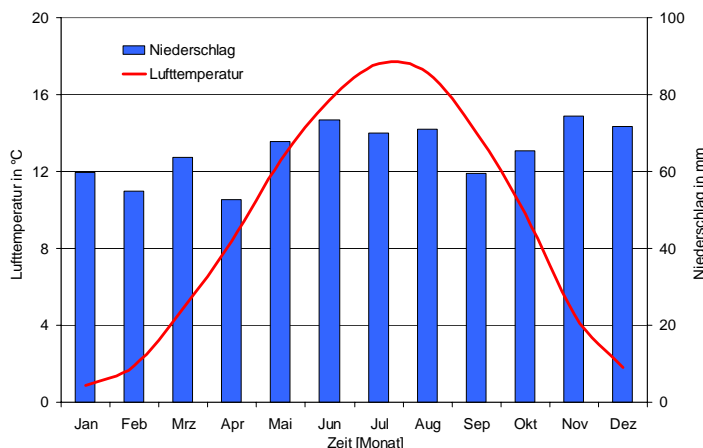


Abbildung 1: Langjährig gemittelter Jahresgang der Lufttemperatur und der Niederschlagssummen an der Station Trier-Petrisberg, Zeitraum 1961 bis 1990.

Die Werte der beiden in Trier gelegenen DWD-Stationen liegen bei allen drei Größen im mittleren Bereich. Nur die langjährig gemittelten Werte der Sonnenscheindauer an der Station Trier-Stadt liegen deutlich unter denen der anderen Stationen. Dies ist auf die Lage der Station im Tal der Mosel zurückzuführen. Im Vergleich zu den anderen Stationen treten an der Station Trier-Petrisberg im Juli bis September im Mittel relativ niedrige Werte der Lufttemperatur auf. Diese liegen aber immer noch über dem Gebietsmittel für Gesamtdeutschland. Die an den beiden Stationen in Trier registrierten Niederschlagsmengen weisen durchschnittlicher Werte auf, von einer Niederschlagsarmut der Region kann nicht gesprochen werden.

## 2.2 Meteorologische Situation in Trier

### 2.2.1 Thermische Verhältnisse

Die Charakterisierung der thermischen Verhältnisse im Untersuchungsraum erfolgt zum einen über langjährige Mittel- und Extremwerte der Lufttemperatur (Zeitraum 1969 bis 1998), zum anderen über abgeleitete Größen wie z.B. Ereignistage. Der meteorologische Parameter Lufttemperatur hat auf verschiedene Bereiche des Stadtökosystems großen Einfluss. Bezogen auf die Vegetation und die phänologischen Phasen dominiert der Einfluss der Lufttemperatur über andere klimatische und geogene Faktoren (BRUNS & HECHLER 1998). Die thermische Schichtung bestimmt primär den vertikalen Luftaustausch und somit die Schadstoffkonzentrationen in der bodennahen Luftschicht.

### 2.2.2 Langjährige Mittelwerte und Ereignistage

Zur Beschreibung der langfristigen Entwicklung der thermischen Verhältnisse im Untersuchungsraum sind in Abbildung 2 die Jahresmittel der Lufttemperatur, berechnet aus Tagesmittelwerten der beiden Stationen Trier-Stadt (S) und Trier-Petrisberg (P) sowie die Differenz der beiden Stationen (S-P) dargestellt. Die Differenzen sind sowohl auf die unterschiedliche Höhenlage der beiden Stationen, als auch auf die urbane Wärmeinsel zurückzuführen. Im Mittel liegt die Lufttemperatur an der

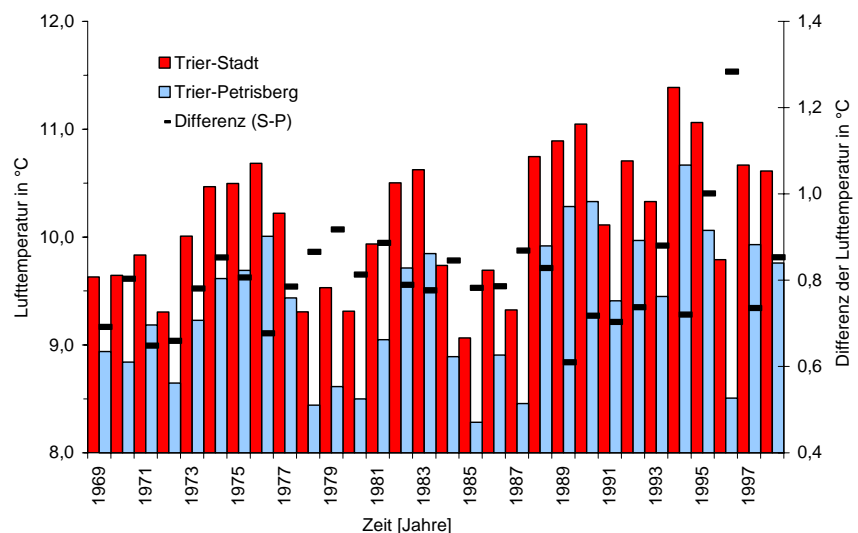


Abbildung 2: Jahresmittel der Lufttemperatur an den Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg, sowie die Differenz (Stadt-Petrisberg), berechnet aus Tagesmittelwerten, Zeitraum 1969 bis 1998.

Station Trier-Stadt um 0,8 °C höher als an der Station Trier-Petrisberg. Beide Reihen der Jahresmittel der Lufttemperatur weisen positive statistisch signifikante Trends auf. Der Trend ist mit einem Trendwert von +0,99 °C (Signifikanz > 99%) an der Station Trier-Stadt geringfügig höher als mit +0,87 °C (Signifikanz > 96%) an der Station Trier-Petrisberg. Die Auswertungen der Monatsmittel zeigen für die

Station Trier-Stadt signifikante positive Trends für die Monate April (+1,5 °C), Mai (+1,8 °C) und August (+1,6 °C) (Signifikanzniveau jeweils > 95%). Für die Station Trier-Petrisberg zeigt die lineare Trendauswertung nur für die Monate April (+1,5 °C) und August (+1,6 °C) signifikante Trends (Signifikanzniveau jeweils > 95%). Aus den Datenreihen der Lufttemperatur der beiden Stationen alleine lässt sich für die Stadt Trier keine Intensivierung der urbanen Wärmeinsel erkennen. Tabelle 2 zeigt ausgewählte Mittel- und Extremwerte der Lufttemperatur an den Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg im Zeitraum 1969 bis 1998.

Tabelle 2: Ausgewählte Mittel- und Extremwert der Lufttemperatur an den Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg, Zeitraum 1969 bis 1998.

	Trier-Stadt	Trier-Petrisberg
Jahresmittel	10,2 °C	9,4 °C
maximales Tagesmittel	28,6 °C (8.8.1992)	28,8 °C (31.8.1983)
minimales Tagesmittel	-14,9 °C (1.1.1979)	-14,4 °C (1.1.1979)
abs. Maximum	37,0 °C (21.7.1995)	37,1 °C (11.8.1998)
absolutes Minimum	-18,3 °C (1.1.1979)	-18,3 °C (1.1.1979)
mittlere Tagesschwankung	8,3 °C	8,1 °C
maximale Tagesschwankung	22,1 °C (26.8.1976)	21,5 °C (1.6.1994)

Auch an der Anzahl der Ereignistage sind die unterschiedliche Ausprägung des Regionalklimas und die Unterschiede zwischen Stadt und Umland zu erkennen (HELBIG ET AL.

2002). Folgende temperaturbezogene Ereignistage wurden für den Zeitraum 1969 bis 1998 berechnet.

- Extrem Kalte Tage: Tagesminimum der Lufttemperatur < -10 °C
- Eistag: Tagesmaximum der Lufttemperatur < 0 °C
- Frosttag: Tagesminimum der Lufttemperatur < 0 °C
- Kalte Tage: Tagesmittel der Lufttemperatur < 0 °C
- Frostwechseltag: Tagesmaximum der Lufttemperatur > 0 °C und Tagesminimum der Lufttemperatur < 0°C
- Sommertag: Tagesmaximum der Lufttemperatur > 25 °C
- Heißer Tag: Tagesmaximum der Lufttemperatur > 30 °C

Es zeigt sich, dass allgemein die Anzahl der Ereignistage in den städtisch geprägten Bereichen während der Wintermonate im Vergleich zu den Umlandstationen verringert, im Sommer dagegen erhöht ist. Dies ist auf die urbane Wärmeinsel zurückzuführen, die im gesamten Jahresverlauf eine positive Temperaturanomale bewirkt (KUTTLER & BARLAG 2002). So erreicht die durchschnittliche Anzahl der Eistage im langjährigen Mittel 1969 bis 1998 an der höher gelegenen Station Trier-Petrisberg 15,5 Tage pro Jahr, während die Station Trier-Stadt im Moseltal im Durchschnitt nur 9,3 Tage im langjährigen Mittel aufweist (Tabelle 3). Die durchschnittliche Anzahl der Frosttage liefert ein ähnliches Bild. Insgesamt sind an der Station Trier-Stadt im Durchschnitt 25% weniger „extrem kalte Tage“, 40% weniger „Eistage“, 34% weniger „Frosttage“ und 14% weniger „Frostwechseltage“ zu verzeichnen. Hinsichtlich der „Sommertage“ treten an der Stadtstation 13% mehr Ereignistage auf. Die Häufigkeit der „Heißen Tage“ ist an beiden Stationen ähnlich hoch.

Tabelle 3: Ausgewählte Ereignistage pro Jahr, berechnet aus den Werten der Klimatermine der Lufttemperatur der beiden Stationen Trier-Petrisberg (P) und Trier-Stadt (S), Zeitraum 1969 und 1998.

Jahr	Extrem kalter Tag		Eistag		Frosttag		Frostwechselltag		Kalter Tag		Sommertag		Heißer Tag	
	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P
1969	1	1	20	32	50	96	50	62	45	54	54	45	12	8
1970	1	4	15	23	52	87	52	63	33	43	44	30	5	0
1971	6	8	11	12	52	76	52	63	33	37	46	39	9	9
1972	2	3	8	10	44	58	44	47	21	25	28	20	5	3
1973	3	3	6	7	74	88	74	81	19	28	63	53	24	19
1974	0	0	0	0	22	32	22	30	3	8	36	30	3	3
1975	0	1	2	4	54	73	54	67	7	18	52	44	15	15
1976	3	5	5	14	18	77	18	63	12	33	69	71	24	26
1977	0	0	3	8	42	55	42	47	19	26	25	19	3	2
1978	2	2	11	23	48	72	48	49	31	41	25	19	2	2
1979	7	10	16	23	47	83	47	59	27	43	38	26	4	1
1980	2	3	11	20	56	70	56	50	27	37	22	22	2	2
1981	1	1	9	13	60	89	60	76	38	49	32	27	2	3
1982	3	4	15	16	40	64	40	48	27	29	57	53	9	10
1983	0	0	5	15	60	72	60	57	31	38	67	62	19	19
1984	0	0	0	1	44	67	44	66	10	19	26	26	7	8
1985	16	19	30	40	52	98	52	56	50	59	33	27	4	4
1986	6	10	17	28	47	81	47	53	38	45	45	43	9	7
1987	8	11	21	31	52	86	52	54	47	59	30	24	3	3
1988	0	1	1	2	33	53	33	51	7	12	35	31	4	4
1989	0	0	6	8	42	61	42	53	23	31	58	53	10	8
1990	0	0	0	8	34	45	34	36	9	17	49	45	14	13
1991	3	4	12	19	57	78	57	58	37	44	59	53	16	18
1992	0	0	3	8	41	49	41	41	17	24	53	48	7	8
1993	1	3	14	19	55	72	55	52	29	44	45	41	3	3
1994	0	0	0	5	37	44	37	39	13	18	53	49	23	25
1995	0	0	6	13	46	61	46	48	19	27	60	57	23	20
1996	4	4	13	34	44	88	44	51	25	62	41	41	5	7
1997	7	5	14	15	44	61	44	46	22	28	51	49	9	9
1998	2	2	4	14	45	60	45	45	21	30	36	35	12	14
Summe	78	104	278	465	1392	2096	1392	1611	740	1028	1332	1182	287	273
Mittelwert	3	3	9	16	46	70	46	54	25	34	44	39	10	9

Neben der durchschnittlichen Anzahl der Ereignistage sind vor allem die Ergebnisse der linearen Trenduntersuchungen wichtig, um Aussagen über die zeitliche Entwicklung treffen zu können. Für die Station Trier-Stadt liefert die lineare Trendanalyse kaum signifikante Trends. Die Anzahl der „Frosttage“ verringert sich durchschnittlich um 0,6 Tage pro Jahr (Signifikanzniveau > 93%). Auch die Anzahl der „Frostwechselltage“ an der Station Trier-Petrisberg geht um durchschnittlich 0,5 Tage im Jahr zurück (Signifikanzniveau > 99%).

### 2.2.3 Veränderung der Vegetationsperiode

Das Eintrittsdatum verschiedener phänologischer Phasen wird einerseits durch die nachgewiesene Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur, zum anderen durch die städtische Wärmeinsel beeinflusst. Zahlreiche Untersuchungen zeigen sowohl eine Verschiebung der Vegetationsperiode als auch Veränderungen in den periodischen Wanderungen von Zugvögeln (HECHLER 1990, AHAS 1999, MENZEL & FABIAN 1999, MATZARAKIS 2001). Die Auswirkungen der Klimaänderung auf den für die Region typischen Weinbau beschreiben LÜERS 2003 und LICHT 2005. Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht auf phänologische Beobachtungen zurückgegriffen werden. Stattdessen wird die thermische Vegetationsperiode auf Basis der Tagesmittel der Lufttemperatur der beiden DWD-Stationen berechnet.

Als Vegetationsperiode wird der Zeitraum vom Austreiben einer Pflanze bis zum Laubfall bei Gehölzen, dem Einziehen in Überdauerungsorgane bei Stauden oder dem Absterben bei einjährigen Pflanzen bezeichnet. Für den Termin des Beginns der Vegetationsperiode wird nach CHEMLEWSKI (2001) der Tag im Jahr gewählt, an dem das Tagesmittel der Lufttemperatur die 5 °C-Schwelle überschreitet und dies auch in den folgenden 30 Tagen der Fall ist. Das Datum für das Ende der Vegetationsperiode wurde durch das Unterschreiten der 5 °C-Schwelle bis zum Jahresende bestimmt.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen den Beginn und das Ende, beides in Tagen seit Jahresbeginn (DOY) sowie die Andauer der thermischen Vegetationsperiode an den beiden DWD Stationen für den Zeitraum 1969 bis 1998. Im Mittel dauert die Vegetationsperiode an der Station Trier-Petrisberg 256 Tage, an der Station Trier Stadt dagegen 277 Tage. Der mittlere Beginn tritt an der Station Trier-Stadt (20. Februar) sieben Tage früher als an der Station Trier-Petrisberg (27. Februar) auf. Dies, wie auch das spätere Ende (Trier-Petrisberg: 9. November; Trier-Stadt: 23. November), ist zum einen in der unterschiedlichen Höhenlage der beiden Stationen zum anderen in dem urbanen Wärmeinseleffekt begründet.

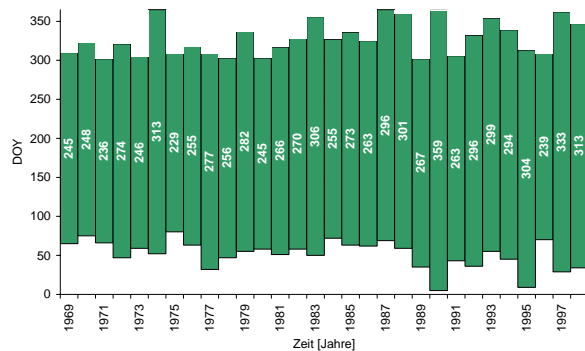
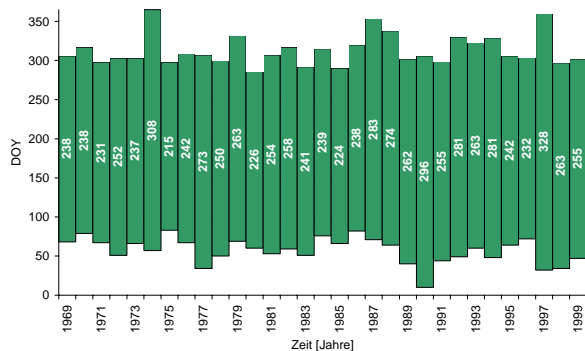


Abbildung 3: Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode für die Station Trier-Petrisberg, Zeitraum 1969 bis 1999.

Abbildung 4: Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode für die Station Trier-Stadt, Zeitraum 1969 bis 1999.

Die im Zeitraum 1969 bis 1998 europaweit beobachtete Erwärmung im Frühjahr führte zu einem deutlich früheren Beginn der Vegetationsperiode und damit zu einer Verlängerung der Vegetationszeit. Ursache für die beobachtete Erwärmung ist die Veränderung der Zirkulation im zeitigen Frühjahr über Europa, mit zunehmend positiven Phasen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) (CHMIELEWSKI & RÖTZER 2001, RÖTZER & CHMIELEWSKI 2001, CHMIELEWSKI & RÖTZER 2002). Die linearen Trendanalysen des Starttermins der Vegetationsperiode zeigen für beide Stationen statistisch signifikante Trends (Signifikanzniveau > 95%). Die Verlängerung der Vegetationsperiode basiert zum Großteil auf einem früheren Beginn der Vegetationsperiode, weniger auf einer Verspätung des Vegetationsendes. An der Station Trier-Petrisberg beginnt die Vegetationsperiode im Mittel um 0,7 Tage pro Jahr früher, an der Station Trier-Stadt im Mittel um 1,0 Tage früher. Der Trend bezüglich des Endes der Vegetationsperiode ist nur an der Station Trier-Stadt signifikant (Signifikanzniveau > 95%). Das Ende verlagert sich um 0,9 Tage pro Jahr nach hinten. Auch die Andauer der Vegetationsperiode in Tagen zeigt statistisch signifikante Trends (Signifikanzniveau > 98%). Während sich die Vegetationsperiode an der Station Trier-Petrisberg im Untersuchungszeitraum um 1,1 Tage pro Jahr verlängert, beträgt die Verlängerung an der Station Trier Stadt für den gleichen Zeitraum 1,9 Tage. Diese deutlichere Verlängerung könnte auf eine Intensivierung der urbanen Wärmeinsel der Stadt Trier zurückzuführen sein. Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen stimmen gut mit den Ergebnissen von MENZEL ET AL. 2003 oder HENNIGES ET AL. 2005 überein.

## 2.2.4 Inversionshäufigkeit im Untersuchungsraum

Die Temperaturschichtung der Atmosphäre bestimmt weitgehend den vertikalen Luftaustausch und hat somit großen Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen in der bodennahen Luftschicht (JUNK ET AL. 2003). In der Regel nimmt die Lufttemperatur mit der Höhe ab. Liegt jedoch der umgekehrte Fall, also eine Temperaturzunahme mit der Höhe vor, spricht man von einer Inversion (= Umkehrung) oder inversen Schichtung. Inversionen werden entweder nach ihrer Entstehungsart oder ihrer Höhenlage klassifiziert. Strahlungsinversionen entstehen in den meisten Fällen am Erdboden (Bodeninversionen) als Folge der nächtlichen Auskühlung des Erdbodens. Sie können aber auch an Obergrenzen von Wolken als Höheninversion auftreten. Absinkinversionen (Höheninversion) entstehen infolge großräumiger Absinkbewegungen von Luftmassen z.B. in Hochdruckgebieten. Als weiterer Typ existiert die Aufgleitinversion, die durch das Aufgleiten von warmen über kalten Luftmassen entsteht (KRAUS 2000, MÖLLER 2003, SCHÖNWIESE 2003a).

Die Bildungsprozesse für Bodeninversionen werden durch die Tallage der Stadt Trier noch verstärkt. Zum einen ist aufgrund der Topographie die Windgeschwindigkeit verringert, zum anderen kann die von den Talhängen abfließende Kaltluft die Bildung von Inversionen begünstigen.

Da auf keine kontinuierlichen Vertikalsondierungen im Stadtgebiet von Trier zurückgegriffen werden kann, wird in Anlehnung an HOSLER 1961, zur Bewertung der thermischen Stabilität, die Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten DWD-Stationen in unterschiedlicher Höhenlage genutzt und als Inversionsereignis bezeichnet. Die Höhendifferenz zwischen den Stationen Trier-Petrisberg (265m ü. NN) und Trier-Stadt (144m ü. NN) beträgt ca. 130m. Die horizontale Entfernung der beiden Stationen beträgt nur wenige hundert Meter. Da der Betrieb der DWD Station Trier-Stadt Anfang 1999 eingestellt wurde, liegen die Klimaterminwerte (7:30, 14:30 und 21:30) nur für den Zeitraum zwischen dem 1.1.1948 bis zum 31.1.1999

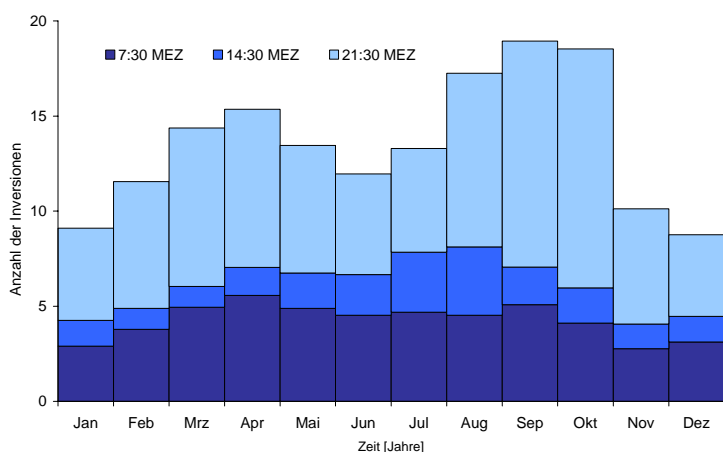


Abbildung 5: Langjährig gemittelter Jahresgang (1948 – 1998) der Häufigkeit von Inversionshäufigkeiten aus Monatssummen zu den drei Klimaterminen 7:30 Uhr MEZ dunkelblau, 14:30 Uhr MEZ mittelblau und 21:30 MEZ hellblau. Inversionsereignisse bestimmt durch die Differenz der Lufttemperatur zwischen den DWD Stationen Trier-Petrisberg (P) und Trier-Stadt (S) mit  $P-S \geq 0$ .

vor. Für spätere Auswertungen wird die Differenz zwischen der ZIMEN Station Trier-Ostallee und der Station Trier-Petrisberg genutzt. Da die ZIMEN Station an diesem Standort erst seit 1995 Daten liefert, kann jedoch für die folgenden Trendauswertungen nicht auf dieses Stationspaar zurückgegriffen werden.

Es liegen von den beiden DWD-Stationen geschlossene Zeitreihen von 1948 bis 1999 der drei Terminwerte der Lufttemperatur mit Ausnahme der Monate Januar und Mai 1996 vor. Eine Ergänzung dieser Datenlücke ist nicht möglich, da keine Referenzstationen in gleicher Höhenlage in ausreichend geringer Entfernung liegen. Für die Trendanalysen

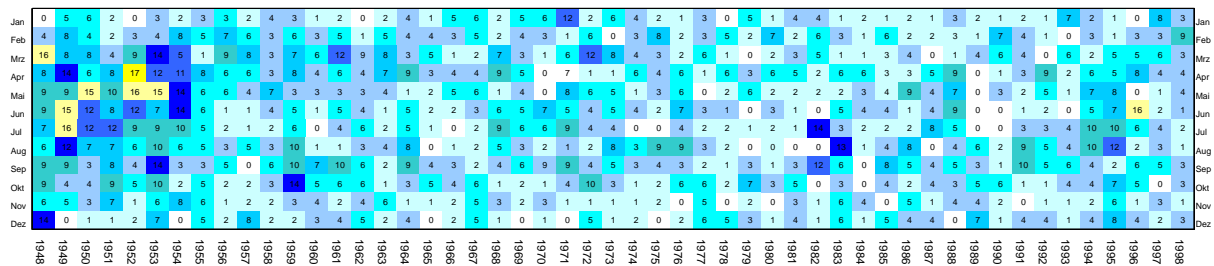
wurden die Datenreihen der Monatsmittelwerte mittels linearer Interpolation geschlossen. Als Inversionsereignis wird ein Fall gewertet, wenn die Differenz der Lufttemperatur zwischen der Station Trier-Petrisberg und der Station Trier-Stadt  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  ist.

Durchschnittlich treten im Zeitraum von 1948 bis 1998 die meisten Inversionsereignisse mit 25% aller Beobachtungen zum 21:30 Uhr MEZ Termin, gefolgt mit 13% um 7:30 Uhr MEZ und 6% um 14:30 Uhr MEZ auf. Abbildung 5 zeigt den Jahresgang der Häufigkeit von Inversionsereignissen zu den drei Klimaterminen, gemittelt aus den Monatssummen der Inversionshäufigkeit. Während der 21:30 Uhr Termin zwei deutliche Peaks im Frühjahr und Herbst aufweist, sind diese bei dem morgendlichen 7:30 Uhr Termin nur noch sehr schwach ausgeprägt. Im Oktober können im langjährigen Mittel bis zu 12 Inversionen am Abend beobachtet werden. Die Anzahl der Inversionen zum 14:30 Uhr Termin variiert zwischen ein und drei Ereignissen und zeigt ein schwaches Maximum im Sommer (Juli / August). Abbildung 6a bis 6c zeigt die Verteilung der absoluten Häufigkeiten der Monatssummen von Inversionsereignissen in Trier im Zeitraum 1948 bis 1998 zu den drei Terminwerten. Die meisten Inversionsereignisse sind am Abendtermin, gefolgt vom Morgentermin zu beobachten. Klare Strukturen sind hauptsächlich bei dem 21:30 Uhr Termin zu erkennen. Die bei den langjährig gemittelten Häufigkeiten in Abbildung 5 sichtbaren Maxima des 21:30 Uhr Termins in den Herbstmonaten September und Oktober werden durch regelmäßig auftretende hohe Werte in den Jahren von 1948 bis 1998 erklärt. Im Gegensatz dazu ist das sekundäre Maximum im Frühjahr (März und April) auf einige singuläre Ereignisse in den Jahren 1948 bis 1959 zurück zu führen. Die Häufigkeiten von Inversionsereignissen verändert sich im Laufe der Jahre. So traten in den Jahren 1948 bis 1959 deutlich mehr Inversionen zum 7:30 Uhr Termin auf als in den folgenden Jahren (Abbildung 6a). Auch die absoluten Maxima des 21:30 Uhr Termins von über 20 Inversionen pro Monat treten alle in den Jahren vor 1970 auf. Ebenfalls treten zum 14:30 Termin hohe Werte gehäuft vor 1960 auf. Auffällig ist jedoch das absolute Maximum von 15 Inversionen im Juli 1976. Die für das Stadtgebiet von Trier festgestellte Häufigkeit von Inversionsereignissen stimmt sehr gut mit den Ergebnissen von KUTTLER & BARLAG 2002 überein, die für die Stadt Gelsenkirchen innerhalb des Messzeitraumes (1.11.1998 – 31.10.1999) an 50 Prozent der Tage des Jahres das Auftreten von nächtlichen Bodeninversionen nachweisen konnten.

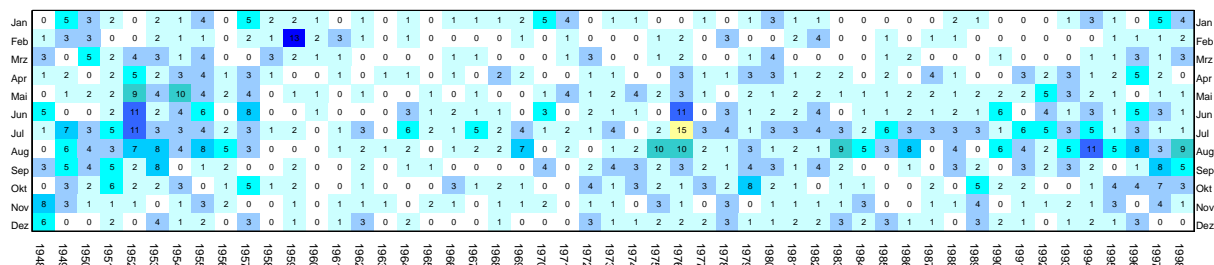


Die Veränderungen in der Häufigkeit des Auftretens von Inversionsereignissen im Stadtgebiet von Trier werden mit linearen Trenduntersuchungen der Datensätze näher untersucht. Dazu wird ein um ein Jahr kürzerer Zeitraum von 1949 bis 1998 gewählt, da für den Vergleich zwei gleich lange Zeiträume notwendig sind. Die fehlenden Mittelwerte der Monate Januar und Mai 1996 wurden mittels linearer Interpolation ergänzt.

a) 7:30 MEZ



b) 14:30 MEZ



c) 21:30 MEZ

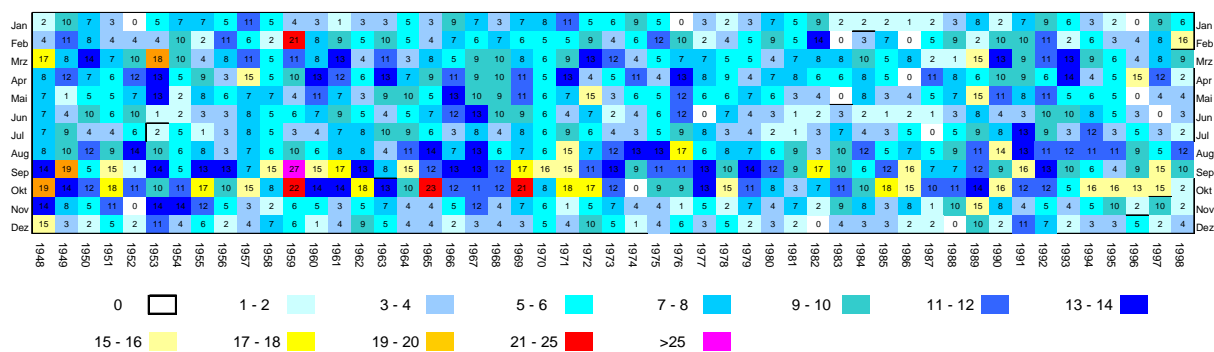


Abbildung 6: Absolute Monatssummen der Inversionsereignisse zu den Klimaterminen (a: 7:30 Uhr MEZ; b = 14:30 Uhr MEZ; c) 21:30 Uhr MEZ) im Zeitraum Januar 1948 bis Dezember 1998. Inversionsereignis definiert durch die Differenz der Lufttemperatur zwischen den DWD Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg (Stadt – Petrisberg  $\geq 0$ ).

Tabelle 4 enthält die Ergebnisse der linearen Trendanalysen. Im Gesamtzeitraum von 1949 bis 1998 zeigt sich sowohl für den 7:30 Uhr als auch für den 21:30 Uhr Termin ein signifikanter negativer Trend. Zusätzlich wurde der 50-jährige Zeitraum in zwei Teilzeiträume unterteilt und diese getrennt ausgewertet. Während im ersten Teilzeitraum von 1949 bis 1973 signifikante negative Trends festzustellen sind, ist dies im zweiten Untersuchungszeitraum von 1974 bis 1998 nicht der Fall. Zur weiteren Analyse werden die Inversionsereignisse nach den meteorologischen Jahreszeiten zusammengefasst. Sowohl im Frühjahr als

auch im Sommer ist ein deutlicher Rückgang der Häufigkeit der Inversionen zum 7:30 Uhr Termin pro Jahreszeit zu beobachten. Während des Mittagstermins treten deutlich weniger Inversionen auf (Tabelle 5).

In allen Jahreszeiten sind signifikante negative Trends zum 7:30 Uhr Termin zu beobachten. Am stärksten ist die Abnahme im Frühling mit einer Verringerung von 19 Inversionsereignissen über den gesamten Zeitraum. Im Winter sind zwar nur geringere Abnahmen fest zu stellen, jedoch erstreckt sich der signifikante negative Trend über alle drei Termine.

Die Auswirkungen dieser insgesamt negativen Trends in der Häufigkeit von Inversionsereignissen im Stadtgebiet betreffen vor allem die lufthygienischen Aspekte des Stadtklimas. Während Inversionsereignissen kann es zu erhöhten Konzentrationen von Luftschadstoffen im Stadtgebiet von Trier kommen. Nimmt jedoch die Anzahl von Inversionsereignissen ab, geht auch die Anzahl von möglichen Zeiträumen mit erhöhten Schadstoffkonzentrationen unter sonst gleichen Emissionsbedingungen zurück. Da die Datenreihe der Station Trier-Stadt nur bis zum Dezember 1998 reicht, wird für die nachstehende Untersuchung und Bewertung der lufthygienischen Situation im Stadtgebiet die Differenz der Lufttemperatur zwischen der DWD-Station Trier-Petrisberg und der ZIMEN-Station Trier-Ostallee genutzt.

Dies ermöglicht über die bereits dargestellte langzeitliche Entwicklung der Häufigkeit von Inversionsereignissen hinaus Aussagen bis für den Zeitraum 1996 bis 2005. Abbildung 7 zeigt analog zu den Auswertungen in Abbildung 6a bis 6c die Monatssummen der Inversionsereignisse zu den Klimaterminen im Zeitraum Juli 1996 bis Dezember 2005. Auch in diesem Zeitraum zeigt sich eine Häufung des Auftretens von Inversionsereignissen im Herbst zum Abendtermin. Besonders in den Sommermonaten sind zu dem 7:30 Uhr Termin kaum Inversionsereignisse festzustellen. BAKER ET AL. (1969) zeigen ähnliche jahreszeitliche Variationen im Auftreten von Bodeninversionsereignissen (bis 500 ft Höhe). Ansonsten werden die in Abbildung 1.8a bis 1.8c gefundenen Strukturen bestätigt.

Tabelle 4: Lineare Trendanalysen der Monatssummen von Inversionsereignissen im Stadtgebiet von Trier für den Gesamtzeitraum (1949 bis 1998) und die beiden Teilzeiträume 1949 bis 1973 und 1974 bis 1998; Signifikante Trendwerte rot, Signifikanzniveau in Klammern.

	7:30 MEZ	14:30 MEZ	21:30 MEZ
1949 – 1973	<b>-4,5</b> (100,0%)	<b>-2,4</b> (100,0%)	0,6 (57,5%)
1974 – 1998	1,0 (87,8%)	0,5 (80,8%)	1,1 (67,8%)
1949 – 1998	<b>-3,2</b> (100,0%)	<b>-0,2</b> (15,9%)	<b>-1,6</b> (98,6%)

Tabelle 5: Lineare Trendanalysen der Summen von Inversionsereignissen pro Jahreszeit im Stadtgebiet von Trier, Zeitraum 1949 bis 1998. Signifikante Trendwerte rot, Signifikanzniveau in Klammern.

	7:30 MEZ	14:30 MEZ	21:30 MEZ
Frühling	<b>-19,1</b> (100,0%)	-2,7 (23,9%)	-7,6 (57,5%)
Sommer	<b>-10,7</b> (95,9%)	0,1 (62,5%)	-3,3 (58,9%)
Herbst	<b>-8,6</b> (99,4%)	-0,4 (44,5%)	<b>-10,3</b> (96,8%)
Winter	<b>-3,2</b> (100,0%)	-0,2 (15,9%)	<b>-1,6</b> (98,6%)

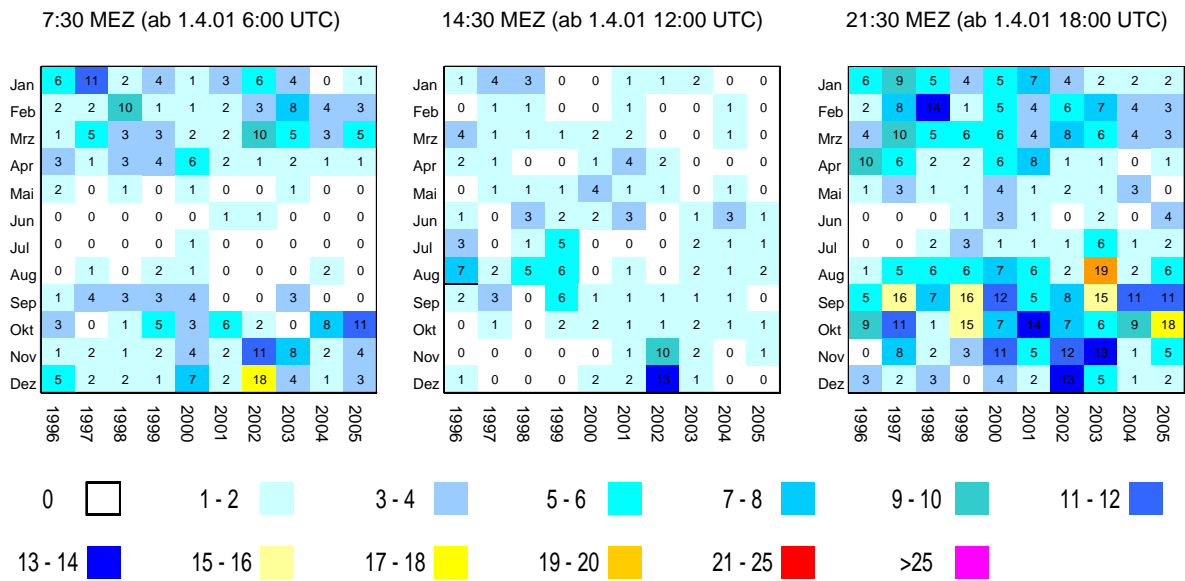


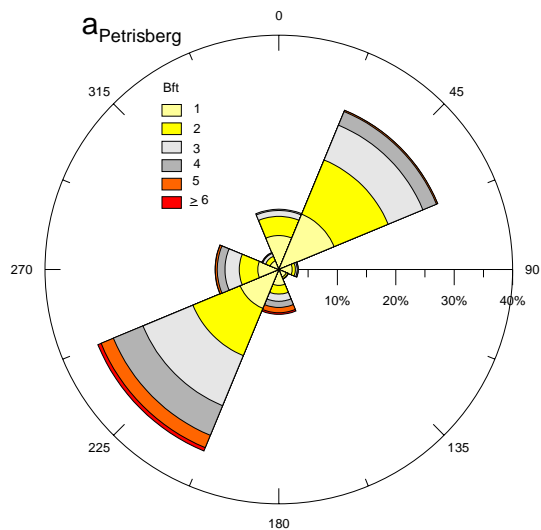
Abbildung 7: Absolute Monatssummen der Inversionsereignisse zu den Klimaterminen im Zeitraum Juli 1996 bis Dezember 2005. Inversionsereignis definiert durch die Differenz der Lufttemperatur zwischen der ZIMEN Station Trier-Ostallee (O) und der DWD Stationen Trier-Petrisberg(P) (mit:  $P - O \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

### 2.2.5 Windverhältnisse

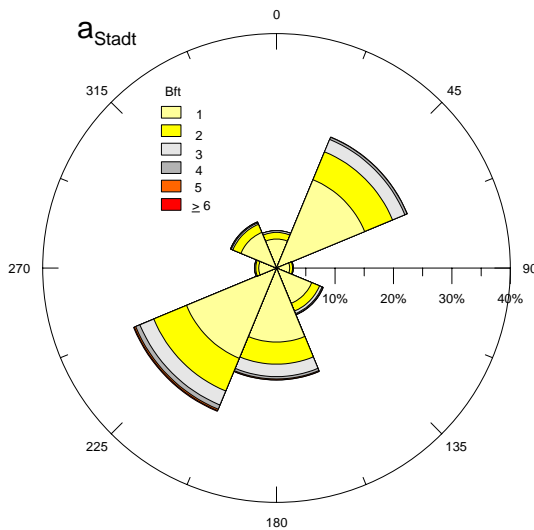
Die Windgeschwindigkeit ist eine der wesentlichen Einflussgrößen für die Ausbreitung von Luftschadstoffen. Besonders bei bodennahen Emissionsquellen ist die Immissionskonzentration im Lee von Emittenten direkt abhängig von der Windgeschwindigkeit. Für die Beschreibung der mittleren Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet werden die Datensätze der Stationen Trier-Petrisberg und Trier-Stadt des dreißigjährigen Zeitraums 1969 bis 1998 verwendet. Die Angaben zur Windgeschwindigkeit liegen in Beaufort (Bft), die der Windrichtung in der achtheiligen Windrose vor.

Tabelle 6: Langjährig gemittelte Windstärken an den Stationen Trier-Petrisberg und Trier-Stadt im Zeitraum 1969 bis 1998 in Bft.

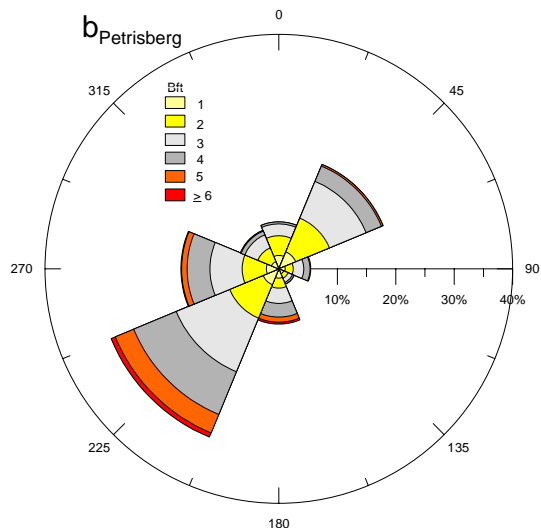
	Trier-Petrisberg	Trier-Stadt
Tagesmitte	2,31 Bft (ca. 3,0 m/s)	1,53 Bft (ca. 1,6 m/s)
7:30 MEZ	2,06 Bft (ca. 2,5 m/s)	1,43 Bft (ca. 1,5 m/s)
14:30 MEZ	2,73 Bft (ca. 3,8 m/s)	1,86 Bft (ca. 2,2 m/s)
21:30 MEZ	2,15 Bft (ca. 2,7 m/s)	1,30 Bft (ca. 1,3 m/s)



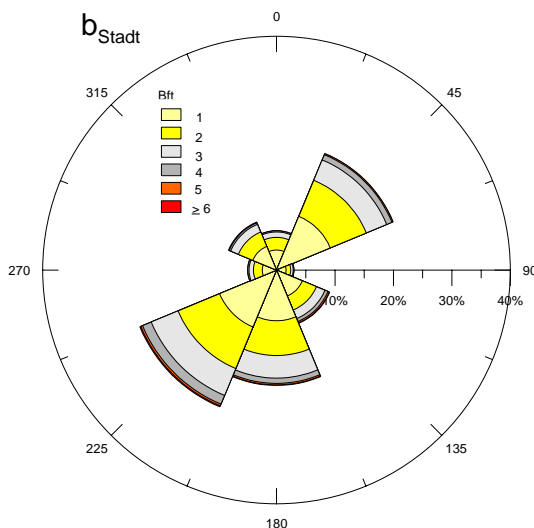
N = 10.957; Datenausfälle 139; Calmen = 7,8 %



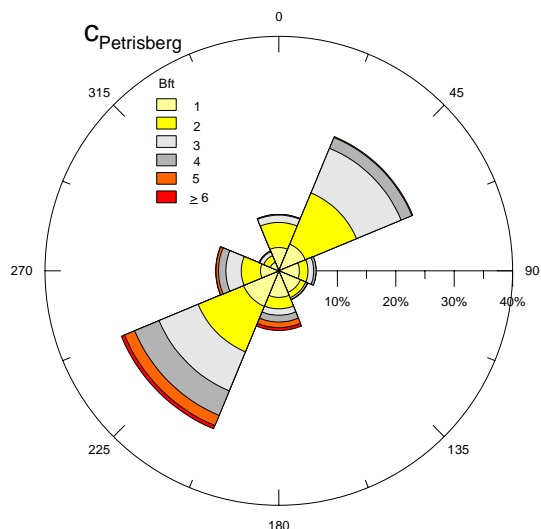
N = 10.957; Datenausfälle 63; Calmen = 1,6 %



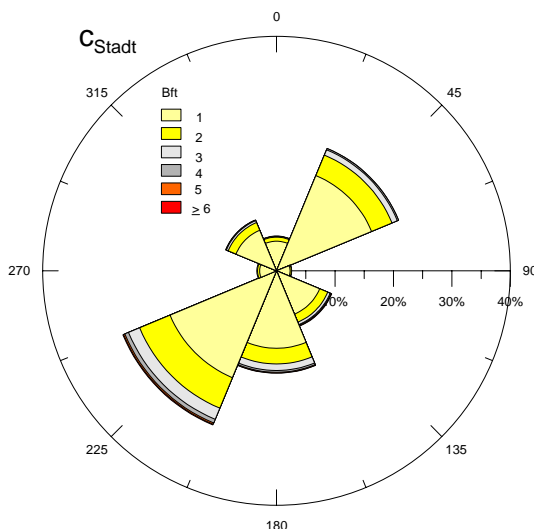
N = 10.957; Datenausfälle 139; Calmen = 1,9 %



N = 10.957; Datenausfälle 63; Calmen = 0,6 %



N = 10.957; Datenausfälle 139; Calmen = 4,4 %



N = 10.957; Datenausfälle 63; Calmen = 3,4 %

**Abbildung 8:** Windrichtungs- (8-teilige Windrose) und Windstärkeverteilung (Bft) an der DWD-Station Trier-Petrisberg (links) und Trier-Stadt (rechts) für den Zeitraum 1969 bis 1998 auf Basis der Terminwerte  $a_{\text{Petrisberg}}$  und  $a_{\text{Stadt}}$ : 7:30 MEZ;  $b_{\text{Petrisberg}}$  und  $b_{\text{Stadt}}$ : 14:30 MEZ und  $c_{\text{Petrisberg}}$  und  $c_{\text{Stadt}}$ : 21:30 MEZ.

Die Umrechnung der Windstärke von Beaufort in Windgeschwindigkeiten in m/s (V) erfolgt nach der Formel

$$V = 0,834 * \sqrt{Bft^3} + 0,07 \text{ (HÄCKEL 1999).}$$

Die Südwest-Nordost orientierten Mittelgebirgsrücken der Eifel und des Hunsrücks, sowie das in gleicher Richtung verlaufende Moseltal bilden orographische Hindernisse für die anströmenden Luftmassen. Die Station Trier-Petrisberg befindet sich auf einem Höhenrücken in einer frei angeströmten Lage. Dies ist, neben der Höhenlage ca. 130 m über dem Kernstadtbereich im Tal der Mosel, der Grund für die höheren mittleren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur Station Trier-Stadt. Die Station Trier-Stadt zeigt aufgrund der erhöhten Reibungswirkung deutlich geringere Windgeschwindigkeiten; Calmen und Schwachwinde treten häufiger auf (Tabelle 6). Die Abbildungen 8a<sub>p</sub> bis 8c<sub>st</sub> zeigen die Windrichtungs- und Windstärkeverteilung am Untersuchungsstandort, basierend auf den drei Klimaterminwerten der beiden DWD-Stationen für den Zeitraum 1969 bis 1998. An beiden Stationen zeigt sich das durch die regionale Topographie geprägte Windfeld mit den beiden Hauptwindrichtungen NE und SW.

Die Windrosen für die Station Trier-Stadt zeigen hohe Anteile des SW Sektors mit 29,2% zum 21:30 MEZ Termin, bis 33,5% zum 7:30 MEZ Termin, gefolgt von dem NE Sektor mit Anteilen von 19,5% zum 14:30 MEZ Termin, bis 29,4% zum 7:30 MEZ Termin. Neben den beiden dominierenden Hauptwindrichtungen treten an der Station Trier-Stadt zu allen drei Terminen relativ häufig Richtungen im südlichen Sektor auf, während an der Station Trier-Petrisberg vor allem zum 14:30 MEZ Termin die westliche Komponente als dritthäufigste Windrichtung zu beobachten ist.

## 2.2.6 Niederschlag

Die Niederschlagsmessnetze des DWD und des ZIMEN weisen in der Region Trier eine zu geringe Stationsdichte auf, um kleinräumige, durch die Stadt verursachte Unterschiede in der Niederschlagsverteilung nachweisen zu können. Die in den folgenden Auswertungen erkennbaren Unterschiede an den Messstellen Trier-Petrisberg und Trier-Stadt sind nicht als urbane Effekte interpretierbar.

Der Niederschlag ist der am stärksten schwankende meteorologische Parameter. Mittelwerte über einen 30-jährigen Zeitraum weisen nach MALBERG (2002) noch Schwankungen von bis zu 5% auf. Ein wichtiges Charakteristikum des Parameters Niederschlags ist, dass er im Gegensatz zu z.B. der Lufttemperatur weder im Raum- noch Zeitscale eine kontinuierliche Größe ist (LOWRY 1998). Für die Niederschlagsverteilung ist die Orientierung der orographischen Hindernisse, wie die Höhenzüge von Eifel und Hunsrück, relativ zur Hauptwindrichtung besonders wesentlich. Im Luv von Mittelgebirgen tritt durch die orographisch bedingte Hebung verstärkt Wolkenbildung und Niederschlag auf. Im Lee treten geringere Niederschlagsmengen auf. Die Kenntnis von Menge, Andauer und Intensität von Niederschlagsereignissen, sowie über die Häufigkeit von extremen Ereignissen ist für Fragen der Stadtplanung, wie z.B. Dimensionierung von Kanalnetzen, dem Bau von Regenwassersammeleinrichtungen oder von Hochwasserschutzmassnahmen von hoher Relevanz.

Die Abbildung 9 zeigt die Jahressummen des Niederschlags, Abbildung 10 die Abweichung vom jeweiligen langjährigen Jahresmittelwert in Prozent an den beiden Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg. Deutlich ist die hohe Variabilität des Parameters Niederschlag zu erkennen. Die Spannweite der Werte reicht von dem Minimum im Jahre 1996 mit einer Jahressumme von 469 mm an der Station Trier-Stadt und 513 mm an der Station Trier-Petrisberg, bis hin zum Maximum an der Station Trier-Stadt von 1058 mm im Jahr 1981 (1001 mm an der Station Trier-Petrisberg).

Die gleichen Extremjahre identifiziert MÜLLER-WESTERMEIER 2001 in seiner Untersuchung der Klimatrends für Deutschland. Die Ursache der großen interannuellen Variabilität des Niederschlags liegt in der Häufigkeit des Auftretens zyklonaler Großwetterlagen über Mitteleuropa. So bewirken beispielsweise häufig auftretende Westwetterlagen im Winter, die von einem raschen Durchzug atlantischer Tiefausläufer begleitet sind, in der Regel, dass der betreffende Winter mild und niederschlagsreich ist. Die Datenreihen beider Stationen zeigen eine ausgeprägte Doppelwelle im Jahresgang (Abbildung 11) mit hohen Werten in den Monaten Mai bis Juli sowie Oktober bis Januar und niedrigen Werten in den Übergangsjahreszeiten. Der Dezember ist im Mittel mit über 70 mm der niederschlagsreichste Monat im Untersuchungsgebiet.

Untersuchungen von HELBIG (2002) für den Zeitraum 1948/49 bis 1997/98 zeigen für die Station Trier-Petrisberg, dass die Temperaturzunahme in den Wintermonaten zu einer Verminderung des Schneeanteils an den Niederschlägen und somit zu einer Veränderung bei der Hochwasserentstehung mit Konsequenzen für die Hochwasserwahrscheinlichkeit im Moseleinzugsgebiet führt.

Die Trendanalysen der Jahressummen des Niederschlags, für die beiden Stationen in Trier zeigen keine statistisch signifikanten Trends.

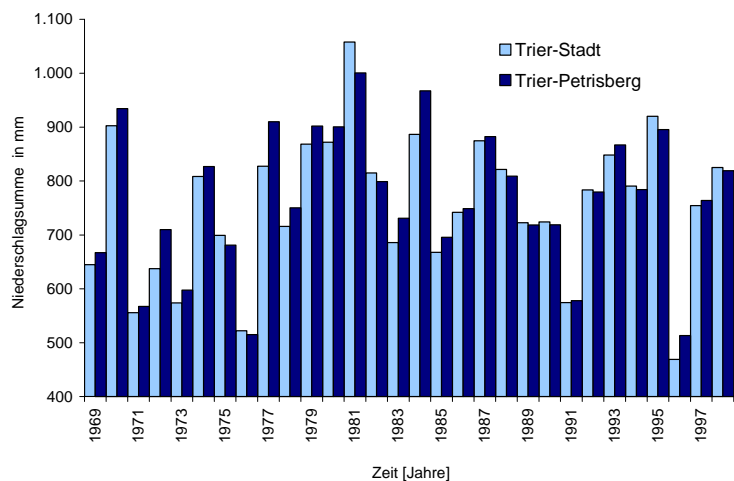


Abbildung 9: Jahressummen des Niederschlags an den Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg, Zeitraum 1969 bis 1998.

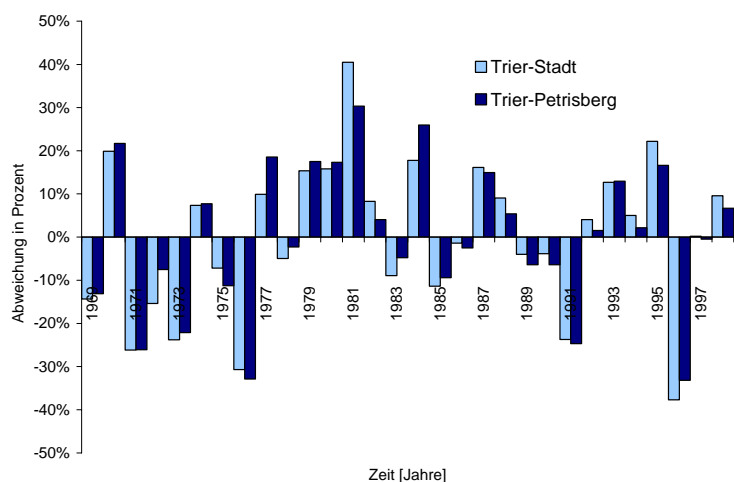


Abbildung 10: Abweichungen vom jeweiligen langjährigen Jahresmittel des Niederschlags in Prozent für die beiden Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg. Mittlere langjährige Jahressumme Trier-Stadt: 753 mm; Trier-Petrisberg: 768 mm, Zeitraum 1969 bis 1998.

Etwas differenzierter stellt sich die Situation bei der Auswertung der Niederschlagssummen der jeweiligen meteorologischen Jahreszeiten dar. Es treten an beiden Stationen positive Trends im Winter (Signifikanzniveau > 80%) auf. Der positive Trend für den meteorologischen Herbst ist nur an der Station Trier-Stadt signifikant (Signifikanzniveau > 98%). Diese Ergebnisse entsprechen den Untersuchungen von SCHÖNWIESE (2003b) für Deutschland und MUF (1997) für Rheinland-Pfalz.

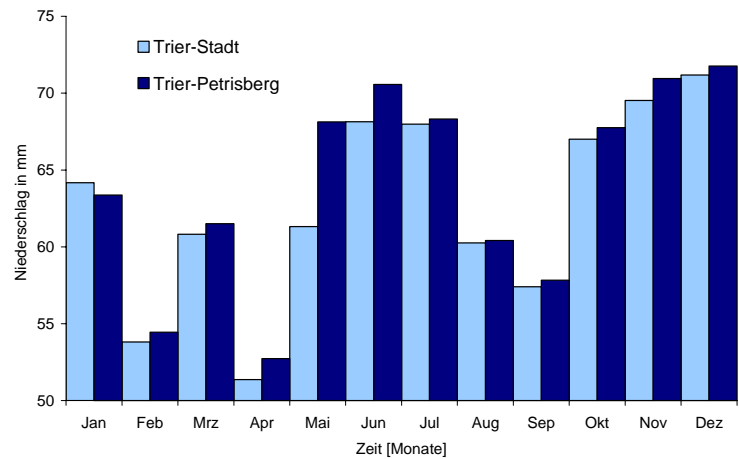


Abbildung 11: Jahrgang der langjährig gemittelten monatlichen Niederschlagssummen an den Stationen Trier-Stadt und Trier-Petrisberg, Zeitraum 1969 bis 1998.

### 3 Lufthygienische Situation – Auswertung der Datenreihen des Zentralen Immissionsmessnetzes von Rheinland-Pfalz (ZIMEN)

#### 3.1 Messnetz und Datenerfassung

Das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz betreibt im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz seit 1978 das Zentrale Immissionsmessnetz - ZIMEN - für Rheinland-Pfalz. Das ZIMEN hat die Aufgabe, in Städten und Waldgebieten des Landes die Luftqualität fortlaufend zu überwachen und die langfristige Entwicklung der Luftschadstoffe zu ermitteln. In Städten mit hohem Verkehrsaufkommen wurden straßennahe Luftmessstationen zur Überwachung der Immissionen des Kfz-Verkehrs eingerichtet. Zusätzlich dient es auch zur Überwachung der Ozonkonzentrationen und damit der aktuellen Information der Bevölkerung über die Überschreitung der Grenzwerte der Ozon-Immissionskonzentrationen. Das ZIMEN besteht derzeit aus 33 Messstationen, die

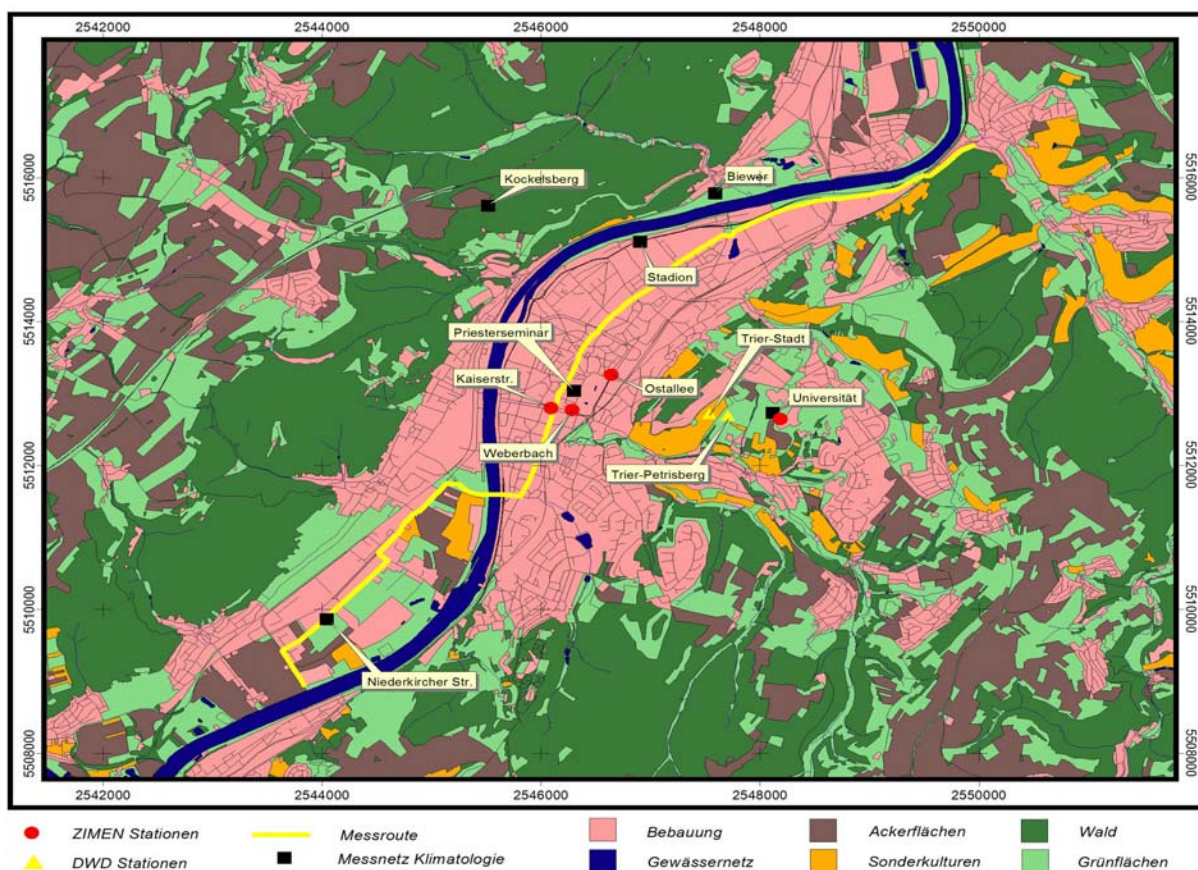


Abbildung 12: Lage der ZIMEN Stationen (rot) und DWD Stationen (gelb).

von einer Messnetzzentrale in Mainz aus betreut werden.

In der Stadt Trier existieren derzeit drei ZIMEN Messstationen, die Stationen Trier-Ostallee, Trier-Kaiserstrasse sowie die Station Trier-Universität. Die Lage der ZIMEN-Stationen im Stadtgebiet ist in Abbildung 12 dargestellt. Die in der Abbildung 12 aufgeführte ZIMEN-Station Trier-Weberbach wurde im



Jahr 1995 zum Standort Trier-Ostallee verlagert. Die in Trier von den drei Stationen erfassten Größen sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Erfasste Komponenten der ZIMEN-Stationen in Trier.

Stationsname	erfasste Komponenten
Trier-Ostallee	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, CO, PM10, Ruß, O <sub>3</sub> , Globalstrahlung, Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlag, Windrichtung, Windgeschwindigkeit
Trier-Kaiserstrasse	NO <sub>2</sub> , NO, Benzol, Toluol, PM10, Ruß
Trier-Universität	O <sub>3</sub>

Nachfolgende Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die verwendeten Messverfahren der Immissionsmessungen.

Tabelle 8: Ausgewählte Schadstoffe und entsprechende Messverfahren des ZIMEN.

Schadstoff	Messverfahren	Hersteller	Gerätetyp	Richtlinie/ Eignungsprüfung
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	UV-Fluoreszenz	Horiba Europa	TE 43 APSA 360	UBA-Testbericht 11/89 /TÜV Rheinland Nr. 936/805008
Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> )	Chemolumineszenz	Horiba Europa	APNA 350 APNA 360	UBA-Testbericht 15/92 UBA-Testbericht 24/96
Stickstoffmonoxid (NO)	Chemolumineszenz	Horiba Europa	APNA 350 APNA 360	UBA-Testbericht 15/92 UBA-Testbericht 24/96
PM <sub>10</sub> / PM <sub>2,5</sub>	radiometrische Massenkonzentrationsbestimmung	Thermo Electron System Frieseke & Höpfner	FH 62 I-R	DIN EN 12341 TÜV Bayern Nr. 24022605 12/00
Ozon (O <sub>3</sub> )	UV-Absorption	Horiba Europa	APOA 350 APOA 360	TÜV Rheinland Nr. 936/809006 TÜV Rheinland Nr. 936/805008

Weitere Informationen zum ZIMEN sowie aktuelle Immissionsmesswerte können unter [www.luft-rlp.de](http://www.luft-rlp.de) abgerufen werden.

## 3.2 Auswertung der Schadstoffmessreihen

### 3.2.1 Stickstoffoxide

#### 3.2.1.1 Stoffeigenschaften

Die Stickstoffoxide sind von lufthygienischer Relevanz. Bei Verbrennungsprozessen wird vorwiegend das nicht toxische Stickstoffmonoxid (NO) emittiert, welches in der Luft zu Stickstoffdioxid oxydiert und den eigentlichen Luftschadstoff darstellt. Der Begriff  $\text{NO}_x$  wird häufig für die Summe aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) verwendet.

Stickstoffmonoxid ist ein farbloses und geruchloses, wenig wasserlösliches Gas, welches mit Sauerstoff zu Stickstoffdioxid reagiert. Stickstoffdioxid ist ein braunrotes, stechend stickig riechendes Gas, welches mit Wasser und Sauerstoff zu Salpetersäure reagiert. Die menschliche Geruchsschwelle liegt zwischen  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .  $\text{NO}_2$  unterliegt im Gegensatz zu anderen Luftschadstoffen, wie z. B.  $\text{SO}_2$  oder Feinstaub, kaum der nassen Deposition.

$\text{NO}_2$  ist ein Reizgas, das aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit relativ weit in die Lunge vordringen kann. Die primäre Wirkung auf den Menschen erfolgt über die Schädigung der Atemwege. Durch Kontakt mit den Schleimhäuten kommt es zur Bildung von salpetriger Säure die zu Verätzungen von Bronchien und Lungenbläschen führen kann. Bei längerer Einwirkung können hohe Konzentrationen zu chronischer Bronchitis oder zu einer Erhöhung der Empfindlichkeit gegenüber Atemwegsinfektionen führen. Konzentrationen ab ca.  $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$  können zu Zellschäden führen.

Die aus dem Stickstoffdioxid gebildete Salpetersäure gelangt durch Regen in den Boden und Gewässer und trägt zu einer Versauerung der Ökosysteme bei (MÖLLER 2003, GUDERIAN 2000).

#### 3.2.1.2 Emittenten

Hauptemissionsquellen für Stickoxide sind Verbrennungsprozesse in Motoren und in Großfeuerungsanlagen der Kraftwerke und der Industrie. Der Hauptanteil der Stickstoffdioxidbelastung mit ca. 60% wird durch den Kraftfahrzeugverkehr verursacht. Als weiterer Emittent ist die Quellgruppe Hausbrand relevant. Auch biogene Stickstoffoxid-Emissionen spielen eine Rolle, da in Böden durch mikrobiologische Prozesse beträchtliche Mengen an NO gebildet und in die Atmosphäre abgegeben werden.

Nach der Emission der Schadstoffe in die Atmosphäre unterliegen diese verschiedenen Transport- und Transformationsprozessen, die sowohl durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der jeweiligen Substanz, als auch durch Umwelteinflüsse wie Lufttemperatur, Feuchtigkeit u. v. a. m. bestimmt werden. Als Immissionen wirken die Schadstoffe auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Oberflächen und werden durch das ZIMEN erfasst.

### 3.2.1.3 Grenzwerte

Die für die Beurteilung der Belastung relevanten Grenzwerte sind in der EU-Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (Amtsblatt EG L 163 S. 41), geändert durch Entscheidung 2001/744/EG der Kommission vom 17.10.2001 (ABI. EG L 278 S. 35) festgelegt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Grenzwerte für Stickoxide gemäß der EU Richtlinie 1999/30/EG.

	Mittelungs- zeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist	Toleranzmarge
<b>1.</b> 1-Stunden-Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	1 Stunde	200 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> dürfen nicht öfter als 18 mal im Kalenderjahr überschritten werden	1. Januar 2010	50% bei Inkrafttreten dieser Richtlinie, lineare Reduzierung am 1. Januar 2001 und alle 12 Monate danach um einen gleichen jährlichen Prozentsatz bis auf 0% am 1. Januar 2010
<b>2.</b> Jahresgrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderja hr	40 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub>	1. Januar 2010	50% bei Inkrafttreten dieser Richtlinie, lineare Reduzierung am 1. Januar 2001 und alle 12 Monate danach bis auf 0% am 1. Januar 2010
<b>3.</b> Jahresgrenzwert für den Schutz der Vegetation	Kalenderja hr	30 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub>	19. Juli 2001	keine

Ähnlich wie bei PM10 ist eine stufenweise Reduzierung der Grenzwerte bis zum Jahre 2010 vorgesehen. Tabelle 10 enthält die Grenzwerte inklusive der Toleranzmarge pro Jahr.

Tabelle 10: Zulässige Toleranzmargen in µg/m<sup>3</sup> für die NO<sub>2</sub>-Grenzwerte.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010
zu 1. (Stundenwert)	250	240	230	220	210	200
zu 2. (Jahreswert)	50	48	46	44	42	40

### 3.2.1.4 NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen

#### Datenauswertung der ZIMEN-Station Trier-Ostallee

Die folgende Datenauswertung bezieht sich auf den zehnjährigen Zeitraum von 1996 bis 2005. Die Daten liegen als Halbstundenwerte vor, und es treten weniger als 10 % Datenausfälle aufgrund von Gerätekalibrierungen oder wirklichen Geräteausfällen auf. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die wichtigsten statistischen Kenngrößen der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen der einzelnen Jahre. Die Jahresmittelwerte der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen schwanken seit dem Jahr 2000 nur geringfügig um

Tabelle 11: Deskriptive Statistik der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen (Halbstundenmittelwerte) in µg/m<sup>3</sup>, Trier-Ostallee, Zeitraum 1996 bis 2005.

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Mittel 96 - 05
Anzahl der Wert	16.094	16.798	17.108	16.913	17.080	17.079	16.014	16.762	16.969	17.123	16.794
Fehlwerte	1.474	770	460	655	488	489	1.554	806	599	445	774
Mittelwert	44	47	47	48	41	42	41	42	41	41	43
Median	45	49	49	50	40	41	40	40	40	39	43
Standardabweichung	18	21	20	20	17	18	18	19	17	18	19
Minimum	2	2	2	5	1	1	3	4	4	4	3
Maximum	139	213	151	158	139	133	137	201	140	147	156
75 Perzentil	58	62	63	64	52	53	53	53	51	52	56
90 Perzentil	69	76	75	76	63	65	65	66	62	64	68
95 Perzentil	77	87	84	84	70	71	73	75	69	73	76
98 Perzentil	88	104	97	94	79	80	83	89	79	83	88

den zukünftigen Grenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup>. Die Maxima und die 98 Perzentile zeigen, dass unter den derzeitigen Bedingungen mit keiner Überschreitung des Kurzzeitgrenzwertes zu rechnen ist.

Dies belegt auch Tabelle 12, in der die Häufigkeit der Immissionskonzentrationen > 150 µg/m<sup>3</sup> dargestellt ist.

Tabelle 12: Absolute Häufigkeit der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen (Halbstundenmittelwerte) >150 µg/m<sup>3</sup> an der ZIMEN Station Trier-Ostallee, Zeitraum 1996 bis 2004.

Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Gesamtergebnis
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	4	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	8
1998	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003	0	0	1	0	0	0	0	1	5	0	0	0	7
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtergebnis	4	1	3	0	0	0	0	3	9	0	0	0	20

Sowohl der Januar 1997 als auch der September 2003, mit vier beziehungsweise fünf Überschreitungen, waren Monate mit überdurchschnittlich hohen Temperaturinversionsereignissen (vgl. Kapitel Inversionshäufigkeit).

Generell ist ein Rückgang der Immissionskonzentrationen im Zeitraum 1996 bis 1999/2000 zu beobachten. Ab diesem Zeitpunkt bleiben die Jahresmittel der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen relativ konstant (Tabelle 11).

Der Verlauf  $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentrationen ist in Abbildung 13 der für den gesamten Auswertzeitraum dargestellt. Lineare Trendanalysen zeigen einen statistisch signifikanten negativen Trend der Monatsmittelwerte (Signifikanzniveau > 98 %).

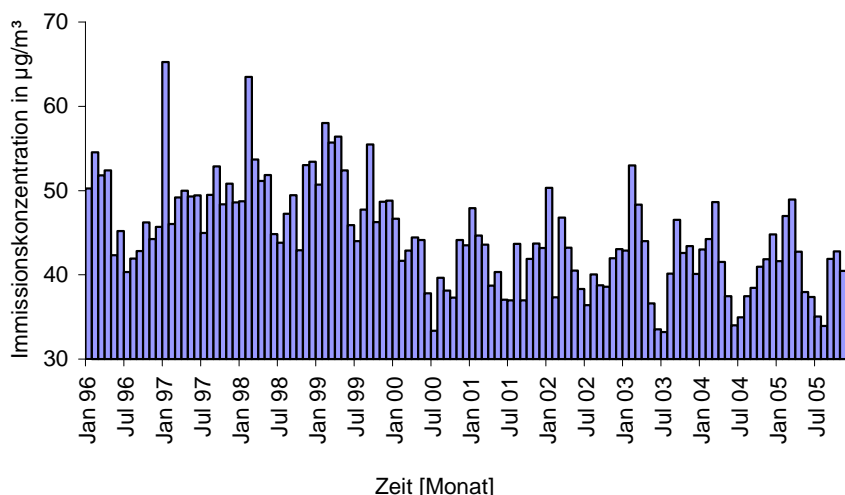


Abbildung 13: Monatsmittel der  $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentrationen, Trier-Ostallee, Zeitraum 1996 bis 2005.

Die  $\text{NO}_2$ -Immissionswerte zeigen einen relativ deutlich ausgeprägten Jahrgang weil bestimmte Schadstoffkomponenten nicht gleichmäßig über das ganze Jahr emittiert werden und das Verdünnungspotential der Atmosphäre in der Regel im Winter geringer als im Sommer ist. Dies hat zur Folge, dass in den Sommermonaten bei den meisten Luftschadstoff-Komponenten mit geringeren Konzentrationen zu rechnen ist als in den Wintermonaten.

Mittels der berechneten Jahres-, Wochen- und Tagesgänge ist es möglich, für einen bestimmten Zeitraum charakteristische Werte der zu erwartenden Immissionskonzentrationen abzuschätzen. Zusätzlich können durch den Vergleich des Verlaufs der charakteristischen

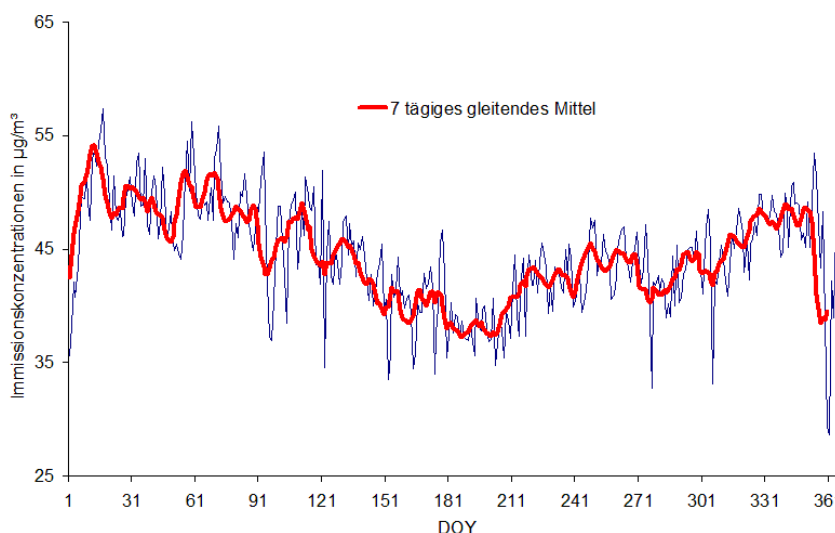


Abbildung 14: Langjährig gemittelter Jahrgang der  $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentrationen aus Tagesmittelwerten, sowie 7 tages gleitendes Mittel (rot), Trier-Ostallee, DOY = day of year (Tage seit Jahresbeginn), Zeitraum 1996 bis 2005.

Immissionskonzentrationen verschiedener Luftschadstoffe Rückschlüsse auf die verschiedenen Quellgruppen gezogen werden. Die in Abbildung 14 dargestellten langjährig gemittelten  $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentrationen zeigen deutlich die geringeren Konzentrationen in den Sommermonaten.

Die lufthygienische Situation in urbanen Räumen wird zum einen durch die ständig wechselnden Witterungsabschnitte mit unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen zum anderen durch die unterschiedliche anthropogene Freisetzung bestimmt.

Die in Abbildung 15 dargestellten mittleren Tagesgänge zeigen in allen Jahreszeiten niedrige Werte während der Nachtstunden und höhere Werte im Laufe des Tages. Ein erstes Maximum tritt in den

Morgenstunden zwischen 7:00 und 9:00 Uhr MEZ, ein zweites etwas höheres in den Abendstunden auf. Dieser Verlauf deutet auf eine Abhängigkeit der Schadstoffimmissionskonzentrationen vom Verkehrsaufkommen hin. Die jahreszeitlichen Unterschiede der NO<sub>2</sub>-Werte sind dagegen nur relativ gering ausgeprägt. Da nur die menschliche Aktivität und die damit verbundenen Emissionen aus Industrie und Verkehr einem periodischem Wechsel unterliegen, müssten die Schadstoffkonzentrationen an Werktagen deutlich höher sein. Abbildung 16 bestätigt diese Annahme. Der langjährig gemittelte Tagesgang der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen ist an Sonntagen deutlich geringer und der steile Anstieg, verursacht durch den morgendlichen Berufsverkehr, fehlt.

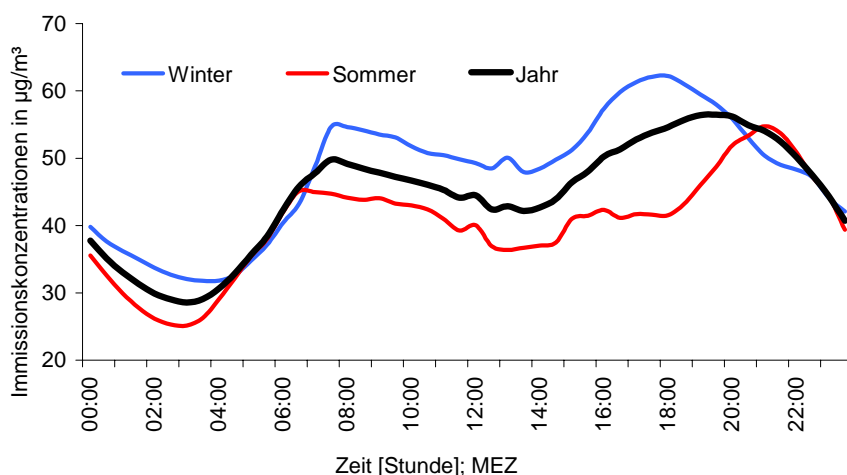


Abbildung 15: Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Ostallee für das gesamte Jahr (schwarz) sowie für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter; Zeitraum 1996 bis 2005.

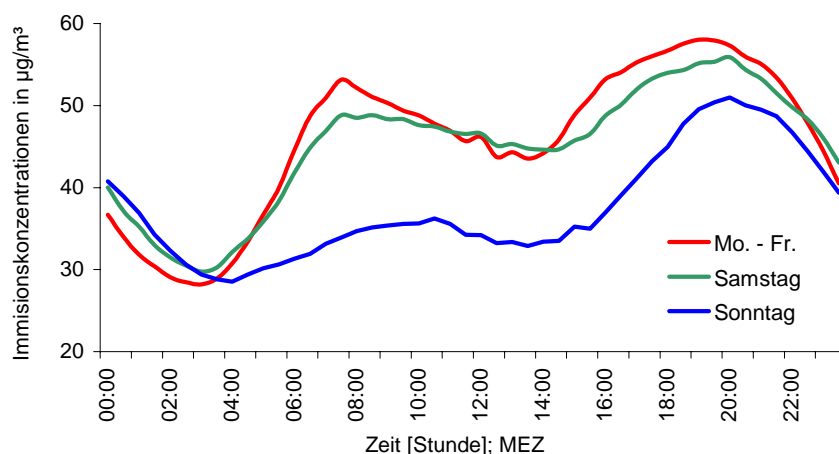


Abbildung 16: Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen für Werktage (Montag bis Freitag), Samstage und Sonntage; ZIMEN Station Trier-Ostallee; Zeitraum 1996 bis 2005.

## Datenauswertung der ZIMEN-Station Trier-Kaiserstrasse

Neben der Station Trier-Ostallee registriert die Station Trier-Kaiserstrasse die NO<sub>2</sub>-Immissionen seit Januar 1998. Tabelle 13 zeigt die wichtigsten statistischen Kenngrößen der Immissionskonzentrationen der einzelnen Jahre, analog zu Tabelle 11.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen (Halbstundenmittelwerte) in µg/m<sup>3</sup>, Trier-Kaiserstrasse, Zeitraum 1998 bis 2005.

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Mittel 96 - 05
Anzahl der Wert	15.240	16.105	16.736	16.206	17.122	17.121	16.571	16.993	16.512
Fehlwerte	2.328	1.463	832	1.362	446	447	997	575	1.056
Mittelwert	46	44	39	41	42	43	40	38	42
Median	48	46	38	40	41	42	39	36	41
Standardabweichung	20	19	16	17	18	19	17	17	18
Minimum	4	5	3	1	2	2	3	3	3
Maximum	165	154	116	132	153	175	142	129	146
75 Perzentil	61	59	49	52	54	54	51	47	53
90 Perzentil	74	72	60	63	66	67	63	60	66
95 Perzentil	83	80	67	70	74	77	70	68	74
98 Perzentil	94	91	76	78	83	89	80	78	84

Sowohl die Mittelwerte als die Perzentile zeigen ähnliche Werte wie die der Station Trier-Ostallee, wobei die absoluten Maxima etwas geringer sind. Somit ist auch für die Station Trier-Kaiserstrasse festzustellen, dass bei gleich bleibenden Bedingungen nur in der Einhaltung des Jahresgrenzwertes Probleme auftreten werden, nicht jedoch bei der Einhaltung des Kurzzeitgrenzwertes.

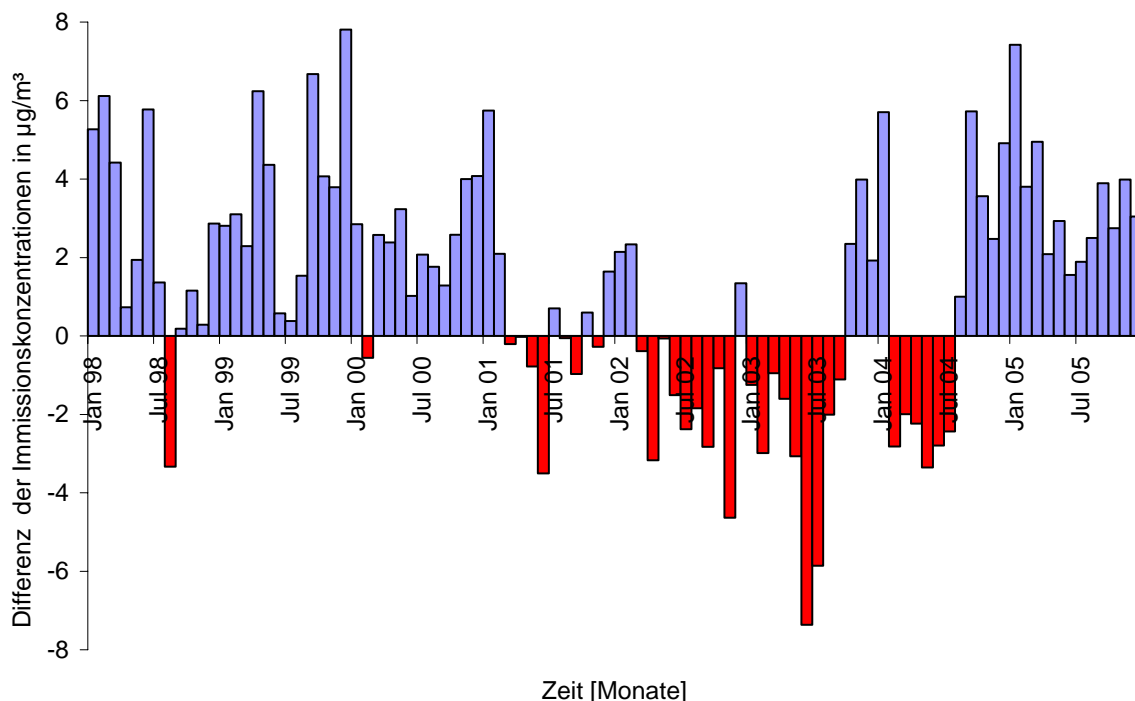


Abbildung 17: Differenz der Monatsmittel der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen in µg/m<sup>3</sup> zwischen der Station Trier-Ostallee und Trier-Kaiserstrasse (Ostallee minus Kaiserstrasse), Zeitraum 1998 bis 2005.

Auch der Verlauf der Monatsmittel an der Station Trier-Kaiserstrasse zeigt einen Rückgang der Schadstoffkonzentrationen bis zum Jahr 2000 und danach gleich bleibende Belastungen. Somit kann ein lokaler Einfluss an einer der beiden Stationen, der diesen Rückgang verursacht, ausgeschlossen werden. Die Abbildung 17 zeigt die Differenzen der Monatsmittel der beiden Stationen. Danach weist die Station Trier-Ostallee im Mittel geringfügig höhere Belastungen auf als die Station Trier-Kaiserstrasse.

Sowohl die mittleren Tagesgänge, gemittelt für die meteorologischen Jahreszeiten, als auch für Werktage, Samstage und Sonntage an der Station Trier-Kaiserstrasse zeigen keine signifikanten Unterschiede zu denen der Station Trier-Ostallee (Abbildung 18 und 19).

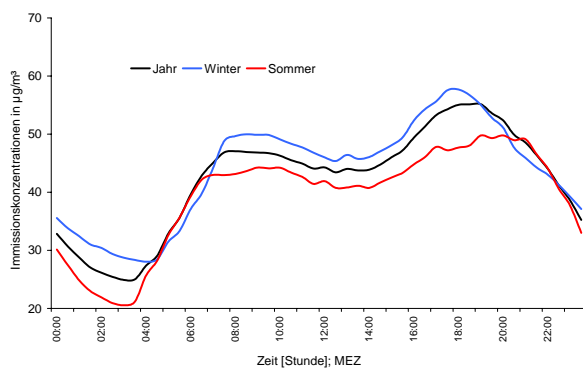


Abbildung 18: Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Kaiserstrasse für das gesamte Jahr, sowie für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter, Zeitraum 1998 bis 2005.

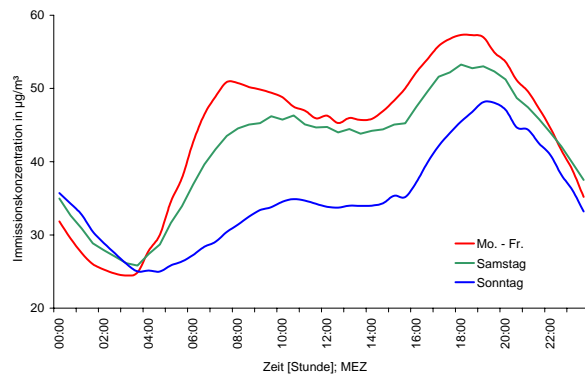


Abbildung 19: Langjährig gemittelte Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen für Werktage, Samstage und Sonntage, ZIMEN Station Trier-Kaiserstrasse, Zeitraum 1998 bis 2005.

### 3.2.2 Feinstaub (PM10)

#### 3.2.2.1 Stoffeigenschaften

Unter dem Begriff Schwebstaub versteht man die in der Atmosphäre suspendierten festen oder flüssigen Schwebstoffe. Diese Schwebstoffe haben keine einheitliche chemische Zusammensetzung und eine breit gefächerte Korngrößenverteilung. Generell wird zwischen folgenden Fraktionen unterschieden.

- Schwebstaub (total suspended particulates, TSP). Als TSP werden diejenigen Partikel bezeichnet, die einen aerodynamischen Durchmesser von bis zu 30µm haben.
- Thorakaler Schwebstaub (thoracic particulates, PM10). Als PM10 werden diejenigen Partikel bezeichnet die einen gröÑenselektierenden Lufteinlass (VDI 1995) passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.
- Alveolengängiger Schwebstaub (respirable particulates, PM2.5). Als PM2.5 werden diejenigen Partikel bezeichnet die einen gröÑenselektierenden Lufteinlass nach ISO 7708 (VDI 1995) passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.



- Ultrafeine Partikel (UP). Als UP werden Teilchen mit einem thermodynamischen Durchmesser < 0,1 µm bezeichnet.

Ausführliche Daten über die chemische Zusammensetzung der Aerosole für verkehrsnahe und ländliche Stationen sind bei KUHLEBUSCH 2002 und WICHMANN ET AL. 2002 zu finden. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf den thorakalen Schwebstaub (PM10), der auch als Feinstaub bezeichnet wird.

Nach aktuellen Angaben der Weltgesundheitsorganisation bewirkt die derzeit vorherrschende Feinstaub-Konzentration eine Verkürzung der durchschnittlichen Lebenserwartung von 8,6 Monaten in der EU und 10,2 Monaten in Deutschland (WHO 2004).

Eine Zunahme des Tagesmittelwertes der PM10-Partikelmasse in der Außenluft um 10 µg/m³ führt demnach zu einem Anstieg der Mortalität um 0,7 %, einer Zunahme von Krankenhauseinweisungen wegen Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen um 0,8 % sowie einer Erhöhung des Medikamentenverbrauchs bei Asthmatikern um 3,4 % (ATKINSON ET AL. 2001, WHO 2004). Weitere Informationen über Mortalitäts- und Morbiditätseffekte sind unter anderem bei DOCKERY ET AL. 1993, SAMET ET AL. 2000, KREWSKI ET AL. 2000 sowie POPE ET AL. 2002 zu finden.

### 3.2.2.2 Emittenten

Hinsichtlich der Emission wird bei der PM10-Fraktion zwischen primären und sekundären Partikeln unterschieden. Während primäre Aerosolpartikel direkt aus Schadstoffquellen emittiert werden, werden die sekundären Partikel in der Atmosphäre erst in Folgereaktionen, wie z.B. homogene Nukleation oder „gas to particle conversion“ aus gasförmigen Luftschadstoffen sekundär gebildet (MÖLLER 2003).

Sowohl die primären als auch die sekundären Partikel können natürliche und anthropogene Quellen haben. Die anthropogenen Partikel stammen entweder direkt aus Verbrennungsprozessen oder werden durch

Tabelle 14: Staubemissionen aus den verschiedenen Quellgruppen für das Jahr 1996 in Deutschland (UBA 2005).

Quellgruppe	Gesamtstaub		PM <sub>10</sub>				> PM <sub>10</sub>			
	Emissionen		Anteil am Gesamtstaub		Emissionen		Anteil Quellgruppen		Emissionen	
	2000 (in kt)	2002 (in kt)	2000 (in %)	2002 (in %)	2000 (in kt)	2002 (in kt)	2000 (in %)	2002 (in %)	2000 (in kt)	2002 (in kt)
<b>Deutschland gesamt</b>	<b>227</b>	<b>209</b>	<b>65,7</b>	<b>64,4</b>	<b>148,8</b>	<b>134,6</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>77,8</b>	<b>74,4</b>
<b>Verbrennungsbedingte Emissionen einschließlich Verkehr</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>98,3</b>	<b>98,1</b>	<b>78,2</b>	<b>69,1</b>	<b>52,6</b>	<b>51,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>
davon: Verkehr <sup>1)</sup>	43	35	100	100	43	34,8	28,9	25,9	0	0
<b>Sonstige Emissionen</b>	<b>147</b>	<b>139</b>	<b>48</b>	<b>47,3</b>	<b>70,6</b>	<b>65,5</b>	<b>47,4</b>	<b>48,7</b>	<b>76,4</b>	<b>73</b>
Industrieprozesse	103	95	60	60	61,8	56,7	41,5	42,1	41,2	37,8
Schüttgutumschlag	44	44	20	20	8,8	8,8	5,9	6,5	35,2	35,2

<sup>1)</sup> ohne folgende nicht verbrennungsbedingte Emissionen: Reifenabrieb (geschätzte Emissionen 70 kt/a, davon PM10-Fraktion knapp 10 %, Emission von der Straßenoberfläche (erheblicher PM10 Anteil) und der Bremsabrieb (5,5 – 8,5 kt/a, im wesentlichen PM10))

mechanischen Abrieb erzeugt. Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Staubemissionen verschiedener Quellgruppen für Deutschland (UBA 2005).

Innerhalb der Stadt Trier existiert eine Vielzahl von PM10-Quellen, wie Kfz-Verkehr, Industrieanlagen, Hausbrand oder Transport und Umschlag von Schüttgut. Des Weiteren spielt der Beitrag des Ferntransportes eine nicht unerhebliche Rolle. Nur wenn die verschiedenen Quellen und ihre jeweiligen individuellen Emissionsraten bekannt sind, ist es möglich, in Verbindung mit den Ergebnissen der lokalen Immissionskonzentrationsentwicklung in Trier sinnvolle und nachhaltige Minderungsstrategien zu entwickeln.

### 3.2.2.3 Grenzwerte

Die für die Beurteilung der Belastung relevanten Grenzwerte sind in der EU-Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (Amtsblatt EG L 163 S. 41), geändert durch Entscheidung 2001/744/EG der Kommission vom 17.10.2001 (ABl. EG L 278 S. 35) festgelegt (Tabelle 15).

Tabelle 15: Grenzwerte für Partikel (PM10) nach der EU Richtlinie 1999/30/EG ohne Toleranzmargen.

	Mittelungs- zeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist
1. 24-Stunden Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 h	50 µg/m <sup>3</sup> PM10 dürfen nicht öfter als 35 mal im Jahr überschritten werden	1. Januar 2005
2. Jahresgrenzwert	Kalenderjahr	40 µg/m <sup>3</sup> PM10	1. Januar 2005

### 3.2.2.4 PM10 Immissionskonzentration

#### Datenauswertung der ZIMEN-Station Trier-Ostallee

PM10 Immissionskonzentrationen werden seit dem 1.1.2001 an der Station Trier-Ostallee erfasst. Die folgende Datenauswertung bezieht sich deshalb auf den fünfjährigen Zeitraum von 2001 bis 2005. Die Daten liegen als Stundenwerte vor und es treten weniger als 10 % Datenausfälle aufgrund von Gerätekalibrierungen oder wirklichen Geräteausfällen auf. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die wichtigsten statistischen Kenngrößen der PM10-Immissionskonzentrationen der einzelnen Jahre.

Tabelle 16: Deskriptive Statistik der PM10-Immissionskonzentrationen (Stundenmittelwerte) in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Trier-Ostallee, Zeitraum 2001 bis 2005.

	2001	2002	2003	2004	2005	Mittel 96 - 05
Anzahl der Wert	8.151	8.133	8.588	8.181	8.664	8.343
Fehlwerte	633	651	196	603	120	441
Mittelwert	34	31	32	30	30	31
Median	30	26	28	27	27	28
Standardabweichung	19	19	18	19	16	18
Minimum	1	1	1	1	1	1
Maximum	167	324	132	454	209	257
75 Perzentil	43	39	42	39	38	40
90 Perzentil	57	55	56	54	51	55
95 Perzentil	68	68	66	65	61	66
98 Perzentil	84	85	78	81	74	80

Die Jahresmittelwerte der PM10-Immissionskonzentrationen liegen im Bereich zwischen  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Eine Überschreitung des gültigen Jahresgrenzwertes von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ist

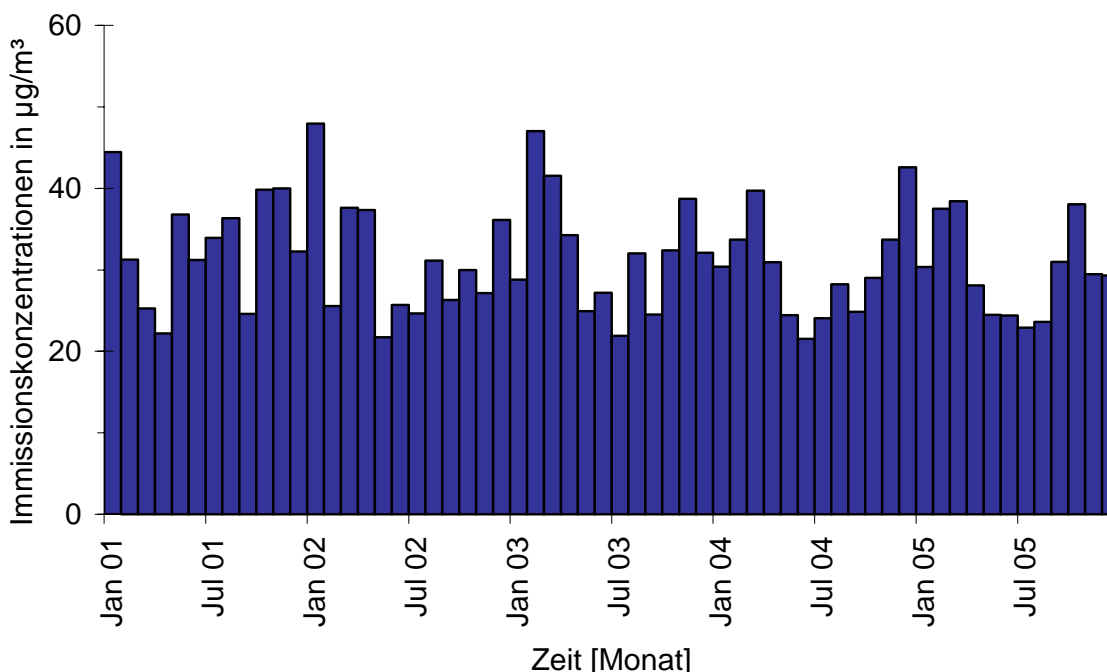


Abbildung 20: Monatsmittel der PM10-Immissionskonzentrationen, Trier-Ostallee, Zeitraum 2001 bis 2005.

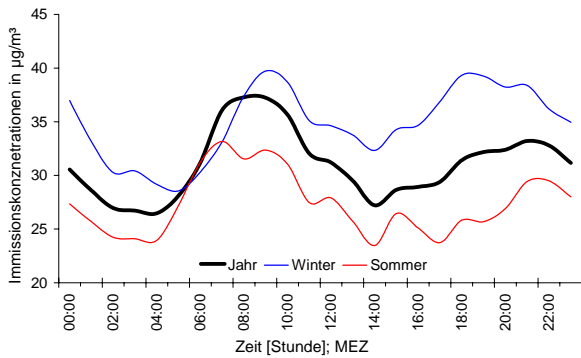


Abbildung 21: Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM10-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Ostallee für das gesamte Jahr sowie für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter, Zeitraum 2001 bis 2005.

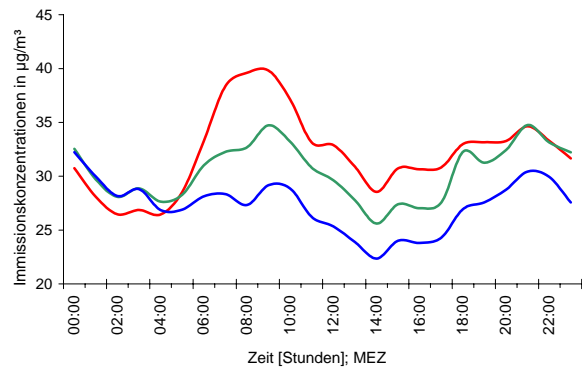


Abbildung 22: Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM10-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Ostallee für Werktage (Montag bis Freitag), Samstage und Sonntage, Zeitraum 2001 bis 2005.

unter den derzeitigen Bedingungen nicht zu erwarten. Abbildung 20 zeigt den Verlauf der Monatsmittel der PM10-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Ostallee. Die Monatsmittel zeigen keinen statistisch signifikanten Trend, jedoch ist ein Jahresgang der PM10-Konzentrationen mit deutlich höheren Belastungen im Winter zu erkennen.

Da der Kfz-Verkehr ein Hauptverursacher der PM10-Belastung ist, folgen die langjährig gemittelten Tagesgänge dem täglichen Verkehrsaufkommen (Abbildungen 21 und 22). Die höheren Belastungen in den Wintermonaten sind auf die zusätzlichen Emissionen aus der Heiztätigkeit bei tiefen Lufttemperaturen zurückzuführen. Im Gegensatz zu dem jahresbezogenen Grenzwert

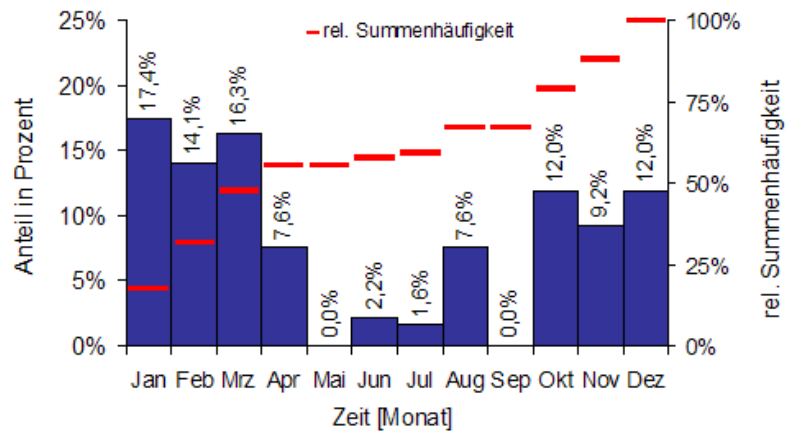


Abbildung 23: Mittlere relative Anzahl der Überschreitungen des 24h-Grenzwertes pro Monat und relative Summenhäufigkeit an der Station Trier-Ostallee. N = 184. Zeitraum 2001 bis 2005.

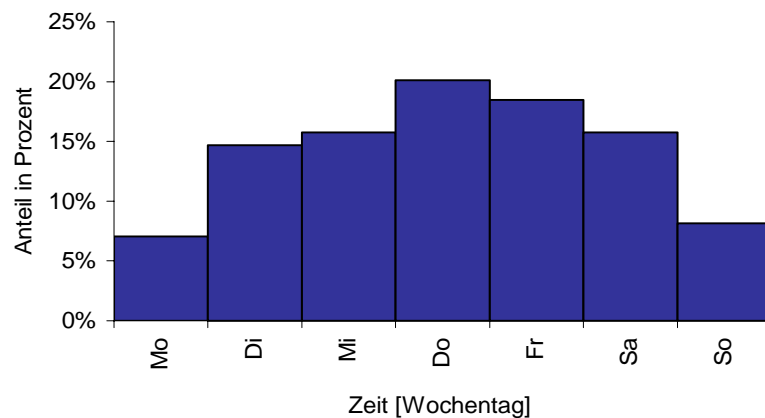


Abbildung 24: Mittlere relative Anzahl der Überschreitungen des 24h-Grenzwertes je Wochentag an der Station Trier-Ostallee, N = 184, Zeitraum 2001 bis 2005.

ist bei dem 24h-Grenzwert in Zukunft mit Überschreitungen der zulässigen 35 Tage mit Tagesmittelwerten > 50 µg/m<sup>3</sup> zu rechnen. Abbildung 23 zeigt die relative Anzahl der Überschreitungen des tagesbezogenen Grenzwertes für jeden Monat. In dem Zeitraum Dezember bis März treten rund 60 % der Überschreitungen auf. Die Überschreitungen des Tagesgrenzwertes zeigen auch einen deutlichen Wochengang (Abbildung 24). Die geringste Anzahl an Überschreitungen ist im Mittel nicht wie erwartet an Sonntagen sondern montags festzustellen. Dies könnte auf die durchschnittlich geringere Vorbelastung durch den an Sonntagen reduzierten Kfz-Verkehr zurückzuführen sein.

**Datenauswertung der ZIMEN-Station Trier-Kaiserstrasse**

Analog zur Analyse der Station Trier-Ostallee zeigen die Auswertungen die PM10 Belastungssituation seit

Tabelle 17: Deskriptive Statistik derPM10-Immissionskonzentrationen (Stundenmittelwerte) in µg/m<sup>3</sup>, Trier-Kaiserstrasse, Zeitraum 2001 bis 2005

	2001	2002	2003	2004	2005	Mittel 96 - 05
Anzahl der Wert	8.691	8.713	8.747	8.479	8.572	8.640
Fehlwerte	93	71	37	305	212	144
Mittelwert	29	31	33	29	27	30
Median	25	26	29	25	24	26
Standardabweichung	18	17	19	17	15	17
Minimum	1	1	1	1	1	1
Maximum	213	316	334	266	132	252
75 Perzentil	36	37	43	37	3.535	738
90 Perzentil	49	51	58	50	47	51
95 Perzentil	59	62	69	60	56	61
98 Perzentil	75	77	82	74	67	75

Januar 2001 an der ZIMEN Station Trier-Kaiserstrasse. Die Datenausfälle liegen unterhalb 5 %. Tabelle 17 zeigt die wichtigsten statistischen Kenngrößen der Immissionskonzentrationen der einzelnen Jahre, analog zu Tabelle 16.

Die Jahresmittelwerte der PM10-Immissionskonzentrationen liegen geringfügig unter denen der Station Trier-Ostallee. Somit ist auch an der Station Trier-Kaiserstrasse bei unveränderten Bedingungen nicht mit Überschreitungen des Jahresgrenzwertes von 40 µg/m<sup>3</sup> zu rechnen. Die Monatsmittel der PM10 Immissionskonzentrationen zeigen wie die der Station Trier-Ostallee keinen

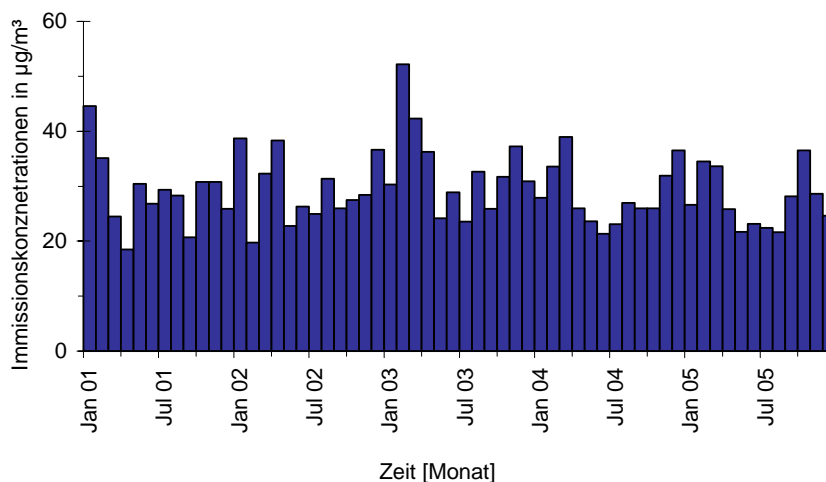


Abbildung 25: Monatsmittel der PM10 Immissionskonzentrationen, Trier-Kaiserstrasse, Zeitraum 2001 bis 2005

statistisch signifikanten Trend. Die Unterschiede der Monatsmittel der beiden Stationen liegen im Mittel bei nur 2 µg/m<sup>3</sup> (Maximaler Unterschied von 9.2 µg/m<sup>3</sup> im November 2001).

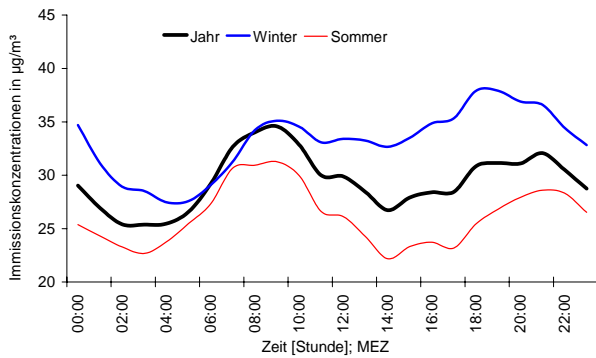


Abbildung 26: Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM10-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Kaiserstrasse für das gesamte Jahr, sowie für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter, Zeitraum 2001 bis 2005.

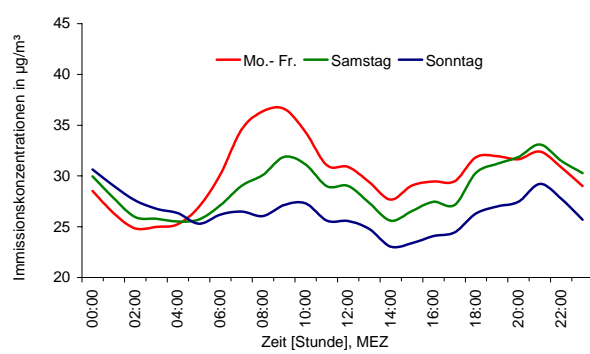


Abbildung 27: Langjährig gemittelte Tagesgänge der PM10-Immissionskonzentrationen für Werktagen (Montag bis Freitag), Samstage und Sonntage; ZIMEN Station Trier-Kaiserstrasse, Zeitraum 2001 bis 2005.

Die Kurven der gemittelten Tagesgänge (Abbildung 26) zeigen ein ähnliches Bild wie für die Station Trier-Ostallee. Unterschiede sind nur im Winter zu erkennen. Während an der Station Trier-Ostallee beide Peaks annähernd gleich hoch ausfallen, ist an der Station Trier-Kaiserstrasse der zweite Peak zwischen 18:00 und 20:00 Uhr MEZ deutlich höher. Die Variationen der PM10-Immissionskonzentrationen zwischen Werktagen und dem Wochenende (Abbildung 27) an der Station Trier-Kaiserstrasse ähneln denen der Station Trier-Ostallee.

Die Verteilung der Tage mit Überschreitungen des Tagesgrenzwertes von 50 µg/m³ zeigt ein ähnliches Muster wie die Station Ostallee. Im Zeitraum von Dezember bis März treten fast 70 % der Überschreitungen auf.

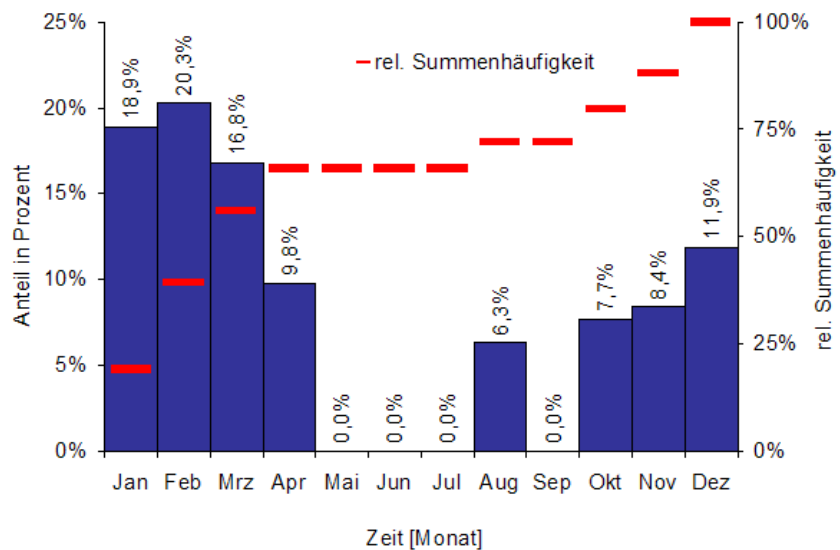


Abbildung 28: Mittlere relative Anzahl der Überschreitungen des 24h-Grenzwertes pro Monat und relative Summenhäufigkeit an der Station Trier-Kaiserstrasse, N = 143, Zeitraum 2001 bis 2005.

### 3.2.2.5 Bemerkungen zur Staubfraktion PM2.5

In Zukunft ist mit einer Einführung eines Grenzwertes für die alveolengängige Schwebstaubfraktion PM2.5 Fraktion zu rechnen. Die in der Stadt Trier gelegenen ZIMEN-Stationen verfügen derzeit noch nicht über geeignete Messgeräte, um diese noch kleinere Staubfraktion zu erfassen. Deshalb werden hier nur einige allgemeine Anmerkungen zu der PM2.5 Belastung gemacht.

Bei der PM2.5 Fraktion sind prinzipiell ähnliche Konzentrationsabstufungen zwischen den verschiedenen Stationskategorien (Stadt, Verkehr, Wald) zu erwarten. Generell fallen die Konzentrationsunterschiede bei PM2.5 jedoch geringer aus. Dies beruht auf der Tatsache, dass der Anteil des sekundär gebildeten Aerosols bei PM2.5 wesentlich höher und damit der Anteil des lokal erzeugten Aerosols geringer ist als bei PM10.

Nach Angaben in der Literatur liegt das Verhältnis von PM2.5 zu PM10 im Allgemeinen bei ca. 0,8 bis 0,9. An industriell beeinflussten Messpunkten, je nach Art des industriellen Prozesses, ist der PM2.5 Anteil auch etwas geringer (ARBEITSGRUPPE WIRKUNG FEINSTAUB 2006). Untersuchungen der PM2.5 und PM10 Messungen an den Stationen Mainz-Zitadelle und Pfälzerwald-Hortenkopf zeigen für Mainz ein Verhältnis von 0,69 und für die Waldstation ein Verhältnis von 0,71.

### 3.2.3 Ozon (O<sub>3</sub>)

Bei der Betrachtung von Ozonkonzentrationen muss grundsätzlich zwischen stratosphärischem und troposphärischem Ozon unterschieden werden.

- In der Stratosphäre (10 km bis 50 km Höhe) stellt Ozon einen natürlichen Bestandteil der Luft dar. Die so genannte Ozonschicht (Höhenbereich 20 km - 30 km) bildet einen Schutz gegen die energiereiche UV-Strahlung.
- In der Troposphäre wirkt Ozon hingegen als Schadgas mit negativen Auswirkungen auf die Organismen. Ein Teil des Ozons wird durch Transportvorgänge von der Stratosphäre in die Troposphäre verbracht, ein anderer Teil wird aus Vorläufersubstanzen gebildet. Diese Substanzen sind entweder natürlich vorhanden oder gehen auf anthropogene Emissionen zurück.

Die Stationen des ZIMEN erfassen das bodennahe Ozon.

#### 3.2.3.1 Stoffeigenschaften

Ozon ist ein blaues, schlecht wasserlösliches Gas und wird bereits in sehr hoher Verdünnung wahrgenommen. Die Wahrnehmungsgrenze liegt zwischen bei 40 µg/m<sup>3</sup> bis 50 µg/m<sup>3</sup>. Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel und reagiert mit allen anderen oxidierbaren Stoffen. Als toxisches Reizgas schädigt es primär die menschliche Lunge. Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit dringt Ozon bis tief in die Lungen ein und schädigt die Lungenoberflächen. Schätzungsweise 10 % bis 15 % der Bevölkerung reagieren besonders empfindlich auf Ozon. Ab ca. 200 µg/m<sup>3</sup> kann es zu Befindlichkeitsstörungen, wie Augentränen und Kopfschmerzen kommen. Höhere Konzentrationen über 240 µg/m<sup>3</sup> können die physische Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Die Intensität der gesundheitlichen Folgeerscheinungen ist abhängig von Höhe und Dauer der Exposition sowie von der körperlichen Aktivität (UMWELTBUNDESAMT 2003A, UMWELTBUNDESAMT 2003B)

Die oxidative Wirkung von Ozon auf Pflanzen führt zu Schädigungen der Zellstruktur des Pflanzengewebes. Erste Schadsymptome können bereits bei Ozonkonzentrationen ab  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auftreten. Eine Folgewirkung ist die Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums, wodurch zum Beispiel die Produktivität landwirtschaftlicher Nutzpflanzen verringert wird. Einige Pflanzenarten, wie zum Beispiel Tabak, reagieren besonders empfindlich auf Ozon und können daher als Bioindikatoren zum qualitativen Nachweis einer Ozonbelastung verwendet werden (MÖLLER 2003, GUDERIAN 2000).

### 3.2.3.2 Emittenten

Ozon wird nicht primär emittiert, sondern unter dem Einfluss intensiver solarer Strahlung aus den Vorläufersubstanzen Stickstoffoxide und Kohlenwasserstoffe gebildet. Stickstoffoxid Emissionen ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) gehen auf die Quellgruppen Kfz-Verkehr, Industrie, Gebäudeheizung sowie auf biogene Quellen zurück. Die Höhe der Ozonkonzentration in der bodennahen Troposphäre ergibt sich aus einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Ozon bildenden und Ozon abbauenden Reaktionen. Da Ozon durch Stickstoffmonoxid abgebaut wird, liegen die Ozon-Immissionskonzentrationen in städtischen Gebieten häufig niedriger als in ländlichen Standorten, die aufgrund des geringeren Kfz-Verkehrs geringere  $\text{NO}$ -Werte aufweisen.

### 3.2.3.3 Grenzwerte

Die für die Beurteilung der Belastung relevanten Grenzwerte sind in der EU-Richtlinie 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Februar 2002 über den Ozongehalt der Luft (3. Tochterrichtlinie) (ABl. EG, L 67 S. 14) festgelegt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Grenzwerte für Ozon nach der EU Richtlinie 1999/30/EG ohne Toleranzmargen.

	Parameter	Zielwert für 2010
Zielwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Höchster 8-Stunden-Mittelwert eines Tages	$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ darf an höchstens 25 Tagen pro Kalenderjahr überschritten werden, gemittelt über 3 Jahre
Zielwert für de Schutz der Vegetation	AOT40, berechnet aus 1-Stunden-Mittellwerten von Mai bis Juli	$18.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemittelt über 5 Jahre.

Des Weiteren gilt als Informationsschwellenwert die Immissionskonzentration von  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  innerhalb einer Stunde und als Alarmschwelle die Immissionskonzentration von  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Stundenmittel.

### 3.2.3.4 Datenauswertung der ZIMEN-Station Trier-Universität

Die ZIMEN Station Trier-Universität misst seit Mitte Mai 2000 kontinuierlich die Ozon-Immissionskonzentrationen außerhalb des Innenstadtbereichs. Die Messreihen der Station Trier-Ostallee (Ozon-Messung März 2003 eingestellt) werden bei den Auswertungen nicht berücksichtigt, da durch die Kfz-



bedingten, erhöhten NO-Emissionen das vorhandene Ozon stark reduziert wurde. Der Standort entspricht nicht den Kriterien der EU-Richtlinie (außerhalb des Einflussbereichs örtlicher Emissionsquellen wie

Tabelle 19: Deskriptive Statistik der Ozon-Immissionskonzentrationen (Halbstundenwerte) in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Trier-Universität, Zeitraum Mai 2000 bis Dezember 2005.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Mittel 96 - 05
Anzahl der Wert	10.711	16.971	17.139	16.421	16.122	16.946	15.718
Fehlwerte	6.857	597	429	1.147	1.446	622	1.850
Mittelwert	51	49	52	57	50	55	52
Median	49	47	51	53	49	51	50
Standardabweichung	30	31	31	38	32	33	33
Minimum	1	1	1	1	1	1	1
Maximum	175	182	193	240	183	219	199
75 Perzentil	67	64	71	77	69	72	70
90 Perzentil	90	86	91	109	90	96	94
95 Perzentil	108	104	105	128	106	117	111
98 Perzentil	123	130	122	155	130	140	133

0:00 Uhr und 8:00 Uhr MEZ (Abbildung 30). Hingegen ist die Konzentration des Ozons bei Sonnenhöchststand und ein bis zwei Stunden danach am höchsten.

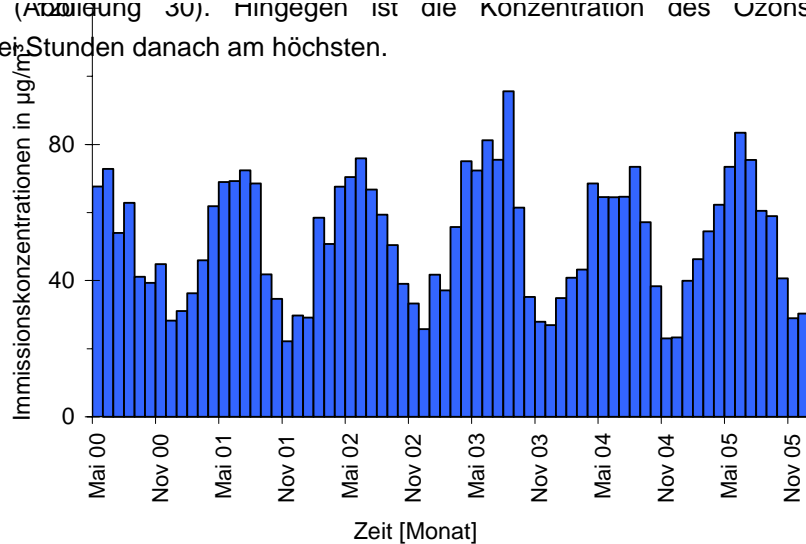


Abbildung 29: Monatsmittel der Ozon-Immissionskonzentrationen, Trier-Universität, Zeitraum 2000 bis 2005.

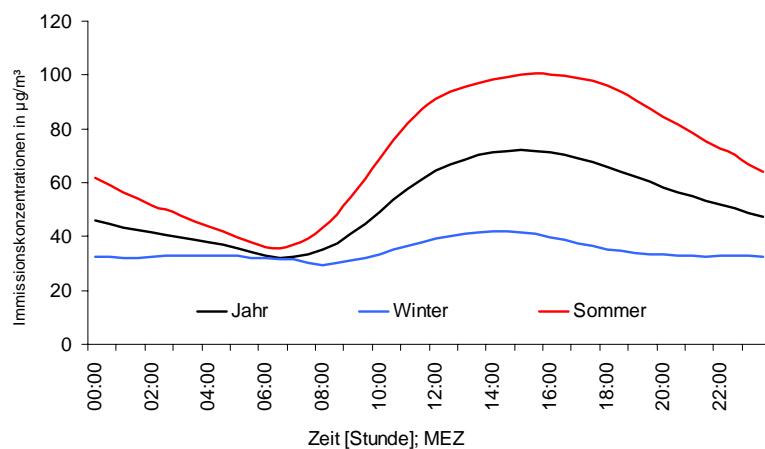


Abbildung 30: Langjährig gemittelte Tagesgänge der Ozon-Immissionskonzentrationen an der Station Trier-Universität für das gesamte Jahr, sowie für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer und Winter, Zeitraum 2001 bis 2005.

Im Untersuchungszeitraum wurde der Schwellenwert von  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Stundenmittelwert zur Auslösung der Informationspflicht nur an drei einzelnen Monaten erreicht:

- August 2003, 32 Stunden mit Werten  $> 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Juni 2005, 19 Stunden mit Werten  $> 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Juli 2005, 12 Stunden mit Werten  $> 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Ozon-Immissionskonzentrationen bezüglich der Alarmschwelle ( $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) wurden im gesamten Zeitraum an der Station Trier-Universität nicht erreicht. Das in Tabelle 17 angegebene Maximum im Jahr 2003 von  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bezieht sich nur auf einen Halbstundenmittelwert.

Hinsichtlich der in der EU Richtlinie 2002/3/EG definierten Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Vegetation ist unter den derzeit gemessenen Ozon-Immissionskonzentrationen mit Überschreitungen von beiden Grenzwerten zu rechnen.

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

### 4.1 Geländehöhe

Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Berechnung des Wind- und Temperaturfeldes wurde aus den Daten des ATKIS DGM5 (Digitales Geländemodell in einer Gitterweite 12,5 m x 12,5 m) (STADT Trier 2005) ein einheitliches Höhenmodell für den Untersuchungsraum generiert. Die Zellengröße des erzeugten Modelleingangsrasters beträgt im Außenbereich 100 m sowie 25 m im Kernbereich. Den höchstgelegenen Geländepunkt im Untersuchungsraum markiert der Galgenwild mit 436 m Meereshöhe südlich des Stadtteils Irsch. Damit ergibt sich, ausgehend vom Moseltal (ca. 130 m ü. NN), eine Höhendifferenz etwa 300 m. Das Untersuchungsgebiet umfasst insgesamt eine Fläche von etwa 257 km<sup>2</sup>.

### 4.2 Nutzungsstruktur

Die Landnutzungsinformationen wurden von der Stadt Trier bereitgestellt (STADT TRIER 2005). Für deren Aufbereitung konnte auf mehrere Datenquellen zurückgegriffen werden:

- ALK (Nutzung) – Siedlungsraum und Straßen
- Offenlandkartierung zur Landschaftsplanung – Offenland
- ATKIS Basis-DLM – Wälder und Offenland (Prio. 2)
- Biotoptypenkartierung Eurener Flur – lokal
- Biotoptypenkartierung Petrisberg – lokal
- Biotoptypenkartierung Tarforster Plateau/Irsch – lokal
- Digitale Orthophotos des Jahres 2006

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, 15-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 20 zeigt die typischen Versiegelungs- und Strukturhöhen je Nutzungskategorie:

<b>Nutzungsstruktur</b>	<b>Mittlerer Versiegelungsgrad (%)</b>	<b>Mittlere Strukturhöhe (m)</b>
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
11 Laubwald	5	12,5
12 Nadelwald	5	12,5
13 Mischwald	5	12,5
14 Gewässer	0	0
15 Rebflächen	5	1,5

Tabelle 20: 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.

## 5. Methodik der Modellrechnungen

### 5.1 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 verschieden 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 Trier 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-, -Modell (RODI 1980) bestimmt. Dabei bezeichnet  $\epsilon$ , 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  $\Delta x$  betragen 100 m im Außenbereich bzw. 25 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  $\Delta z$  immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich der Menschen).

## 5.2 Synoptische Rahmenbedingungen für die Modellrechnung

Die Ermittlung des *Jahresmittelwertes* einer Schadstoffkomponente durch eine Ausbreitungsrechnung erfordert die Verwendung einer geeigneten Windstatistik (AKS). So ist gewährleistet, dass die den langfristigen meteorologischen Verhältnissen angemessenen Parameter wie Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten Eingang finden. Für die Station Trier-Petrisberg wurde die Ausbreitungsklassenstatistik für die Jahre 2001 bis 2007 herangezogen. Die AKS enthält eine dreidimensionale Statistik, welche aus 6 Ausbreitungsklassen sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit besteht. Damit ist eine repräsentative Erzeugung des Strömungs- und Immissionsfelder gewährleistet.

Neben dem Jahresmittelwert für Stickstoffdioxid wurden auch die Immissionen für eine austauscharme Wetterlage modelliert. 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.

## 5.3 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 vorliegende Untersuchung wurden die Verkehrsmengen des Hauptstraßennetzes für den Analysefall 2005 sowie den Prognose-0-Fall 2020 vom Verkehrsgutachter IVV bereit gestellt (IVV 2005, IVV 2009).

## 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<sub>x</sub>)
- Feinstaub (PM<sub>10</sub>)

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 Jahr 2005 (Analysesituation) 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 (PM<sub>10</sub>) lassen sich in motorbedingt sowie nicht motorbedingt untergliedern. Verursacher der PM<sub>10</sub>-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.



#### 5.4 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 Trier beinhaltet, wurde ein 25 m Raster verwendet. Im Außenbereich des Stadtgebietes, welches eine weniger differenzierte Bebauung aufweist, ging das 25 m Raster (roter Rahmen) in ein 100 m Raster (blauer Rahmen) über (s. Abb. 31). Die Ausbreitungsfelder der verkehrsbedingten Luftschadstoffe wurden ebenfalls in den beschriebenen Rastergrößen berechnet. Die Gesamtgröße des Untersuchungsraums beträgt ca. 257 km<sup>2</sup>.

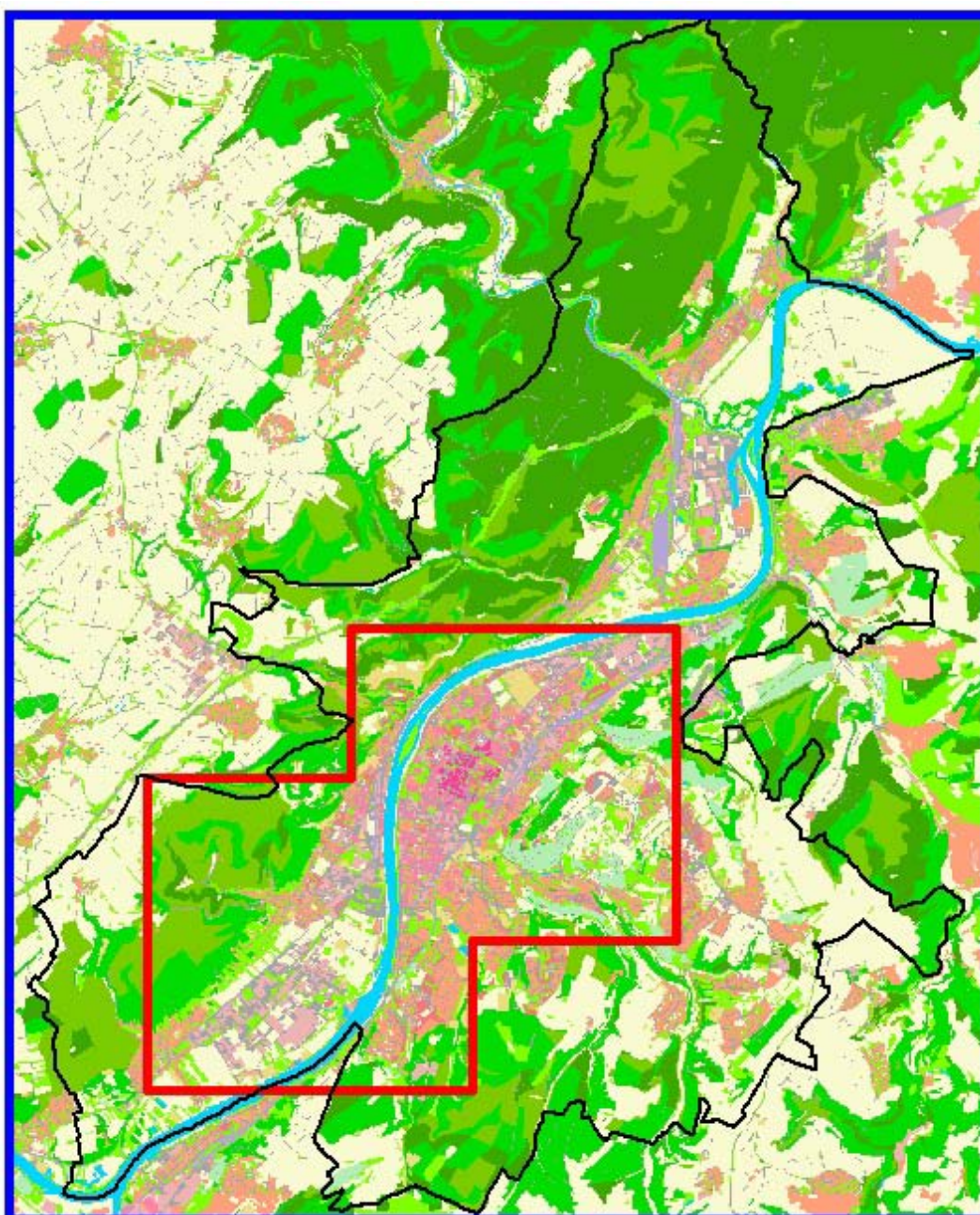


Abbildung 31: Rechengebiete Klimaökologie

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. Damit auch die Größe der jeweiligen Grünfläche in der Bewertung berücksichtigt bleibt, ist für die Ausgleichsleistung eine Verhältniszahl berechnet worden.

Sie setzt sich aus dem Flächenverhältnis von jeweiliger Grünfläche zu einer 25 m x 25 m Rasterzelle einerseits sowie dem innerhalb einer Grünfläche ermittelten Volumenstrom andererseits zusammen. Eine Beispielrechnung für eine Fläche von 3,1 ha und einem durchschnittlichen Kaltluftstrom von 300 m<sup>3</sup>/s innerhalb der Grünfläche verdeutlicht das Vorgehen:

$$(31000 \text{ m}^2 / 625 \text{ m}^2) * (300 / 1000) = \underline{14,9} \text{ (entspricht einem quantitativ hohen Volumenstrom)}$$

Die qualitative Einordnung der Werte zeigt Tabelle 21, wobei sich die Klassenbreite an dem im Untersuchungsraum auftretenden Wertespektrum orientiert.

Bewertung	Verhältniszahl Kaltluftvolumenstrom
Sehr hoch	> 100
Hoch	100 bis ≤ 30
Mittel	30 bis ≤ 15
Gering	< 15

Tabelle 21: Kaltluftlieferung der 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 22:

Bewertung	Kaltluftvolumenstrom (als Mittelwert pro Einzugsgebiet)
Hoch	> 1000
Mittel	500 bis ≤ 1000
Gering	≤ 500

Tab. 22 Einordnung Mittelwert Kaltluftvolumenstrom innerhalb der Kaltlufteinzugsgebiete

Ausgangspunkt für die qualitative Einordnung ist das arithmetische Mittel des Volumenstroms. Dabei stehen allerdings nicht die absoluten Werte der Rasterzellen innerhalb der Kaltlufteinzugsgebiete im Vordergrund der Analyse als vielmehr die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Strömungssystemen (vgl. MOSIMANN et al. 1999). Daraus ergibt sich für die Mittelwerte innerhalb der Kaltlufteinzugsgebiete eine veränderte Klassifizierung als in Tab. 21 (Verhältniszahl Volumenstrom) dargestellt.

### 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 in der vorliegenden Untersuchung 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. Dafür wurde eine Z-Transformation des PMV-Ergebnisrasters durchgeführt, um die Abweichungen von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum zu charakterisieren (VDI 2008). Im Anschluss wurden Flächenmittelwerte für die Blockflächen der Siedlungsräume 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 23).

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

Tabelle 23: Klassifizierung der bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen

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.

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  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  aufweisen (Bezugsjahr 2005). Dabei handelt es sich um ein Immissionsniveau, das in etwa dem gemessenen 98%-Wert (Kurzzeitbelastung) des Jahres 2005 entspricht. Ist ein bereits bioklimatisch belasteter Baublock gleichzeitig durch eine verkehrsbedingte lufthygienische Belastung von mehr als  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  beaufschlagt, sind diese Bereiche als *bioklimatisch und lufthygienisch belastet* mit einer eigenen Signatur ausgewiesen worden.

Im Hinblick auf den erwarteten Rückgang der Emissionsfaktoren bis zum Prognosejahr 2020 (UBA 2004) ist ein geringerer Schwellenwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$  für die Ausweisung lufthygienischer Belastungsbereiche während austauscharmer Wetterlagen angesetzt worden. Da für das Bezugsjahr 2020 nur das Prognose-0-Szenario modelliert wurde, wird es auch in den Bewertungskarten des Prognose-Plan-Falls verwendet.

### **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.

## 6. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den meteorologischen Parametern Lufttemperatur in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die stadtklimatischen Effekte vor allem während windschwacher Strahlungswetterlagen im Sommer entwickeln (vgl. Kap. 5.2). Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Dargestellt werden die Ergebnisse jeweils für den Ist-Zustand (Analyse 2005), das Szenario Prognose-0-Fall 2020 sowie den Prognose-Plan-Fall 2020. Differenzkarten verdeutlichen im Anschluss die räumlichen Effekte der Nutzungsänderungen auf die Ausprägung der Klimaparameter.

### 6.1 Kaltlufthaushalt Ist-Zustand 2005

#### 6.1.1 Temperaturmessfahrt und bodennahe 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.

Die Temperaturverteilung ist innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Das Temperaturfeld zusammen mit dem Routenverlauf einer exemplarischen nächtlichen Messfahrt zeigt Abb. 32 Die höchsten Temperaturen innerhalb der Bebauung treten im Innenstadtbereich auf. Die ausgeprägte innerstädtische Blockbebauung weist verbreitet 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. Trier-Euren oder Trier-Nord anzutreffen. Die Einzel- und Reihenhausbauung weist unter den Siedlungsflächen das geringste Temperaturniveau auf, wobei 18,5°C selten überschritten werden.

Deutlich höhere Temperaturen von mehr als 21°C werden nur über den Wasserflächen erreicht, was in der hohen Wärmekapazität und der damit geringeren nächtlichen Abkühlung des Mediums Wasser begründet liegt. 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 in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

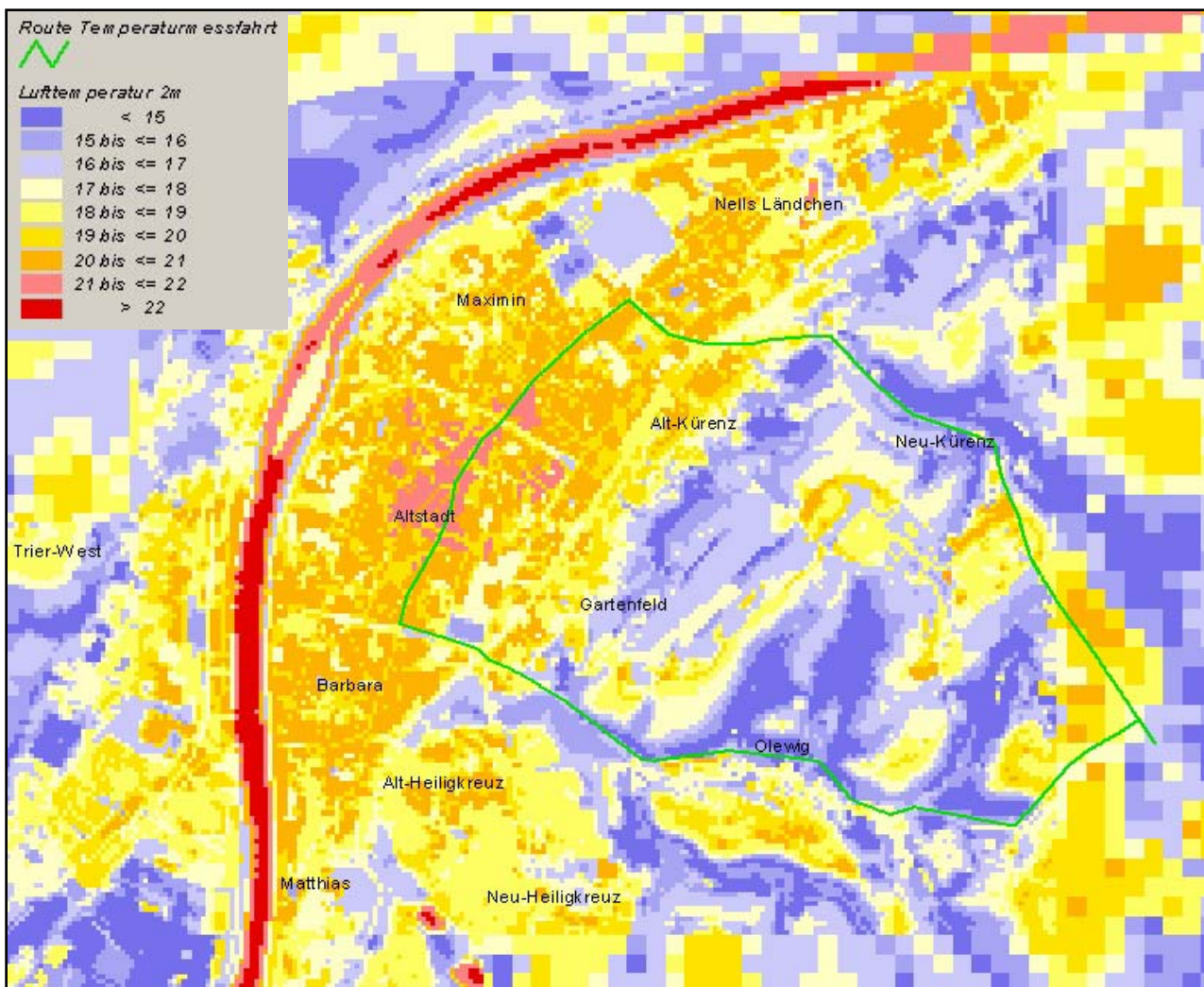


Abbildung 32: Lufttemperatur in 2 m über Grund

Die niedrigsten Werte im Untersuchungsgebiet sind mit 13°C bis 15°C im Raum Trierweiler-Sirzenich anzutreffen, was in der starken langwelligen Ausstrahlung der dort ausgedehnten Ackerflächen nach Sonnenuntergang begründet liegt. Ähnlich niedrige Temperaturen treten in der Eurener Flur sowie innerhalb der größeren Talungen auf (z.B. Olewiger Tal; Aveler Tal). Hier führt die Kanalisierung der an den benachbarten Hängen abfließenden Kaltluft zu den niedrigen Temperaturen.

Im Gegensatz zu den weitläufigen Freiflächen des Umlandes weisen die innerstädtischen Freiflächen ein höheres Temperaturniveau auf. Zu den größten innerstädtischen Grünflächen zählt z.B. der Bereich Moselstadion und der Hauptfriedhof, für den ein Temperaturniveau zwischen 14°C und 17°C modelliert wurde. Im Bereich Kaiserthermen/Palastgarten steigt die Lufttemperatur auf 15 °C bis 18 °C an. Über den weiteren, kleineren Grünflächen im Innenstadtbereich sinkt die Temperatur nur noch selten auf weniger als 17°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 17°C bis 19°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.

Zur Validierung und Absicherung der Ergebnisse des Klimamodells FITNAH wurden im Sommer 2005 Temperaturmessfahrten durch den Fachbereich Klimatologie der Universität Trier durchgeführt. Messfahrten stellen eine relativ einfache und zuverlässige Methode zur hochauflösenden Erfassung der Lufttemperatur dar und ermöglichen es, mit vertretbarem Aufwand klimatische Datenlücken zu füllen und Informationen in Teilräumen zu verdichten. Dabei wird an dem Messfahrzeug ein Ausleger in einem Abstand von mind. 0,5 m zum Wagen angebracht, so dass Auswirkungen der Abwärme des Fahrzeugs vermieden werden können.

Bei den Messfahrten wird das nächtliche Lufttemperatur- und Feuchtefeld bei austauscharen Strahlungswetterlagen während der Fahrt entlang einer festgelegten Messstrecke ermittelt. Dabei wurden alle klimaökologisch relevanten Oberflächenstrukturen sowie wirksame Reliefstrukturen und Höhenstufen erfasst. Die Messstrecke hat somit den Wirkungsraum (Siedlungsräume) und den Ausgleichsraum (vegetationsgeprägte Freiflächen) gleichermaßen abgedeckt. Die Messschleifen beinhalten darüber hinaus auch gradlinige Profilstrecken zwischen Bebauung und Freifläche zur Ermittlung der horizontalen Temperaturgradienten. Als Beispiel für den Verlauf einer Temperaturmessfahrt wird der 20. September herangezogen, da er die räumliche Temperaturverteilung gut widerspiegelt (Abb. 33). Die Höhe der einzelnen Säulen geben dabei die Relativabstufung der Lufttemperatur wieder.

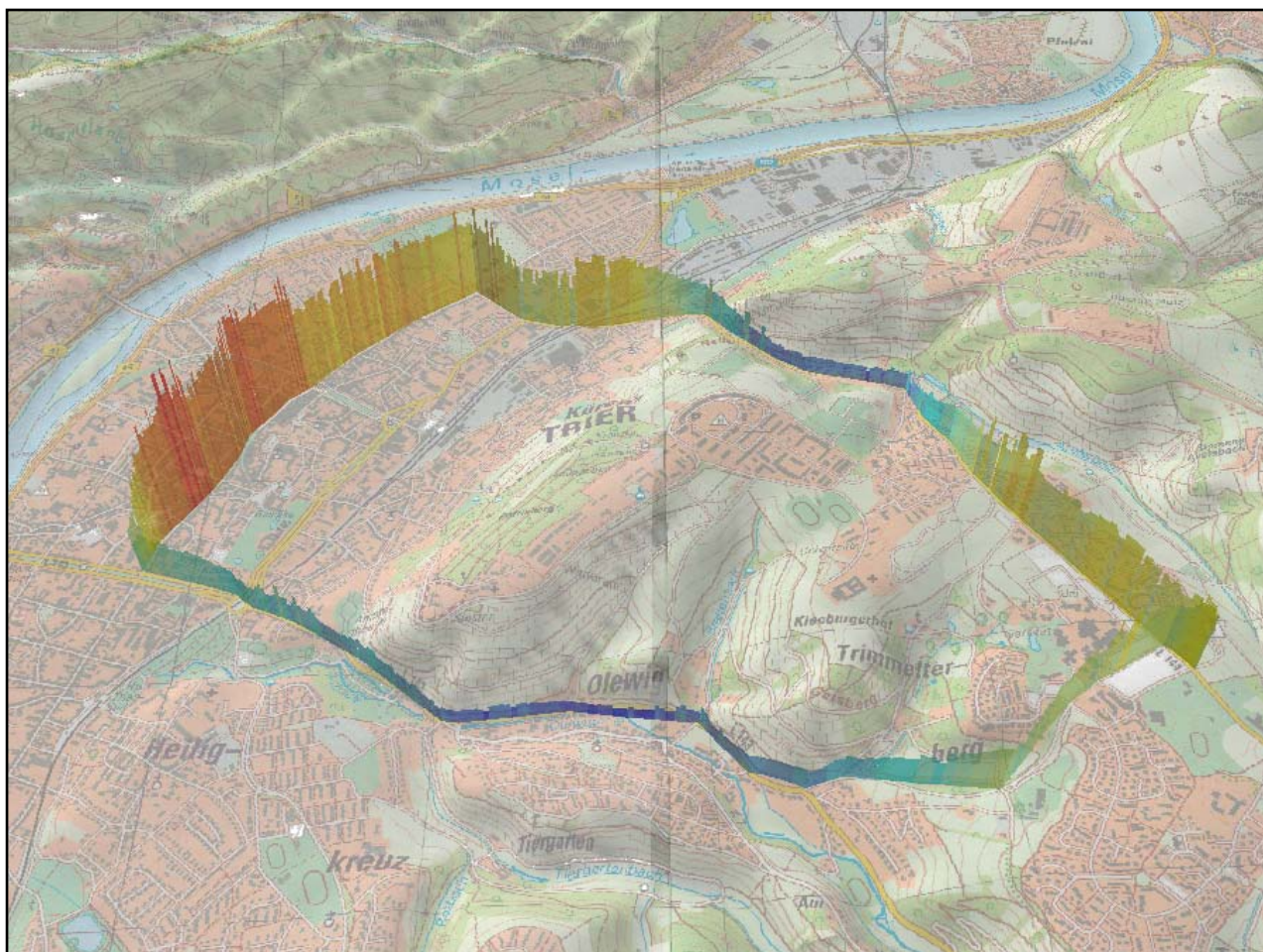


Abbildung 33: Exemplarischer Verlauf der Temperaturmessfahrt

Die Route der Messung führt, ausgehend vom Universitätsgelände, über das Olewiger Tal in die Innenstadt und von dort aus über das Aveler Tal zum Ausgangspunkt zurück. Als klimaökologisch bedeutsame Elemente werden sowohl die Kaltluftentstehungsflächen im Raum Trimmelter Berg mit den Leitbahnen Olewiger und Aveler Tal als auch das Stadtzentrum Trier als bioklimatischer Belastungsraum erfasst. So liegt im Umfeld der Universität noch ein mittleres Temperaturniveau vor, während die niedrigsten Werte der Messfahrt innerhalb des Olewiger Tals auftreten. Mit dem Eindringen der Kaltluft in die Bebauung im Bereich der Kaiserthermen ist eine allmähliche Temperaturerhöhung zu beobachten. Die ist auf die Erwärmung der über das Olewiger Tal herangeführten Kaltluft in der Kaiserstraße/Südallee zurück zu führen. In Höhe der Neustraße steigt die Lufttemperatur deutlich an, da sich der Kaltlufteinwirkungsbereich nicht weiter in Richtung Altstadt fortsetzt. Dies markiert zugleich die maximale Eindringtiefe der Kaltluft in die dortige Bebauung. In der Altstadt werden auch die höchsten Werte innerhalb des Stadtgebietes erreicht, die jenseits der Nordallee wieder etwas absinken. Im Bereich der Avelsbacher Straße geht die Lufttemperatur rasch zurück, während sich das Aveler Tal durch die bodennahe Kaltluft mit niedrigen Temperaturen abzeichnet (Temperaturinversion). Mit dem Geländeanstieg im weiteren Verlauf der Kohlenstraße steigt die Lufttemperatur wieder an und erreicht auf dem bebauten Scheitelbereich des Trimmelterbergs das Ausgangsniveau der Messungen. Somit zeigt sich eine gute Übereinstimmung in der räumlichen Ausprägung zwischen gemessenen und modellierten Werten.



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

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung einer der wichtigste Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes. Als Untergrenze für die Wirksamkeit einer Kaltluftströmung gilt in der vorliegenden Untersuchung, auf Grundlage der gebietstypischen Ausprägung, eine Mindestgeschwindigkeit von 0,1m/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  $\geq 0,1\text{m/s}$ . 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 (Abb. 34).

Für den Kaltlufthaushalt der Stadt Trier sind vor allem die an die Kernstadt angrenzenden Hangbereiche sowie die sich anschließenden Plateauflächen von Eifel und Hunsrück von Bedeutung. Dort werden große Kaltluftvolumina gebildet, welche aufgrund ihrer höheren Dichte hangabwärts fließen und dabei beschleunigt werden. Dabei entstehen vor allem in den Talungen von Nebenflüssen der Mosel durch Kanalisierungseffekte hohe Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 2 m/s. Dahingehend zeichnet sich z.B. das Olewiger Tal sehr deutlich ab. Aber auch über den an die Stadt angrenzenden, un bebauten Hängen treten überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s auf. Über den Scheitelpunkten der Plateauflächen liegen hingegen die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten im Freiland vor, da die Beschleunigung der Kaltluft hier einsetzt und sich erst über den Hängen verstärkt.

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 Spannweite der Eindringtiefe beträgt innenstadtnah zwischen 300 m und 500 m im Raum Gartenfeld und bis zu 700 m in Maximin nördlich der Altstadt. Hier ermöglichen intensive Kaltluftabflüsse auf dem gegenüberliegenden Moselhang sowie in der Bebauung vorhandene Grünflächen im Bereich des Krankenhauses eine gute Durchlüftung des Siedlungsraums. Ein ähnlicher Effekt ist auch für den Hauptfriedhof erkennbar. Darüber hinaus treten auch größere Straßenräume wie die Kaiserstraße mit Geschwindigkeiten von lokal bis zu 0,5 m/s hervor, wobei die klimaökologische Wirksamkeit für die angrenzende Bebauung meist gering ist.

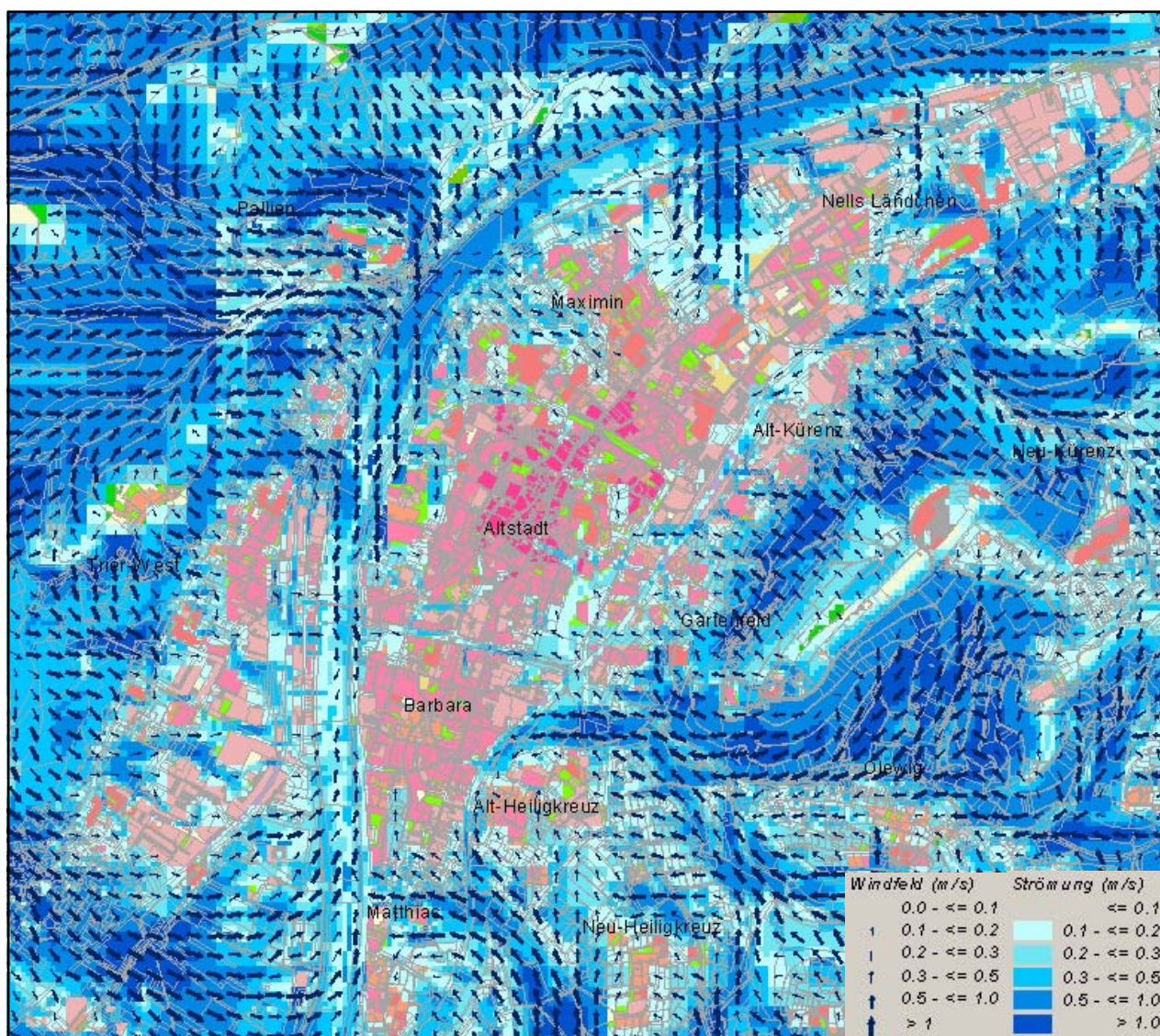


Abbildung 34: Strömungsgeschwindigkeit und Windrichtung im Kerngebiet (Analyse 2005)

Innerhalb der durchströmten Bebauung beträgt die Windgeschwindigkeit meist 0,1 m/s bis 0,3 m/s. Die Altstadt an sich wird nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die hohe Bebauungsdichte und – Temperatur die Kaltluftströmung abschwächen. Die peripheren, z.T. dörflichen Stadtteile von Trier weisen meist einen hohen Durchlüftungsgrad mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 0,4 m/s auf.

### 6.1.3 Kaltluftvolumenstrom

Die Durchlüftung von Siedlungsgebieten trägt zum Abbau von humanbiometeorologischen Belastungen bei (MORISKE & TUROWSKI 2003). Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche aber nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die *Höhe* der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m<sup>3</sup>, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt.

Für die in Abbildung 35 sowie in den Ergebniskarten (s. Anhang) dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*dichte* aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 25 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>1</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte.

Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den *Zustrom von Kaltluft* und bestimmt 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. 24:

Kaltluftvolumen [in m <sup>3</sup> /s pro Rasterzelle]	Bewertung
< 400	Gering
400 bis 800	Mittel
800 bis 2000	Hoch
> 2000	Sehr hoch

Tabelle 24: Qualitative Einordnung Kaltluftvolumenstrom

Als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Volumenstrom gilt in der vorliegenden Untersuchung ein mindestens geringer Rasterzellenwert von mehr als 400.

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

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des Strömungsfeldes einher. Abbildung 34 zeigt den Volumenstrom zusammen mit dem Strömungsfeld.

Sehr hohe Volumenströme treten vor allem über den Moselhängen und innerhalb der Nebentäler auf. Deutlich zeichnen sich die Talungen von Aveler Bach, Olewiger Tal sowie das Aulbachtal westlich Alt-Heiligkreuz als Leitbahnen ab, welche Kaltluft an die Siedlungsräume heranführen.

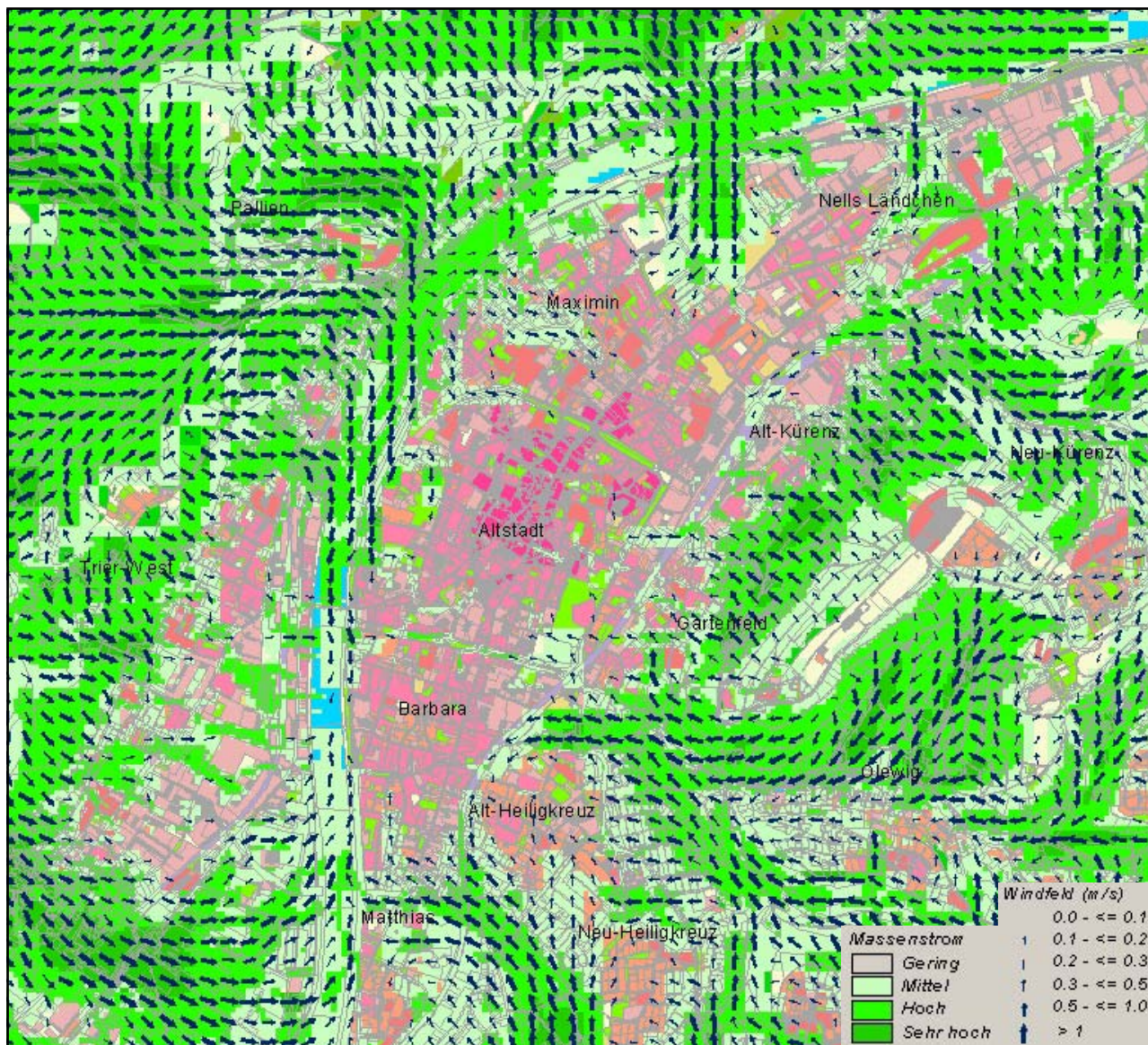


Abbildung 35: Kaltluftvolumenstrom und Strömungsfeld im Kerngebiet (Analyse 2005)

Innerhalb der Bebauung verringert sich der Volumenstrom rasch auf ein mittleres Niveau, bevor er auf niedrige Werte absinkt. Im innenstadtnahen Raum liegen somit keine nennenswerten Kaltluftvolumenströme mehr vor.

## 6.2 Kaltlufthaushalt Prognose-0-Fall 2020, Prognose-Plan-Fall 2020 und Abweichung der Klimaparameter zum Ist-Zustand 2005

Der Prognose-0-Fall 2020 ist ein Planungsszenario, welches die zum Zeitpunkt August 2008 nutzbaren Baurechte zur Auffüllung der städtischen Bauflächen darstellt. In diesem Rahmen stellt ein Großteil der neuen Baureserven eine Bestandsumnutzung in bereits baulich erschlossenen Arealen dar, während sich Neuplanungen über die Bebauungspläne stärker auf die Siedlungsstruktur auswirken.

Das Prognose-0-Szenario unterscheidet sich somit von den neuen und planerisch noch nicht entwickelten Standorten, welche in einem weiteren Prognose-Plan-Fall 2020 betrachtet werden (vgl. Kap. 6.2.2, S. 58). Hinsichtlich der Aussagen zu den klima- und immissionsökologischen Auswirkungen der Planungen insgesamt bis zum Jahr 2020 werden diese in eigenen Klimafunktions- und Planungskarte integriert. In den folgenden Kapiteln wird auf die Wirkungen der Prognose-Fälle auf das lokale Klima eingegangen. Da die Effekte eher kleinräumig ausgeprägt und in einer Übersichtskarte schlecht sichtbar sind, sollen in den folgenden Kapiteln Differenzkarten die Abweichung gegenüber dem Ist-Zustand 2005 verdeutlichen. Dabei stehen rote Farben für eine Abnahme des jeweiligen Parameters, blaue Farben für eine Zunahme. Alle Ergebniskarten sind darüber hinaus dem Anhang beigefügt.

### 6.2.1 Prognose-0-Fall 2020

#### 6.2.1.1 Bodennahes Lufttemperaturfeld

Die Zu- und Abnahmen der oberflächennahen Lufttemperatur im Prognose-0-Szenario 2020 gegenüber dem Ist-Zustand 2005 zeigt Abb. 36, wobei die überplanten Flächen mit einem türkisen Umriss abgegrenzt sind. Dabei werden zahlreiche kleinere Baufelder innerhalb der bestehenden Siedlungsfläche sichtbar. Zu den größeren Umnutzungen zählen vor allem die folgenden Baufelder:

- Erweiterungen der Gewerbefläche Trier-Pfalzel
- Erweiterung im Bereich Petrisberg
- Erweiterungen im Bezirk Filsch
- Erweiterungen im Bezirk Feyen
- Ausbau der Gewerbeflächen in Trier-Euren

In der Differenzkarte zeichnen sich diese größeren Baufelder deutlich ab. Augenfällig sind die starken Zunahmen der Temperatur innerhalb der geplanten Bauflächen, welche lokal bis zu +6°C betragen können (rote Farbe). Dies ist darauf zurück zu führen, dass im Ist-Zustand die überplanten Flächen unbebaut waren und nach der Bebauung im Prognose-Fall ein wesentlich höheres Temperaturniveau aufweisen.

Darüber hinaus tritt auch ein „Ausstrahlen“ des erhöhten Temperaturniveaus auf das nähere Umfeld der geplanten Flächen auf, was auf die Erwärmung der abfließenden Kaltluft zurück zu führen ist. Diese Erwärmung beträgt jedoch meist weniger als +1°C und klingt im Bereich der o.g. ausgedehnteren Baufelder nach etwa 200 m bis 300 m ab. Der Einfluss der kleineren Bauflächen ist dagegen geringer und geht selten über 100 m hinaus, wobei der Betrag der Temperaturerhöhung 0,5 °C nicht übersteigt.

In der Umgebung der größeren Bauflächen treten zudem lokale Abnahmen der Lufttemperatur in Erscheinung (blaue Farbe). Dies ist auf die Stauwirkung der Kaltluft durch die geplanten Flächen zurück zu führen, so dass auch negative Abweichungen von bis zu 2,4 °C zu beobachten sind.

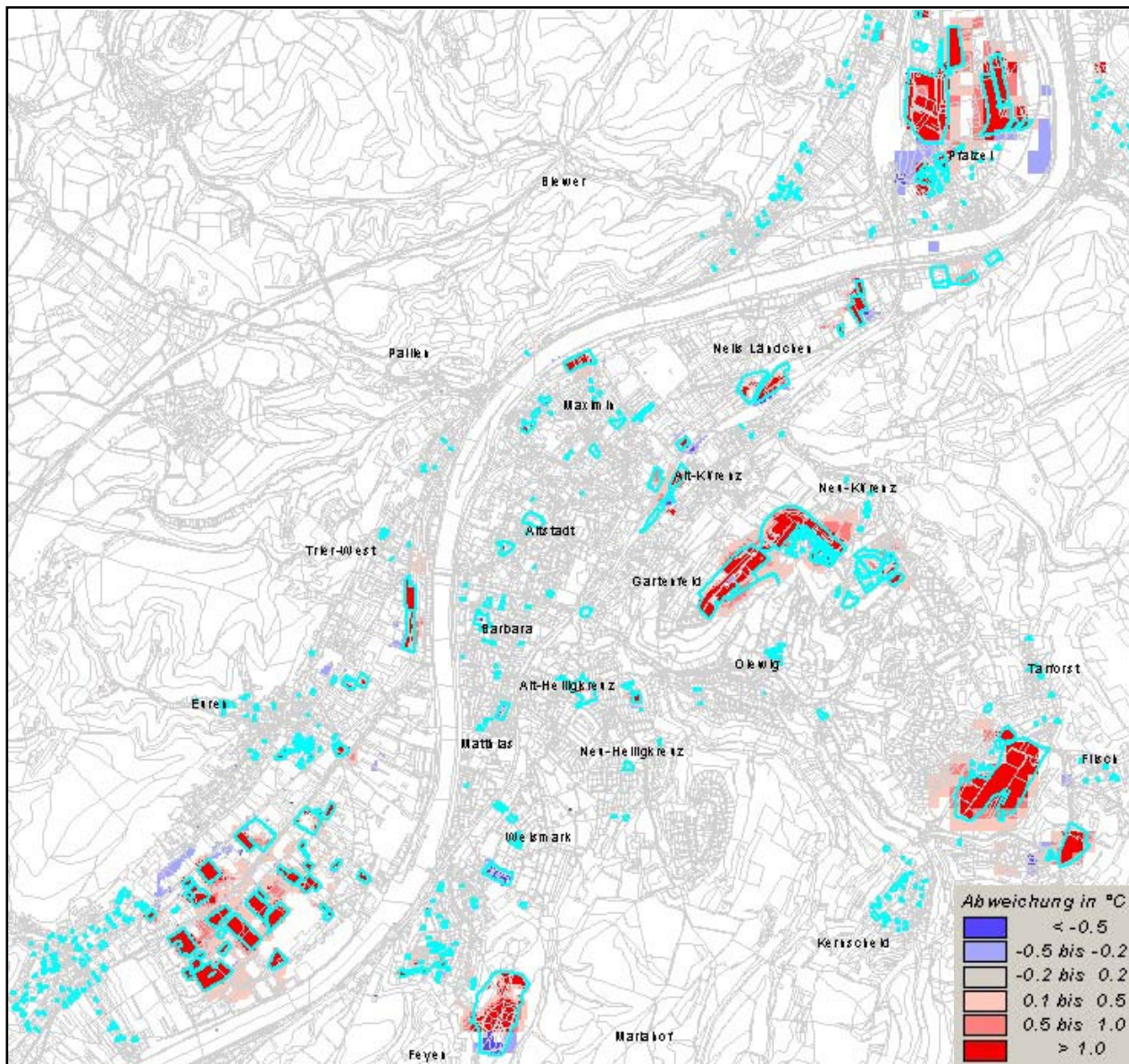


Abbildung 36: Abweichung der Lufttemperatur in 2 m ü.G. zwischen Prognose-0 und Ist-Zustand 2005

Bei der Umnutzung bereits bestehender Siedlungsflächen in der Kernstadt Trier zeigt sich kaum eine Veränderung, da es sich bereits zum jetzigen Zeitpunkt um überbaute Flächen handelt. Somit kann festgestellt werden, dass die Beeinflussung der oberflächennahen Lufttemperatur gering ausgeprägt ist und im Wesentlichen auf die Vorhabenfläche selbst begrenzt ist.

### 6.2.1.2 Autochthones Windfeld

Die Abbildung 37 zeigt die Effekte auf das Kaltluftströmungsfeld nach Umsetzung der Planungen im Prognose-0-Fall 2020, wobei die absoluten Zu- und Abnahmen als Differenzkarte dargestellt sind. Damit wird die lokale Beeinflussung des Strömungsfeldes sichtbar.

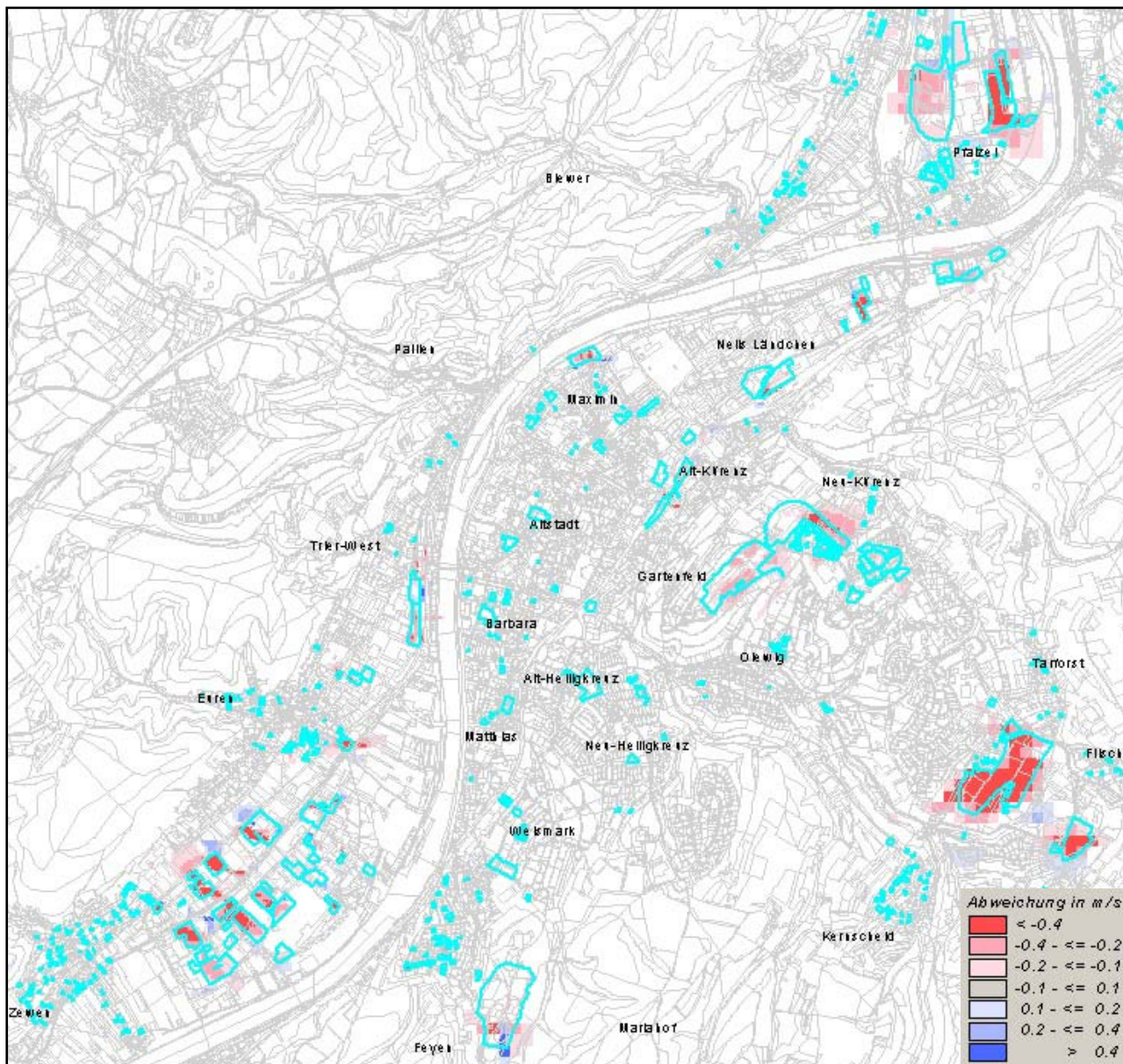


Abbildung 37: Abweichung der Windgeschwindigkeit zwischen Prognose-0 und Ist-Zustand 2005

Die geplante Bebauung führt, je nach Ausgangsniveau, zu einer Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit von lokal bis zu 1 m/s auf den größeren Vorhabenflächen. Darüber hinaus ist noch in der näheren Umgebung durch Abschattungseffekte ein Rückgang in der Größenordnung von 0,1 m/s bis 0,4 m/s zu verzeichnen. Die Abweichungen im Bereich der kleineren Bauflächen wie z.B. im Innenstadtbereich sind in ihrer räumlichen Wirkung wesentlich geringer ausgeprägt, da bereits im Ist-Zustand eine Bebauung vorhanden ist. Durch die Beeinflussung des Strömungsfeldes können hingegen auch kleinräumige Kanalisierungseffekte zu lokalen Zunahmen bis 0,6 m/s führen (blaue Farbe), was am deutlichsten innerhalb des Gewerbegebietes Trier-Euren sichtbar wird.

### 6.2.1.3 Kaltluftvolumenstrom

Die Beeinflussung des Parameters Volumenstrom durch die geplante Bebauung zeigt Abb. 38. Analog zu den bereits beschriebenen Parametern tritt die stärkste Abschwächung vor allem auf den Vorhabenflächen selbst mit der Überbauung von im Ist-Zustand 2005 noch an der Kaltluftentstehung beteiligten Flächen auf (rote Farben). Aufgrund ihrer Größe treten vor allem die Plangebiete in Pfalzel, Neu-Kürenz, Filsch und Euren am deutlichsten in Erscheinung. Die lokalen Abnahmen können daher mehr als 200 m<sup>3</sup>/s betragen. Es zeigt sich aber auch, dass die räumliche Wirkung von Abschattungseffekten meist nach wenigen hundert Metern abgeklungen ist.

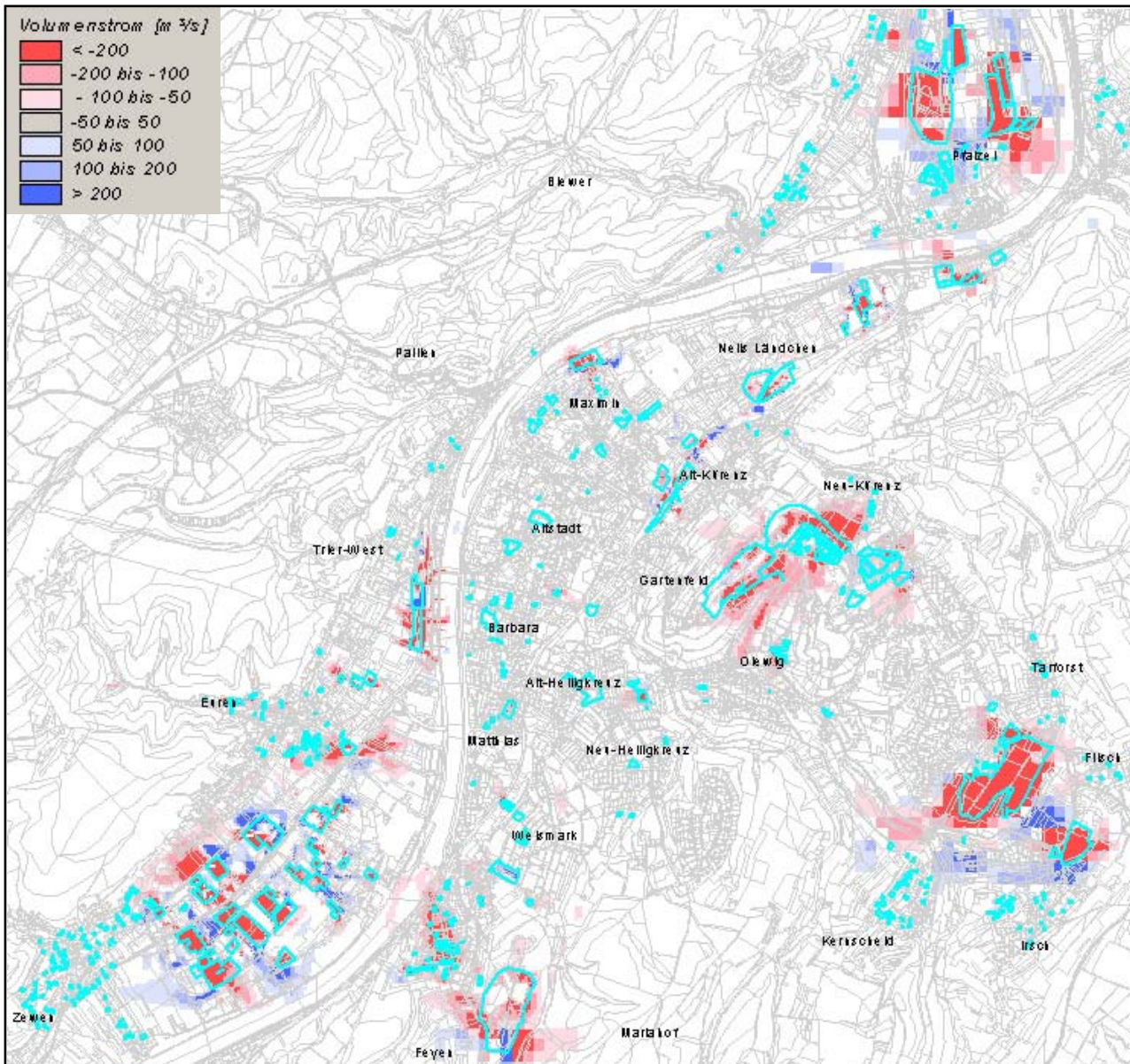


Abbildung 38: Abweichung des Kaltluftvolumenstroms zwischen Prognose-0 und Ist-Zustand 2005

Neben der Größe einer Vorhabenfläche wird das Ausmaß der Abnahme auch durch die Intensität der lokalen Kaltluftdynamik beeinflusst. Trotz ihrer Größe ist die durch die Baufläche Neu-Kürenz verursachte Abnahme vergleichsweise gering, da durch die Lage auf dem Scheitelpetrisbergs bereits im Ist-Zustand nur ein mittleres Wertenniveau für den Volumenstrom vorlag. Die hohen bis sehr hohen Werte für den Volumenstrom treten hingegen erst über den Hangbereichen auf.



Den Abnahmen stehen kleinräumige Zunahmen gegenüber (blaue Farben). Diese werden durch Stau- und Kanalisationseffekte verursacht, welche im Bereich Euren und Filsch mehr als 200 m³/s betragen können.

## 6.2.2 Kaltlufthaushalt Prognose-Plan-Fall 2020 und Abweichung der Klimaparameter zum Ist-Zustand 2005

### 6.2.2.1 Bodennahe Lufttemperaturfeld

Ähnlich wie im Prognose-0-Fall sind im Prognose-Plan-Szenario die stärksten Veränderungen meist auf die Baufelder selbst begrenzt (Abb. 39). Größere räumliche Effekte sind vor allem bei den Bauflächen Brubacher Hof und Zentenbüsch zu beobachten, welche mit 41 ha und 31 ha die flächenmäßig größten darstellen. Die Überbauung beider Freiflächen führt zu lokalen Temperaturerhöhungen von bis zu 5°C über der im Ist-Zustand 2005 un bebauten und landwirtschaftlich genutzten Freifläche. Die Erhöhung der Lufttemperatur setzt sich dabei sichtbar mit den Kaltluftabflüssen fort und geht im Bereich Brubacher Hof in Richtung auf die Talung des Tiergartenbachs nach etwa 700 m wieder auf das Ausgangsniveau zurück.

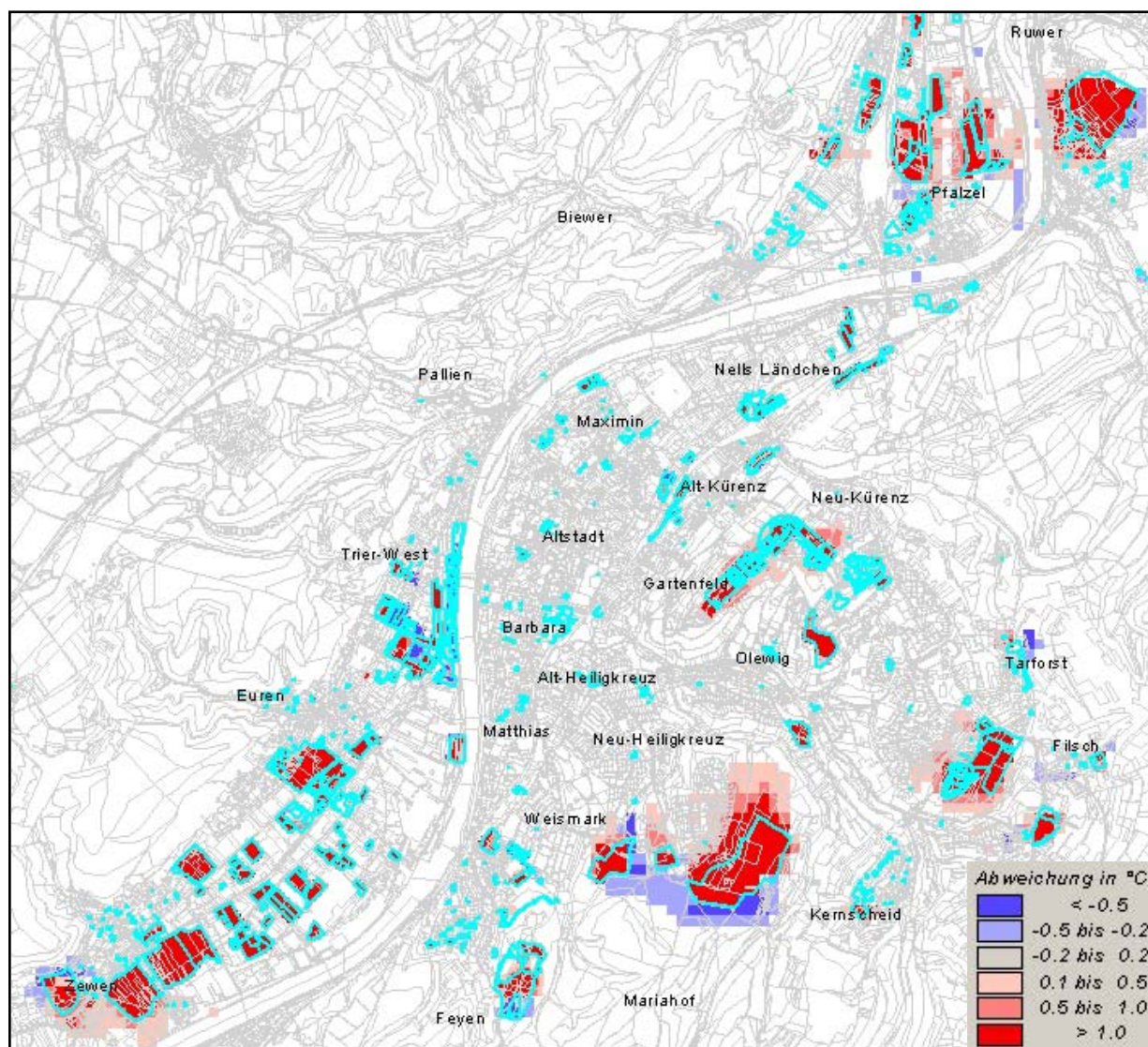


Abbildung 39: Abweichung der Lufttemperatur in 2 m ü.G. zwischen Prognose-Plan und Ist-Zustand 2005

Außerhalb dieser ausgedehnten Baufelder kann in deren näheren Umgebung die Erhöhung der Lufttemperatur noch bis zu 2°C betragen. Dabei muss bedacht werden, dass hier im Ist-Zustand 2005 auch ein vergleichsweise niedriges Ausgangsniveau der Lufttemperatur zwischen 13°C und 15°C vorliegt. Analog zum Szenario Prognose-0 2020 werden angrenzende bestehende Siedlungsflächen nur gering beaufschlagt. Südlich des Gebiets Brubacher Hof führt die Stauung der vom Mattheiser Wald zufließenden Kaltluft zudem zu einer lokalen Temperaturabsenkung von bis zu minus 1,4°C.

### 6.2.2.2 Autochthones Windfeld

Auch für das Kaltluftströmungsfeld sind die stärksten Beeinflussungen im Bereich der größeren Baufelder anzutreffen (Abb. 40). Dabei tritt der Bereich Brubacher Hof wieder mit signifikanten Abnahmen der Windgeschwindigkeit hervor, was auf die Überbauung der ehemals Kaltluft produzierenden Freifläche zurück zu führen ist. Die Abnahmen von bis zu minus 1,7 m/s auf der Baufläche selbst setzen sich entlang des Holzbachtals als Leitlinie für den lokalen Kaltluftabfluss weiter in nördliche Richtung fort. Hier sind Abweichungen zwischen -0,2 m/s und -1 m/s zu beobachten.

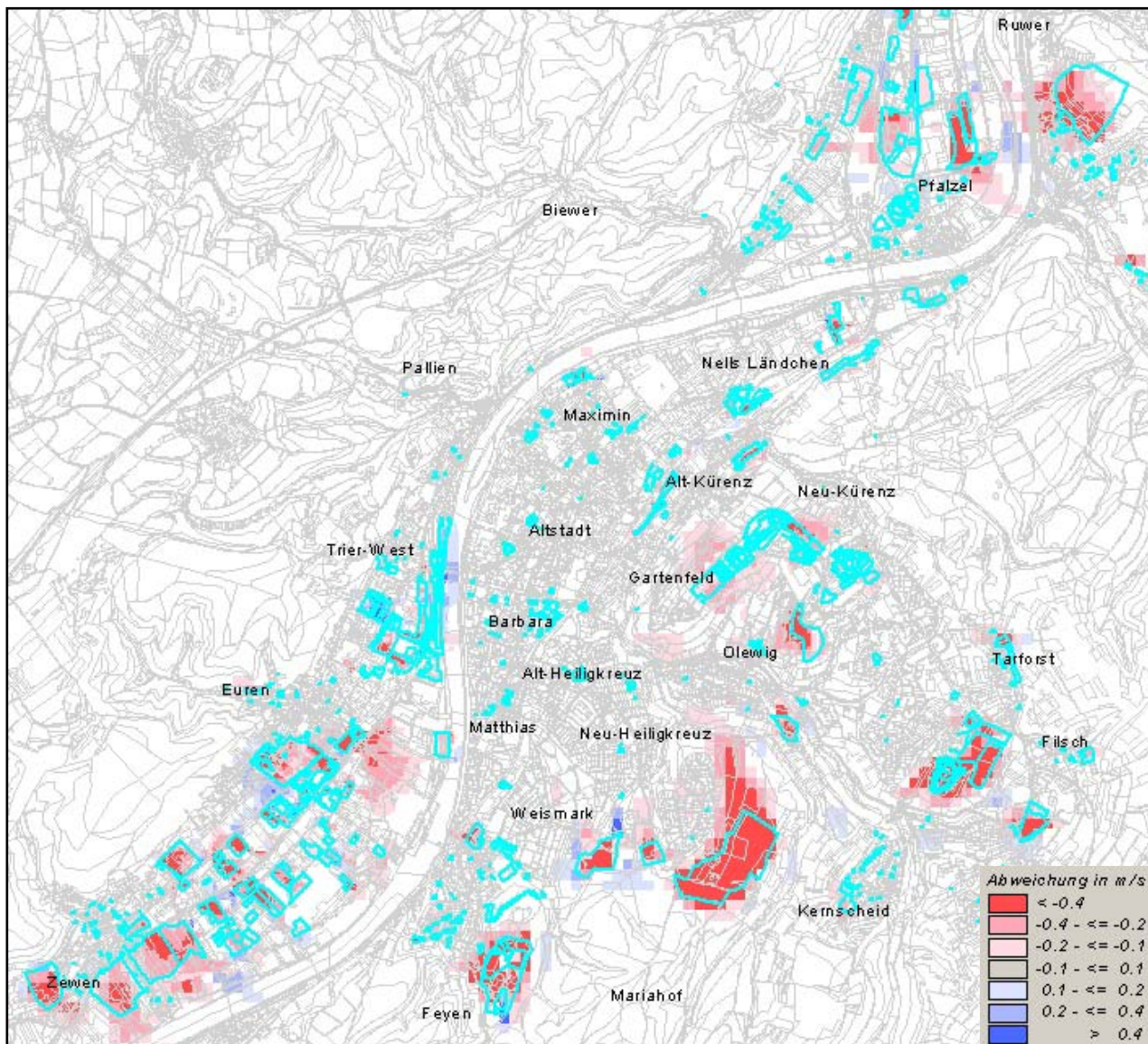


Abbildung 40: Abweichung der Windgeschwindigkeit zwischen Prognose-Plan und Ist-Zustand 2005

Innerhalb des Tiergartenbachtals gehen die Abnahmen in Höhe Olewig wieder auf weniger als 0,2 m/s zurück. Bis zum Stadtteil Heiligkreuz sind die Abnahmen wieder vollständig abgeklungen. Im Bereich Zentenbüsch hat bis zur Mosel die Windgeschwindigkeit etwas das Ausgangsniveau erreicht. Des Weiteren ist zwischen Trier-West und Zewen ein Nebeneinander von Ab- und Zunahmen der Windgeschwindigkeit anzutreffen. Dabei stellen die im Prognose-Plan-Szenario geschlossenen Baulücken einen Strömungswiderstand dar, der zu entsprechenden Verringerungen führt. In den Bereichen, in denen ein vorhandenes Gewerbeareal zu Wohnbebauung umgenutzt wird, führt ein geringerer Überbauungsgrad meist zu einer Verbesserung der Durchlüftungssituation.

### 6.2.2.3 Kaltluftvolumenstrom

Insgesamt zeigt sich für diesen Parameter eine räumlich ausgeprägtere Reduktion als für die Strömungsgeschwindigkeit (Abb. 41). Dies ist darauf zurück zu führen, dass der Kaltluftvolumenstrom eine über die Höhe integrierte Größe darstellt und sich nicht nur allein aus der Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft in Bodennähe berechnet (vgl. Kap. 6.1.3, S. 52). Durch diesen Bezug zur Höhe ist der Volumenstrom allerdings auch stärker beeinflussbar als die Strömungsgeschwindigkeit.

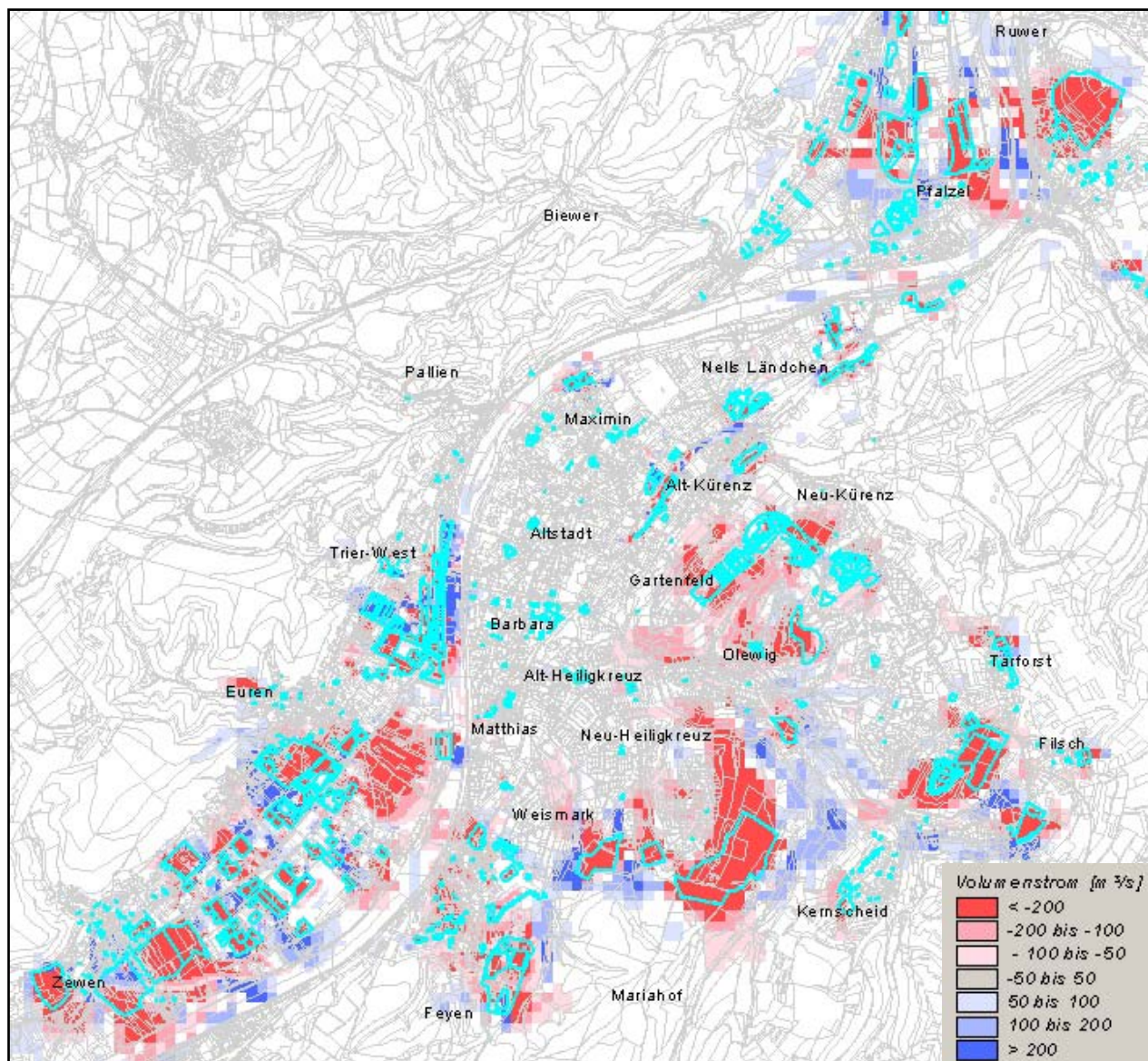


Abbildung 41: Abweichung des Kaltluftvolumenstroms zwischen Prognose-Plan und Ist-Zustand 2005

Dies zeigt sich deutlich im Lee der größeren Baufelder, wobei die Abnahme des Kaltluftvolumenstroms nördlich des Brubacher Hofs augenfällig ist. Innerhalb des Leitbahnsystems des Altbachtals verbleibt das Niveau des Kaltluftvolumenstroms insgesamt aber weiterhin auf einem überdurchschnittlichen Niveau. Bis zum Siedlungsrand von Heiligkreuz wird das verringerte Kaltluftvolumen durch die übrigen Kaltluftzuflüsse wieder ausgeglichen. Darüber hinaus zeichnen sich im Bereich Euren/Zewen die im Prognose-Plan-Szenario geschlossenen Baulücken als Strömungswiderstand für die auf dem westlichen Hängen der Mosel abfließenden Kaltluft ab.

### 6.3 Fazit Kaltlufthaushalt

Die Ermittlung der Abweichungen der Klimaparameter zwischen dem Ist-Zustand 2005, dem Prognose-0- und Prognose-Plan-Fall 2020 haben die räumlichen Schwerpunkte der Beeinflussungen deutlich gemacht. Mit der Umsetzung der Planungen werden die Effekte vor allem der größeren Bauflächen sichtbar. Die für Kaltluftabflüsse wichtigen Hangbereiche sind im Szenario Prognose-0 kaum Bestandteil der Planungen und werden in ihrer wichtigen Rolle für den Kaltlufthaushalt wenig beeinträchtigt.

Im Prognose-Plan-Szenario sind mit den Baufeldern Brubacher Hof und Zentenbüsch auch bedeutsame Kaltluftentstehungsflächen überplant worden. Die Modellrechnungen zeigen, dass die Dynamik des Kaltlufthaushaltes im Raum Trier aber noch ausreichend ist, den lokalen Wegfall von Kaltluft produzierender Freifläche weitestgehend zu kompensieren. Im Rahmen beider Szenarien sind durch die geplanten Baufelder keine erheblichen Hinderniswirkungen auf Kaltluftleitbahnen ersichtlich. Dieser Aspekt sollte auch bei allen weiteren Planungen berücksichtigt bleiben. Die lokalen Auswirkungen auf den Kaltlufthaushalt sind zwar deutlich erkennbar, bleiben aber im Wesentlichen auf das nähere Umfeld begrenzt und wirken sich kaum auf weiter entfernte Siedlungsräume aus, die ungünstige (Innenstadtbereich) oder weniger günstige bioklimatische Bedingungen aufweisen (vgl. dazu Kap. 7.2, S. 71).

## 6.4 Lufthygienische Belastung am Beispiel Stickstoffdioxid

Die durchgeführte lufthygienische Untersuchung der verkehrsinduzierten Luftschadstoffbelastung beruht auf der Einbindung der durch das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (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 Trier die Ausbreitungssituation für die verkehrstypische Leitkomponente Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) als Jahresmittelwert sowie für eine austauscharme Wetterlage berechnet. Neben dem Analysejahr 2005 wurde auch der Prognose-0-Fall 2020 modelliert, während für den Plan-Fall 2020 keine Verkehrsdaten vorlagen.

Während in Kap. 3.2.1 der mehrjährige Messwertverlauf an den ZIMEN-Stationen Ostallee und Kaiserstraße ausführlich dargestellt wurde, sollen an dieser Stelle die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung beschrieben werden. 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 muss 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 Trier und die Ausweisung von Belastungsschwerpunkten. Die Simulationsrechnungen für die Schadstoffausbreitung erfolgten in dem unter Kap. 5.4 beschriebenen Untersuchungsgebieten mit einer Rasterauflösung von 100m im Umland bzw. 25 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.

### 6.4.1 Stickstoffdioxid-Immissionen im Ist-Zustand 2005

#### 6.4.1.1 Jahresmittelwert NO<sub>2</sub>

Die NO<sub>2</sub>-Immissionen im Kerngebiet des Analysejahres 2005 zeigt Abb. 42 als Jahresmittelwert. Der Untersuchungsraum wird hinsichtlich der Immissionen vor allem durch den Verlauf der parallel zur Mosel 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 B 49 mit bis zu 40 tsd. Kfz/Tag, die am Georg-Schmitt-Platz auf bis zu 48 tsd. Kfz/Tag ansteigen
- Konrad-Adenauer-Brücke (bis zu 38 tsd. Kfz/Tag)
- Kaiser-Wilhelm-Brücke (bis zu 30 tsd. Kfz/Tag)

- Olewiger Straße (bis zu 25 tsd. Kfz/Tag)
- B 51/Bitburger Straße; Verlauf Spitzmühle/Metzer Allee sowie Schöndorfer Straße (bis zu 23 tsd. Kfz/Tag)
- Avelsbacher Straße (bis zu 21 tsd. Kfz/Tag)

Dies spiegelt sich im Immissionsfeld wieder, wobei die höchsten Immissionen im Straßenraum der B 49 anzutreffen sind. Der Verlauf der B 49, welcher im Bereich Nells Ländchen am Verteilerkreis in die A 602 übergeht, weist eine durchgehend hohe Belastung von mehr als 50 µg/m³ NO<sub>2</sub> auf. Durch die Modellrechnung werden auch weitere Hot-Spots wie die Avelsbacher Straße, Saarstraße und Lindenstraße sichtbar. Dies ist, neben hohen Verkehrszahlen, auch auf die meist kontinuierliche Randbebauung zurück zu führen, welche eine Verdünnung der Luftschadstoffe erschwert. In diesen Abschnitten ist die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des ab 2010 gültigen Langzeitgrenzwert von 40 µg/m³ NO<sub>2</sub> erhöht (TA Luft 2002).

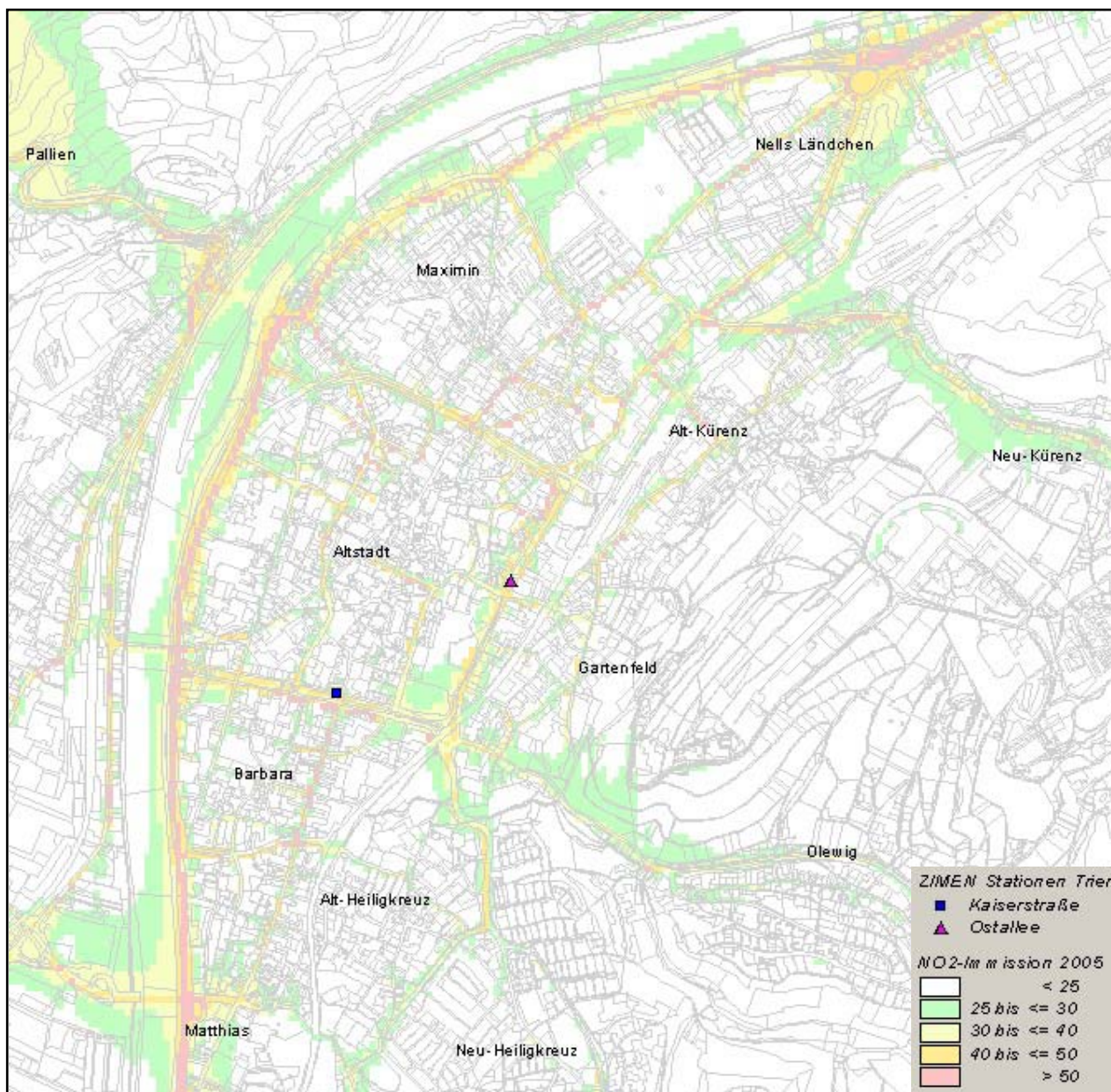


Abbildung 42: NO<sub>2</sub>-Immission im Kerngebiet (Jahresmittelwert Analyse 2005)

Der Einfluss der Bebauung zeigt sich auch am Beispiel der Konrad-Adenauer-Brücke, welche mit etwa 37 tsd. Fahrzeugen/Tag zu den am stärksten befahrenen Abschnitten gehört. Trotz der Verkehrsmenge gehen die Immissionen im Straßenraum nicht über  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hinaus, da die Verdünnung und Vermischung der Luftschadstoffe durch die Exposition der Brücke weitgehend ungehindert erfolgen kann. Im übrigen Hauptstraßennetz liegt meist eine mittlere  $\text{NO}_2$ -Belastung zwischen  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  vor. Die im Straßenraum auftretenden Immissionen klingen rasch ab, so dass im Bereich der Siedlungsflächen flächendeckend Konzentrationen von weniger als  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  vorliegen.

Der modellierten  $\text{NO}_2$ -Belastung innerhalb der Ostallee für das Jahr 2005 steht mit  $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ein an der ZIMEN-Station gemessener Wert von  $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gegenüber. Innerhalb der Kaiserstraße wurde eine Immission von  $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  modelliert und  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen. Während das Modellergebnis gut mit der Situation in der Ostallee einhergeht, liegt in der Kaiserstraße eine Überschätzung vor. Sie ist auf die verwendete Methodik zurückzuführen, welche ein flächendeckendes Immissionsfeld zum Ziel hat und kleinräumige Situationen mit einem  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$  Raster nicht immer umfassend abbilden kann. Trotzdem ergibt sich mit der durchgeführten Modellierung ein umfassendes Bild über die räumliche Belastungssituation in der Stadt Trier.

#### 6.4.1.2 Austauscharme Wetterlage

In diesem Szenario 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. Das Ergebnis ist in Abb. 40 dargestellt, wobei das Strömungsfeld des  $100 \text{ m}$  Rasters mit abgebildet ist.

Dabei zeichnen sich die bereits in Kap. 6.4.1.1 beschriebenen Straßenabschnitte als Belastungsschwerpunkte ab, wobei im Hauptstraßennetz ein Wertenniveau von  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bis  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  vorherrscht. Höhere Konzentrationen von mehr als  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  treten entlang der B 49 zwischen Konrad-Adenauer-Brücke und Kaiser-Wilhelm-Brücke, der A 602 sowie in den Bereichen Saarstr./Kaiserstr. und Schöndorfer/Avelsbacher Straße auf.

Wie Abb. 43 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  $\text{NO}_2$  beaufschlagten Bereiche meist im Lee der überströmten Straßenabschnitte anzutreffen, was sich deutlich am Hauptfriedhof sowie im Stadtteil Maxim zeigt.

Hier führt die nördlich bzw. westlich einströmende Kaltluft zu einer Verfrachtung von  $\text{NO}_2$ , welche, ausgehend vom Straßenraum, bis zu  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  in einer Entfernung von  $500 \text{ m}$  betragen kann. Ein ähnlicher Effekt ist auch im Bereich Olewiger Straße/Spitzmühle sowie entlang der B 49 zwischen Konrad-Adenauer-Brücke und Kaiser-Wilhelm-Brücke zu beobachten. Innerhalb der Siedlungsräume betragen die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen meist weniger als  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ .

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 Ostallee ein 98-Perzentil von 83 µg/m³ für das Jahr 2005 gemessen wurde, konnte mit der Modellrechnung ein Wert von 93 µg/m³ ermittelt werden.

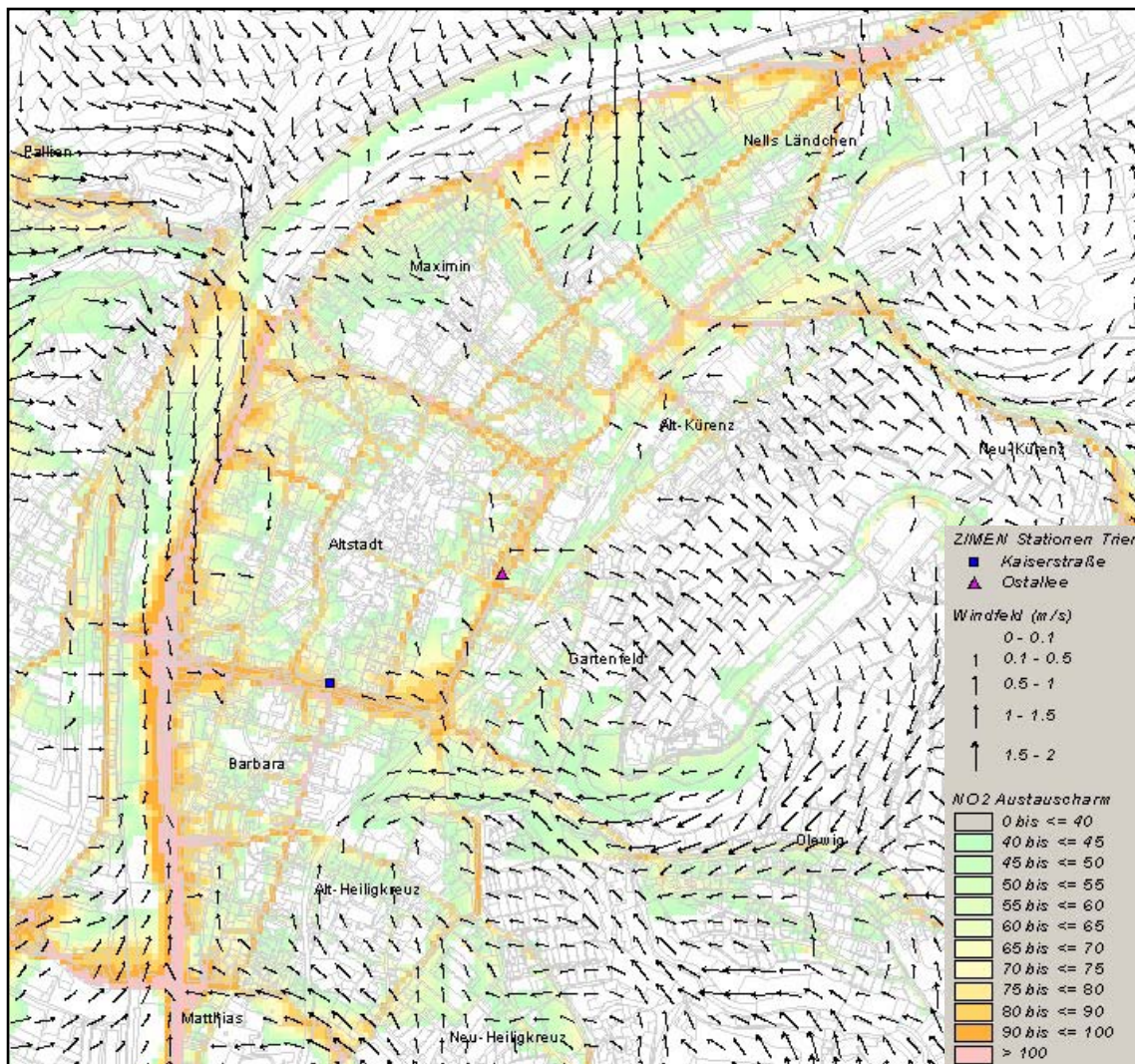


Abbildung 43: NO<sub>2</sub>-Immission im Kerngebiet während einer austauscharmen Wetterlage (Analyse 2005)

Der Durchschnitt der Jahre 1996 bis 2005 liegt bei 88 µg/m³ NO<sub>2</sub> (s. Tab. 11, S. 21). An der Kaiserstraße steht den gemessenen 78 µg/m³ NO<sub>2</sub> ein berechneter Wert von 96 µg/m³ gegenüber, wobei das Mittel der Jahre 1996 bis 2005 84 µg/m³ NO<sub>2</sub> beträgt (vgl. Tab. 13, S. 24).

#### 6.4.2 Stickstoffdioxid-Immissionen im Prognose-0-Fall 2020

Für den Zeitschnitt 2020 weisen die Emissionsfaktoren des HBEFA (UBA 2004) gegenüber dem Analysejahr 2005 eine deutliche Reduktion auf. Dies steht, trotz wachsender Fahrleistungen, im Zusammenhang mit der zu erwartenden veränderten Verkehrszusammensetzung, d.h. mit der zunehmenden Reduzierung der Emissionen aufgrund der Entwicklung der europäischen Abgasgrenzwerte (Euro-Norm-Stufen) und der weiteren Flottenverjüngung durch Neufahrzeuge mit niedrigem Emissionsniveau.



Eine Gegenüberstellung der vom Verkehrsgutachter IVV übermittelten Daten ergibt, dass sich vom Analysejahr 2005 ausgehend bis zum Zeithorizont 2020 die Verkehrsmenge im Stadtgebiet Trier insgesamt um ca. 4,7 Prozentpunkte erhöht. Dabei nimmt die Verkehrsmenge an PKW um ca. 3,1 Prozentpunkte zu, während sich die Anzahl der Lkw um etwa 34 Prozentpunkte erhöhen wird. Im Folgenden werden die Ergebnisse für den Jahresmittelwert sowie die austauscharme Wetterlage erläutert, wobei die Ergebniskarten dem Anhang beigelegt sind.

#### 6.4.2.1 Jahresmittelwert NO<sub>2</sub>

Die angesprochene Entwicklung äußert sich, verglichen mit dem Ausgangsszenario 2005, in einem deutlichen Rückgang der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs und damit auch in einem insgesamt niedrigeren NO<sub>2</sub>-Immissionsniveau für das modellierte Prognose-0-Szenario im Jahr 2020. Es können aber auch für das Jahr 2020 die in Kap. 6.4.1.1 genannten Straßenabschnitte als die am stärksten befahrenen Bereiche angesprochen werden.

Dabei weist die A 602 in Höhe Trier-Pfalzel mit ca. 50 tsd Kfz/Tag die höchste Verkehrsmenge auf. Die Verkehrsdichte innerhalb der B 49 verbleibt auch im Jahr 2020 mit Werten von 33 tsd. und 40 tsd. Kfz/Tag auf einem überdurchschnittlichen Niveau. Die Immissionen liegen sowohl bei der A 602 als auch innerhalb der hoch frequentierten Abschnitte der B49 noch unter dem ab 2010 einzuhaltenden Langzeitgrenzwert der TA Luft (2002) von 40 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>.

Auch bei den innerstädtischen Hot Spots sind deutlich geringere Werte zu beobachten als im Analysefall 2005. Während im Prognosejahr 2020 für den Abschnitt Balduinstraße noch bis zu 38 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> berechnet werden, ist das Konzentrationsniveau entlang der Ostallee mit 30 bis 33 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> deutlich geringer. Am Standort der dortigen ZIMEN-Messstation ist ein Wert von 31 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> anzutreffen. Innerhalb der Kaiserstraße sind Immissionen zwischen 31 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> und 36 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> zu beobachten, wobei an der dortigen Messstation eine NO<sub>2</sub>-Konzentration von 34 µg/m<sup>3</sup> vorliegt. Auch entlang der Saarstraße geht das Immissionsniveau nicht über 36 NO<sub>2</sub> hinaus. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Datenbasis ist somit im Prognose-0-Szenario 2020 nicht von einer Überschreitung des Jahresmittelwertes für NO<sub>2</sub> nach der TA Luft (2002) auszugehen.

#### 6.4.2.2 Austauscharme Wetterlage

Das räumliche Muster der NO<sub>2</sub>-Immissionen während einer austauscharmen Wetterlage ist mit dem des Analysejahres 2005 vergleichbar und wird durch die lokal auftretenden Kaltluftströmungen geprägt. Allerdings macht sich auch hier das reduzierte Immissionsniveau im Jahr 2020 bemerkbar, welches insgesamt nicht über 70 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> hinaus geht. Konzentrationen zwischen 65 µg/m<sup>3</sup> und 70 µg/m<sup>3</sup> werden vor allem entlang der B 49 zwischen Johanniter- und St.-Barbara-Ufer sowie östlich des Verteilerkreises entlang der A 602 erreicht.

Ein weiterer Belastungsschwerpunkt ist der Bereich Südallee/Kaiserstraße, wobei die Wertespanne hier zwischen 60 µg/m<sup>3</sup> und 65 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> beträgt. Die Situation innerhalb der Saarstraße ist dahingehend vergleichbar. An der ZIMEN-Messstation Kaiserstraße kann eine Immission von 61 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> beobachtet werden.

Innerhalb der Ostallee verbleiben die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einem Bereich von 55 bis 60 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub>, wobei an der dortigen Messstation eine Konzentration von 55 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> modelliert wurde. Die NO<sub>2</sub>-

Konzentration innerhalb der Nebenstraßen schwankt zwischen 45 µg/m³ und 55 µg/m³. In den Siedlungsräumen liegen die Immissionen meist unterhalb von 40 µg/m³ NO<sub>2</sub>, sofern nicht auftretende Kaltluftströmungen zu einer Verfrachtung von vorhandenen Immissionen und somit zur Beaufschlagung der benachbarten Bebauung führen. Davon sind in erster Linie die an die B 49 und an die Kaiserstraße angrenzenden Areale betroffen.

### 6.5 Fazit Lufthygiene

Die durchgeführten Ausbreitungsrechnungen für den verkehrstypischen Luftschadstoff Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) haben die lufthygienischen Belastungsbereiche im Hauptstraßennetz während austauscharmer Wetterlagen sowie im Jahresmittel deutlich gemacht. Die Abb. 44 und 45 bilanzieren die verkehrsbedingte NO<sub>2</sub>-Belastung für die austauscharme Situation innerhalb des 25 m Rasters, welches die Kernstadt Trier mit einbezieht. Die flächenhafte Ausdehnung von NO<sub>2</sub>-Immissionen oberhalb von 80 µg/m³ beläuft sich im *Ist-Zustand 2005* auf einen Anteil von etwa 7 %.

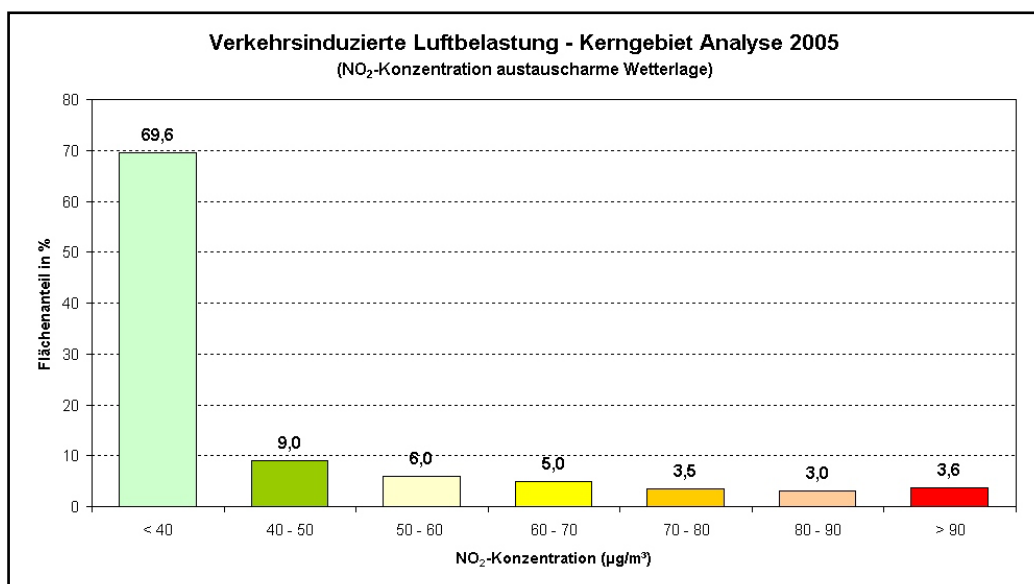


Abbildung 44: Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet Analyse 2005 (austauscharme Wetterlage)

Ein mittleres Belastungsniveau zwischen 80 µg/m³ und 40 µg/m³ NO<sub>2</sub> ist auf etwa 24 % der Fläche zu beobachten. Auf ca. 70 % der Fläche liegt dagegen ein Immissionsniveau von weniger als 40 µg/m³ vor. Deutlich niedrigere Immissionen liegen hingegen im *Prognose-0-Fall* vor, wobei 70 µg/m³ NO<sub>2</sub> nicht mehr überschritten werden. Mehr als 90 % des Kerngebietes verbleibt unterhalb von 50 µg/m³ NO<sub>2</sub>.

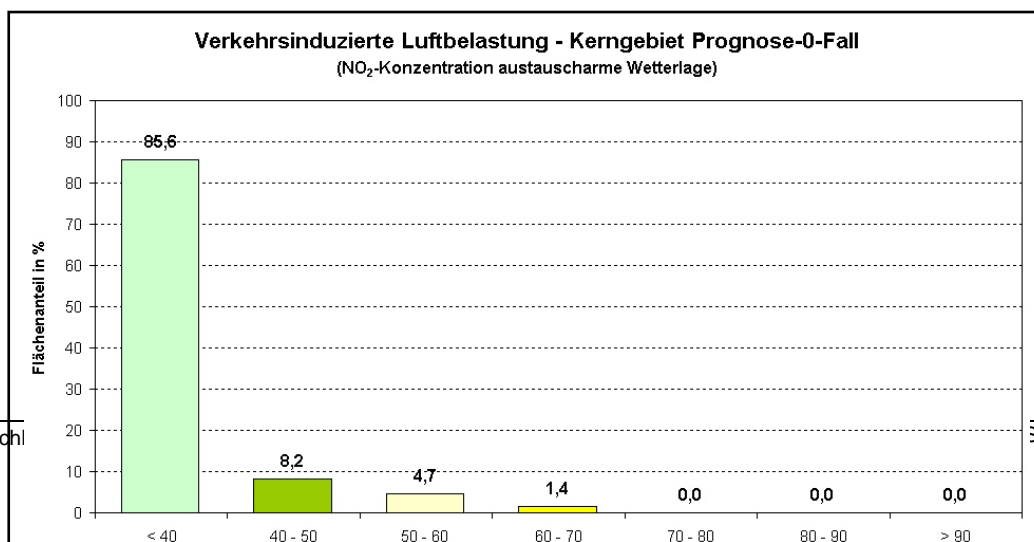


Abbildung 45: Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet  
Prognose-0 2020 (austauscharme Wetterlage)

Es zeigt sich, dass während austauscharmer Wetterlagen der Großteil des Kerngebietes zwar flächenhaft gering beaufschlagt wird, jedoch zahlreiche Straßenabschnitte in der Innenstadt vor allem im *Analysefall 2005* als potenziell lufthygienisch belastet eingeordnet werden können. Die Flächenbilanzierung für den Jahresmittelwert  $\text{NO}_2$  ist in den Abb. 46 und 47 dargestellt. Die Auswertung der Ergebnisse für den Jahresmittelwert haben gezeigt, dass 3,2 % der Fläche innerhalb des Kerngebietes von einer potenziellen Überschreitung des Langzeitgrenzwertes nach der TA LUFT (2002) betroffen sind.

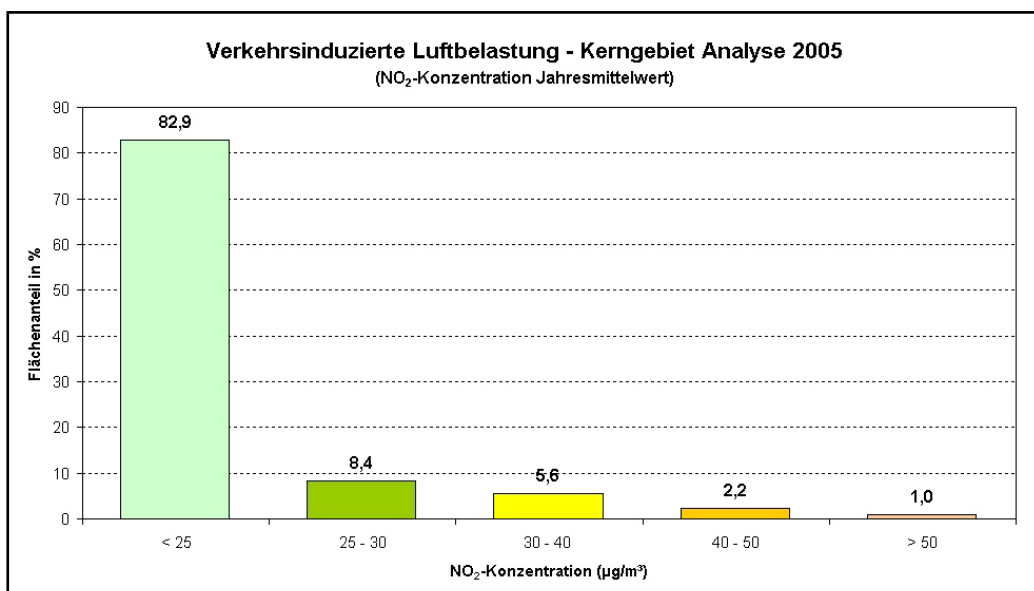


Abbildung 46: Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet  
Analyse 2005 (Jahresmittelwert)

Mittlere Konzentrationen zwischen 25 µg/m<sup>3</sup> und 40 µg/m<sup>3</sup>  $\text{NO}_2$  liegen auf 14,0 % der Fläche vor, während ein niedriges Niveau von weniger als 25 µg/m<sup>3</sup>  $\text{NO}_2$  mit ca. 83 % Flächenanteil dominiert. Diese Kategorie ist im *Prognose-0-Fall* mit 80 % Anteil ähnlich hoch vertreten, wenngleich die Klasse von 35 µg/m<sup>3</sup>  $\text{NO}_2$  bis 40 µg/m<sup>3</sup>  $\text{NO}_2$  nur noch auf weniger als 1 % der Kerngebietsfläche anzutreffen ist (Abb. 47).

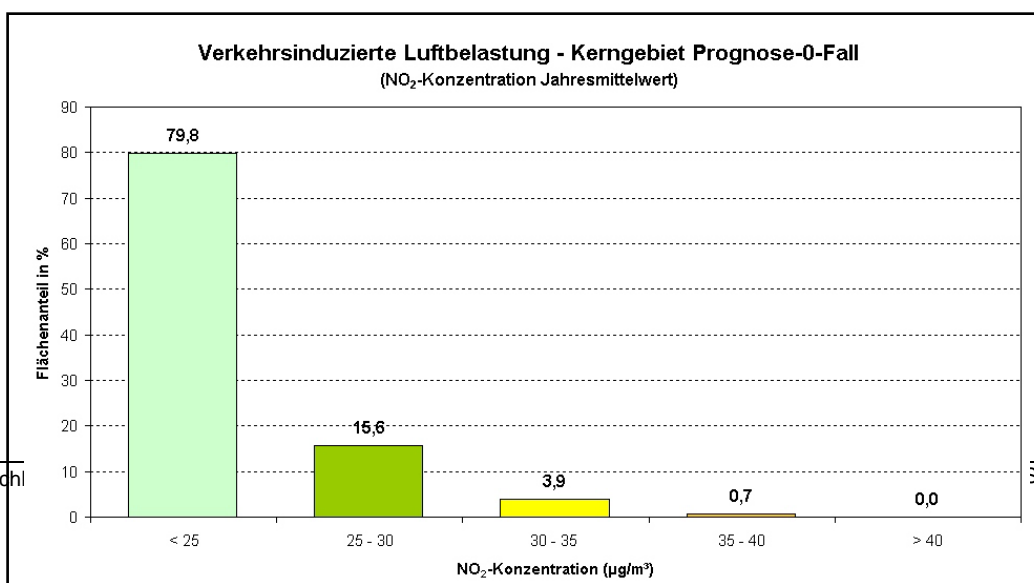


Abbildung 47: Flächenanteile der lufthygienischen Belastungssituation im Kerngebiet  
Prognose-0 2020 (Jahresmittelwert)

## 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 Trier 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 Trier. Somit bildet die Klimafunktionskarte den planungsrelevanten Ist-Zustand der Klimasituation ab. Die abgegrenzten klimatischen Funktionsräume sollen dazu beitragen

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

Die Klimafunktionskarte beinhaltet die klimaökologisch wichtigen Elemente und basiert auf der Analyse des klimatischen Ist-Zustandes des Stadtgebietes Trier. 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). Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden auch für die Szenarien Prognose-0 und Prognose-Plan im Jahr 2020 Klimafunktions- und Planungskarten erstellt. Auf sie wird im weiteren Text nicht gesondert eingegangen, da keine substantziellen Veränderungen im Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüge zu erwarten sind. Die Ausführungen beziehen sich somit auf den Ist-Zustand 2005. Im Kap. 8.4 (S. 79) werden die qualitativen Auswirkungen bis zum Jahr 2020 aber vergleichend zusammengestellt, während die Karten dem Anhang zu entnehmen sind.

Somit steht ein Ausgangspunkt zur Beurteilung von klimatischen Beeinträchtigungen bereit, die bei den geplanten Nutzungsänderung auftreten können. Darüber hinaus stellt die Bewertungskarten eine 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 Trier vorwiegend

Kaltluftabflüsse. Die Gesamtfläche der kaltluftproduzierenden Grünflächen beziffert sich auf etwa 8 938 Hektar, was einem Flächenanteil von rund 76 % des Stadtgebietes entspricht.

Dabei werden sich vor allem die Hangbereiche des Moseltals 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 Grünfläche mit hoher Kaltluftlieferung innerhalb der Kernstadt Trier ist der Hauptfriedhof hervorzuheben. Über die eigene Kaltluftproduktion hinaus dient er als Leitbahn und ermöglicht ein Vordringen der auf dem gegenüberliegenden Hangbereich abfließenden Kaltluft. Mit einer Gesamtfläche von ca. 3614 ha für die sehr hohe und 2583 ha für die hohe Kaltluftlieferung beträgt der Flächenanteil dieser Kategorie an der Gesamtgrünfläche ca. 40 % bzw. 29 %.

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. die Sportplätze am Moselstadion oder den Palastgarten. Diese Flächen können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den jeweiligen klimatischen Einwirkbereich vergrößern. Die Flächensumme dieser mittleren Kategorie beträgt ca. 1046 Hektar, was einem Anteil von ca. 12 % an der Gesamtgrünfläche entspricht.

Grünflächen, die durch eine *geringe Kaltluftlieferung* charakterisiert sind, haben mit 1696 Hektar einen Anteil von ca. 19 % am Grünflächenbestand. Dabei handelt es sich vor allem um die kleineren innerstädtischen Parkareale, Friedhöfe und nicht überbauten Ruderalflächen mit einer Größe von wenigen Hektar. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkbereich aus, da sie in eine insgesamt wärmere Bebauung eingebettet sind. Durch die isolierte Lage in der Bebauung weisen sie zudem keine Anbindung an vorhandene Leitbahnen auf.

Innerhalb von Belastungsbereichen können aber auch diese Flächen eine bedeutsame Funktion als klimaökologische Komfortinseln erfüllen, sofern sie ein Mosaik aus unterschiedlichen Mikroklimaten wie beispielsweise beschattete und besonnte Bereiche oder sogar kühlenden Wasserflächen aufweisen (Mikroklimavielfalt). Durch solche Eigenschaften sind diese im Allgemeinen frei zugänglichen Flächen insbesondere an Sommertagen mit einer hohen Einstrahlungsintensität und damit einher gehenden Wärmebelastung im Innenstadtbereich relevant.

Tabelle 25 fasst die ausgewiesenen Kategorien für den Ist-Zustand 2005 zusammen:

Kaltluftlieferung	Gesamtgröße der Klasse in Hektar	Anteil am Grünflächenbestand
Sehr hoch	3614	40 %
Hoch	2583	29 %
Mittel	1046	12 %
Gering	1696	19 %

Tabelle 25: Qualitative Einordnung der Kaltluftlieferung von Grünflächen im Stadtgebiet Trier

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. 5.4 beschrieben, ist die bioklimatische Belastungssituation der Baublöcke auf Basis des Parameters PMV (Predicted Mean Vote) als Maß für die Wärmebelastung ausgewiesen worden. Unter Berücksichtigung der verkehrsbedingten Immissionen ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Bereiche einerseits sowie unbelastete bzw. lediglich gering belastete andererseits. Letztere sind, durch 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. 61 % des Siedlungsraums durchlüftet.

Abbildung 48 zeigt in einem Ausschnitt aus der Klimafunktionskarte die Belastungssituation im südlichen Innenstadtbereich von Trier, wobei bioklimatisch *weniger günstige* Bereiche orange und *ungünstige* Areale violett gekennzeichnet sind. Dabei treten die Tiefenlinien von Olewiger Bach und Aulbach als Leitbahnen hervor (blaue Pfeile). Sie kennzeichnen Bereiche, wo die Kaltluftströmung kanalisiert wird und somit eine Leitbahnfunktionen vorliegt. Die angrenzende Bebauung ist meist durch *günstige* und *sehr günstige* Verhältnisse 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 Irsch *sehr günstige* bioklimatische Bedingungen auf.

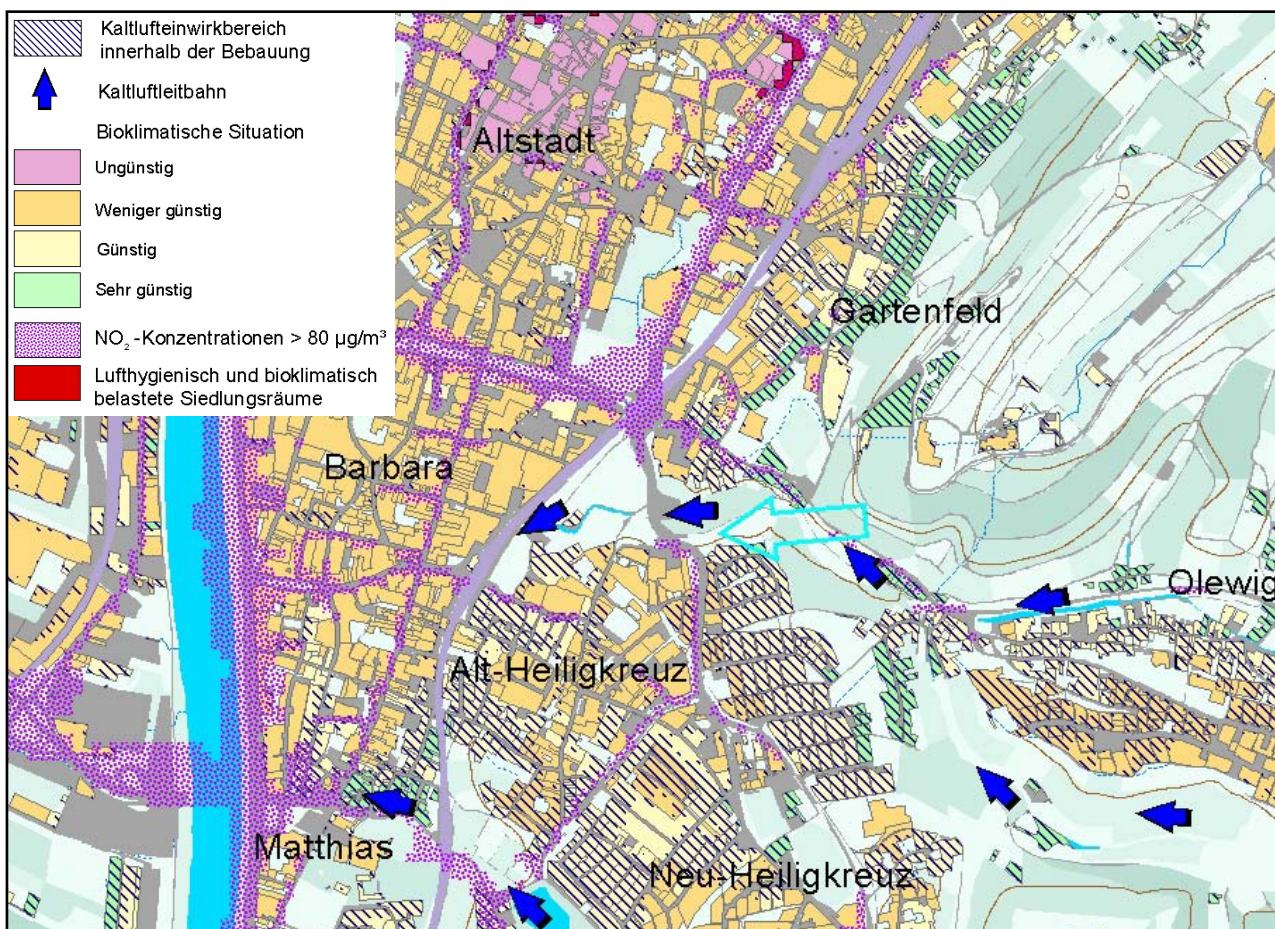


Abbildung 48: Klimafunktionen im Bereich Trier-Süd (Analysejahr 2005)

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.

Diesen Gunsträumen stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Im Stadtzentrum Trier dominieren *ungünstige bioklimatische Bedingungen*, die aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer unzureichenden Durchlüftung resultiert. Diese Belastung geht mit zunehmender Entfernung von der Innenstadt auf ein mäßiges Niveau zurück, so dass verbreitet *weniger günstige* Bedingungen vorliegen. Außerdem treten auch die größeren Gewerbe- und Industriearale im Stadtgebiet mit einer weniger günstigen Situation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie Teilbereiche der Innenstadt aufweisen. Dies betrifft vor allem die folgenden Areale:

- Industriegebiet Nord
- Gewerbegebiet Trier-West
- Gewerbegebiete entlang der Luxemburger Straße

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. 5.4). In den dörflich geprägten Stadtteilen kann die bioklimatische Belastungssituation aber generell als gering beurteilt werden, so dass hier *günstige* oder sogar *sehr günstige* Verhältnisse vorliegen.

Die Darstellung der *verkehrsbedingten Luftbelastung* entlang von Hauptverkehrsstraßen ergänzt das Spektrum auftretender Belastungen (vgl. Kap. 6.4, S. 62). 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 80 µg/m<sup>3</sup> Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) für das Analysejahr 2005 modelliert wurde. Dieses Niveau entspricht in etwa dem 98%-Wertes des Jahres 2005.

Wie in Kap. 6.4.2 (S. 65) beschrieben, stellt sich bis zum Jahr 2020 eine Abnahme der Emissionsfaktoren ein und führt somit zu einem insgesamt niedrigeren Immissionsniveau. Um diese Veränderungen angemessen wiederzuspiegeln, ist für das Bezugsjahr 2020 der Schwellenwert auf 50 µg/m<sup>3</sup> abgesenkt worden.

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



- Bundesstraßen 49 und 51
- Autobahnen 64 und 48
- Verlauf Nordallee - Theodor-Heuss-Allee
- Ostallee
- Kaiserstraße/Südallee

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 den Klimafunktionskarten als eigene Signatur enthalten. Diese Belastung ist vorrangig im Innenstadtbereich anzutreffen, so z.B. entlang von Abschnitten der Zuckerbergstraße, Walramsneustraße sowie Paulinstraße. Diese Belastungsbereiche erstrecken sich jedoch nur selten über den gesamten Straßenverlauf. In der Regel sind lediglich einzelne Straßenabschnitte bzw. Baublöcke betroffen. In den peripheren, dörflichen Stadtteilen ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Belastungsstufe als gering einzuschätzen.

### 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 13 Leitbahnen ausgewiesen, die sich im Kaltluftströmungsfeld mit überdurchschnittlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich abzeichnen. Meistens handelt es sich dabei um Täler von Zuflüssen der Mosel.

- Kylltal bei Ehrang
- Ruwertal
- Biewertal
- Park Nells Ländchen
- Aveler Bach
- Hauptfriedhof
- Sirzenicher Bach
- Olewiger Tal
- Aulbachtal im Stadtteil Weismark
- Talung westlich von Euren
- Zewener Bach
- Talung südlich von Feyen
- Talung des Gruberbachs

Von den ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen tritt das Olewiger Tal mit einer vergleichsweise komplexen Strömungsdynamik hervor. Genau genommen wirken hier die Kaltluftströmungen von Olewiger und Tiergartenbach sowie deren Nebentalungen zusammen und bündeln sich im Zusammenschluss beim Altbach. Daher wird dieser Leitbahnkomplex als eine Einheit betrachtet. Das Moseltal an sich hat weniger eine direkte als vielmehr eine übergeordnete Funktion. Die von den Hängen abfließende Kaltluft schwenkt meist in den Verlauf des Tals ein. Zu einem Eintritt in die angrenzende Bebauung kommt es jedoch nur dann, wenn deren Struktur ein Eindringen der Kaltluft ermöglicht und der durch den Abfluss vorhandene Massenimpuls stark genug ist.

Somit kann das Moseltal als eine großräumige Luftleit- und Ventilationsbahn angesehen werden. Als Leitbahnen, welche nicht an eine Tiefenlinie gekoppelt sind, sind der Hauptfriedhof und die Parkfläche Nells Ländchen anzusprechen. Hier handelt es sich um Grünflächen, welche auf den gegenüberliegenden Hängen abfließende Kaltluft in die Bebauung führen und somit eine Leitbahnfunktion aufweisen. 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.

In Folgendem wird auf die planerische Einordnung der klimaökologisch relevanten Elemente in Trier für den Ist-Zustand 2005 eingegangen, wobei für die Prognoseszenarien keine wesentlichen Veränderungen zu erwarten sind. Basis für die Beurteilung und Abgrenzung der Räume hinsichtlich ihrer planerischen Prioritäten sind die Simulationsergebnisse der Klimaparameter für eine austauscharme Strahlungswetterlage. Die Legende folgt dabei dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges.

### 8.1 Grün- und Freiflächen

Innerstädtische und siedlungsnaher 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 daher Grün- und Freiflächen mit Einfluss auf bioklimatisch belastete Siedlungsräume. Von dieser Kategorie sind insgesamt zwei Kaltluftentstehungsgebiete ermittelt worden, die sich aus mehreren Einzugsgebieten zusammensetzen und beiderseits der Mosel gruppiert sind. Als flächenmäßig größter Ausgleichsraum sind die Einzugsgebiete südöstlich von Trier anzusprechen. Von den hier entstehenden Kaltluftabflüssen profitieren insbesondere die Stadtteile Weismark, Heiligkreuz sowie Kürenz. Die Gesamtgröße dieser Teilflächen beziffert sich auf 1868 Hektar. Das mit ca. 853 ha zweitgrößte Kaltluftentstehungsgebiet mit einer hohen stadtklimatischen Bedeutung ist im Nordwesten Triers lokalisiert. Dabei handelt es sich um die Freiflächen im Raum Sirzenich-Pallien-Biewer. Die hier entstehende Kaltluft ist vorrangig für den Siedlungsraum des Stadtbezirks Maximin relevant.

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
- Vernetzung mit Freiflächen.

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 günstigen Belastungsniveau oder sogar sehr günstigem Kleinklima aufweisen, besitzen eine **mittlere stadtklimatische Bedeutung**. Sie sind ebenfalls nahe des Stadtkörpers lokalisiert und haben Bezug zu den weniger bioklimatisch belasteten, meist peripheren Siedlungsräumen. Dieser Kategorie wurden die folgenden Flächen zugeordnet:

- Freiflächen im nördlichen Stadtgebiet im Raum Ehrang-Ruwer-Eitelsbach mit ca. 1825 ha
- Unbebaute Flächen im Südwesten Triers im Bereich Euren-Zewen-Feyen mit ca. 1514 ha
- Flächen im Gebiet Kernscheid-Irsch als „Ergänzungsräume“ für die Kaltluftlieferung im Olewiger Tal mit ca. 618 ha

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 26 fasst die Flächenanteile der ausgewiesenen Kategorien zusammen:

Planerische Bedeutung	Anteil am Grünflächenbestand	Anteil am Stadtgebiet
Hoch	31 %	23 %
Mittel	46 %	34 %
Gering	23 %	17 %

Tabelle 26: Qualitative Einordnung der planerisch relevanten Grünflächen im Ist-Zustand 2005

Somit lassen sich ca. 31% des Grünflächenbestandes einer hohen planerischen Priorität zuordnen, während 46% eine mittlere Bedeutung aufweisen. Den mit 23% niedrigsten Anteil machen die Grün- und Freiflächen mit einer geringen Bedeutung aus.

## 8.2 Siedlungsräume

Die Siedlungsräume zeichnen sich durch eine unterschiedliche Bebauungsdichte aus. Daraus resultiert eine unterschiedliche *bioklimatische Belastung* während sommerlicher, austauscharmer Strahlungswetterlagen (vgl. Kap. 7.2, S. 71). Daraus folgt auch eine differenzierte planerische Betrachtung.

Wohnbebauung, welche eine *günstige* oder sogar *sehr günstige* bioklimatische Situation aufweist, ist meist durch eine offene Bebauungsstruktur, 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
- Vegetationsanteil erhalten

Belastungsbereiche weisen hingegen einen Durchlüftungsmangel, eine überdurchschnittliche Wärmebelastung und lokal auch eine lufthygienische Belastung auf. Unterschieden werden Siedlungsräume mit *weniger günstigen* bzw. *ungünstigen* Bedingungen. 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* (mäßig belastet) bzw. die *höchste Empfindlichkeit* (belastet) 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 Trier 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 Leitbahnbereichen besitzen die randlichen Tiefenlinien im Raum Euren sowie die Talungen im Bereich Ehrang/Ruwer eine mittlere planerische Priorität, da sie vergleichsweise gering belasteten Siedlungsflächen zugeordnet sind. Die übrigen Leitbahnen besitzen durch die Zuordnung zu Belastungsbereichen eine hohe planerische Bedeutung. Wie die Modellrechnungen zeigen, haben beide Prognose-Szenarien keinen relevanten Einfluss auf die Leitbahnausweisung.

Die Planungshinweise für die relevanten Strukturen sind in Tab. 27 zusammengefasst:

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

Tabelle 27: Planungshinweise für Grünflächen und Siedlungsräume

#### 8.4 Lokalklimatische Bedeutung der städtebaulichen Planungen bis zum Jahr 2020

Um die Auswirkungen der Planungen auf die Grünflächen und Siedlungsräume zu verdeutlichen, sind in den Tab. 28 und 29 die prozentualen Abweichungen der einzelnen Kategorien von Grün- und Siedlungsflächen, bezogen auf den Ist-Zustand 2005, aufgeführt. Wenngleich die Modellrechnungen die kleinräumigen Effekte der Baufelder auf die Klimaparameter deutlich gemacht haben, sind die Auswirkungen auf die Kaltluftlieferung der Grünflächen insgesamt gesehen eher gering. Wie Tab. 28 zeigt, geht die Spannweite der Abweichungen in der Kaltluftlieferung für das gesamte Stadtgebiet Trier nicht über  $\pm 0,6$  Prozentpunkte hinaus, was der intensiven Kaltluftdynamik im Stadtgebiet Trier Rechnung trägt. Die Zunahme der Kategorie *sehr hoch* lässt sich dadurch erklären, dass vorrangig Freiflächen mit einer *geringen* und *mittleren* Kaltluftlieferung überbaut werden, was den relativen Anteil der Klasse *sehr hoch* ansteigen lässt.

Kaltluftlieferung der Grünflächen	Anteil am jeweiligen Grünflächenbestand in %			Abweichung zur Analyse 2005 in %	
	Analyse 2005	Prognose-0 2020	Prognose-Plan 2020	Prognose-0 2020	Prognose-Plan 2020
Sehr hoch	40,4	40,9	41,0	0,5	0,6
Hoch	28,9	29,0	29,1	0,1	0,2
Mittel	11,7	11,4	11,2	-0,3	-0,5
Gering	18,9	18,5	18,6	-0,4	-0,3

Tabelle 28: Flächenbilanz der Kaltluftlieferung von Grünflächen in den Szenarien

Die Auswirkungen auf die bioklimatische Situation in den Siedlungsräumen zeigt Tab. 29. Dabei ist im Prognose-0-Fall ein leichter Anstieg von 2,6 Prozentpunkten in der Klasse *weniger günstig* zu beobachten. Im Szenario Prognose-Plan liegt hingegen ein Anstieg von 3,1 Prozentpunkten für die Kategorie *günstig* vor. Da die Verhältnisse in den größeren, randständigen Baufeldern wie Brubacher Hof und Zentenbüsch meist als *günstig* einzustufen ist, tragen sie zum Zuwachs dieser Kategorie bei. Gleiches gilt für die Umnutzung von Gewerbeflächen zu Wohnbebauung, was dann tendenziell mit einem geringeren Überbauungsgrad und günstigeren bioklimatischen Verhältnissen einher geht als dies im Ist-Zustand der Fall ist (z.B. Trier-West).

Bioklimatische Bewertung	Anteil am jeweiligen Siedlungsraum in %			Abweichung zur Analyse 2005 in %	
	Analyse 2005	Prognose-0 2020	Prognose-Plan 2020	Prognose-0 2020	Prognose-Plan 2020
Sehr günstig	22,0	19,8	19,7	-2,2	-2,3
Günstig	39,9	39,6	43,0	-0,3	3,1
Weniger günstig	37,1	39,7	36,0	2,6	-1,1
Ungünstig	1,1	0,9	0,8	-0,2	-0,3

Tabelle 29: Flächenbilanz der bioklimatischen Belastung von Siedlungsflächen in den Szenarien

Die Kategorie der bioklimatisch ungünstigen Siedlungsräume hat sich zwischen dem Ist-Zustand und den beiden Prognose-Szenarien absolut gesehen nicht geändert. Die leichte Abnahme von minus 0,2 % bzw. minus 0,3 % ist darauf zurückzuführen, dass die Größe des Siedlungsraums im Ganzen um etwa 215 ha (Prognose-0) bzw. weitere 273 ha (Prognose-Plan) zunimmt und sich dadurch der relative Anteil dieser Kategorie an der Gesamtfläche verringert. Da eine gesamtstädtische Bilanzierung aber nur bedingt aussagekräftig im Hinblick auf die jeweilige lokale stadtklimatische Wirkung ist, wurde zusätzlich in einer gesonderten Untersuchung jede einzelne Baufläche bewertet.

## 9 Fazit

Die vorliegende Untersuchung hat die klimaökologischen Funktionszusammenhänge im Stadtgebiet Trier 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. 49). Eine Flächenbilanzierung der vorliegenden Belastungsklassen ergibt für das Analysejahr 2005:

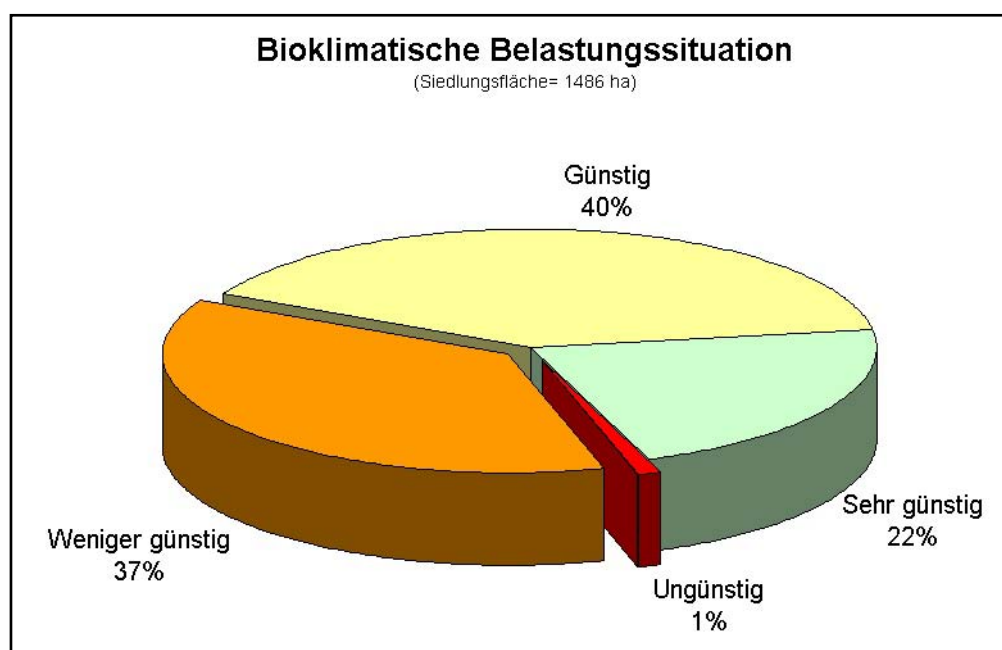


Abbildung 49: Flächenanteile der bioklimatischen Belastungssituation im Stadtgebiet

- Etwa 1 % der Siedlungsfläche sind als bioklimatisch ungünstig einzuordnen (Innenstadtbereich).
- 37 % sind weniger günstig.
- 40 % der Siedlungsfläche weist günstige Bedingungen auf.
- 22 % des Siedlungsraumes haben sogar sehr günstige Verhältnisse.
- Weniger als 1 % des Siedlungsraums ist bioklimatisch und zugleich lufthygienisch belastet.

Wie in Kap. 8.4 (S. 79) erläutert, sind die Auswirkungen auf die bioklimatischen Verhältnisse, welche durch die Planungen bis zum Jahr 2020 ausgelöst werden, eher gering. Die Abweichungen zum Ist-Zustand 2005 bewegen sich, gesamtstädtisch gesehen, im einstelligen Prozentbereich. Betrachtet man hingegen die lokale Ebene, können Planungsvorhaben in ihrem näheren Umfeld aber durchaus eine Verschlechterung der bioklimatischen Verhältnisse bewirken. Hinsichtlich der verkehrsbedingten Luftbelastung zeigt sich ein deutlicherer Unterschied, wie am Beispiel der Schadstoffkomponente Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) beschrieben wird. Hier führt der angenommene Rückgang der Emissionsfaktoren im Bezugsjahr 2020 zu einem niedrigeren Immissionsniveau als im Ist-Zustand 2005 (Kap. 6.5, S. 67).



Basierend auf den ermittelten Empfindlichkeiten von Siedlungsbereichen einerseits und Kaltluft produzierenden Freiflächen andererseits lassen sich für den Analysefall 2005 sowie die beiden Prognose-Szenarien im Jahr 2020 planungsbezogene Aussagen treffen.

Im Hinblick auf weitere Nutzungsintensivierungen im Stadtgebiet Trier 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

- AHAS, R. (1999): Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *International Journal of Biometeorology*, 42, 119-123.
- ARBEITSGRUPPE „Wirkung von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“ (2006): Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur gesundheitlichen Wirkung von Partikeln in der Luft. In: DIN, KRdL (Hrsg.): Feinstaub und Stickstoffdioxid - Wirkung - Quellen- Luftreinhaltepläne – Minderungsmaßnahmen, 15-68.
- ATKINSON, R.W., ANDERSON, H.R., SUNYER, J., AYRES, J., BACCINI, M., VONK, J.M., BOUMGHAR, A., FORASTIERE, F., FORSBERG, B., TOULOUMI, G., SCHWARTZ, J., KATSOUYANNI, K. (2001): Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions Results from APHEA 2 Project, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2001, 164, 1860-1866.
- BAKER, D.G., ENZ, J.W., PAULUS, H.J. (1969): Frequency, duration, commencement time and intensity of temperature Inversions at St. Paul - Minneapolis. *Journal of Applied Meteorology*, 8, 747 - 753.
- 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.
- BRUNS, E., HECHLER, P. (1998): Was kann die Phänologie zur Klimadiagnose beitragen? *Annalen der Meteorologie*, 37, 331-332.
- CHMIELEWSKI, F.-M. (2001): Rezente Veränderung der Lufttemperatur und der Niederschlagshöhe in Berlin Dahlem. *Agrarmeteorologische Schriften*, 9, Berlin, 1-15.
- CHMIELEWSKI, F.-M., RÖTZER, T. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101-112.
- CHMIELEWSKI, F.-M., RÖTZER, T. (2002): Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Clim. Res.*, 19, 257-264.
- DOCKERY, D.W., POPE, C.A., XU, X.P., SPENGLER, J.D., WARE, J.H., FAY, M.E., FERRIS, B.G., SPEIZER, F.E. (1993): An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759.
- 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.
- EU-RICHTLINIE 1999/30/EG des Rates vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (Amtsblatt EG L 163 S. 41), geändert durch Entscheidung 2001/744/EG der Kommission vom 17.10.2001 (ABl. EG L 278 S. 35).
- EU-RICHTLINIE 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Februar 2002 über den Ozongehalt der Luft (3. Tochterrichtlinie) (ABl. EG, L 67 S. 14).

- 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.
- GUDERIAN, R. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Umweltveränderungen. Atmosphäre Band 1A. Springer, Berlin.
- HÄCKEL, H. (2005): Meteorologie, 5. Auflage, Eugen-Ulmer, Stuttgart.
- HECHLER, P. (1990): Zu den Auswirkungen rezenter Klimaänderungen auf ausgewählte phänologische Phasen. Zeitschrift für Meteorologie, 40, 3, 171-178.
- HELBIG, A. (2002): Niederschlagsstruktur und Verdunstung im Raum Trier. In: Müller, P., S. Rumpf, H. Mohnheim (Herg.): Umwelt und Region - Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereichs 522, 21-28, Trier.
- HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., KERSCHGENS, M. J. (Hrsg.) (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. vollst. überarb. u. erg. Auflage. Springer-Verlag.
- HELBIG, A., K. LICHT, J. JUNK, J. BAREISS, UND J. LÜERS (2002): Regionalklima, Strömungsfeld und Ausbreitungsbedingungen im Raum Trier. Müller, P., Rumpf, S. Monheim H. (Hrsg.), Umwelt und Region - Umweltanalyse und Umweltmanagementstrategien für eine Nachhaltige Entwicklung im ländlichen Raum, SFB 522, 53-77.
- HENNIGES, Y., DANZEISEN, H., ZIMMERMANN, R.D. (2005): Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, 17, 1, 28-34.
- HOSLER, C.R. (1961): Low-Level inversion frequency in the contiguous United States. Monthly Wheater Review, 89, 9, 319-339.
- JUNK, J., HELBIG, A., LÜERS, J. (2003): Urban Climate and Air Quality at Trier, Germany. International Journal of Biometeorology, 47, 4, 230-238.
- KRAUS, H. (2004): Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie. 2. Aufl., Springer, Berlin.
- KREWSKI, D., BURNETT, R.T., GOLDBERG, M.S., HOOVER, K., SIEMIATYCKI, J., JERRETT, M., ABRAHAMOWICZ, M., WHITE, W.H. (2000): Reanalysis of the Haward Six Cities Study and the American Cancer Society Study of particulate air pollution and mortality. HEI Special Special Report, Health Effects Institute, Cambridge.
- KUHLBUSCH, TH. (2002): Korngrößenabhängige Untersuchungen von Schwebstaub und Inhaltsstoffen. Gerhard-Mercator-Universität Duisburg und Landesumweltamt NRW, Duisburg.
- KUTTLER, W., BARLAG, A.-B. (2003): Angewandte Stadtklimaforschung im Ruhrgebiet. In: Chmielewski, F.M., Foken, T. (Hrsg.): Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, Berlin, Bayreuth.
- LICHT, K. (2005): Die raumzeitliche Ausprägung des Klimas der Region Trier in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts – Eine regionalklimatische Analyse mit Trenduntersuchungen zum Nachweis einer Klimaänderung. Dissertation, Universität Trier.
- LOWRY, W. P. (1998): Urban effects on precipitation amount. Progress in Physical Geography, 22, 477-520.
- LÜERS, J. (2003): Agrarklimatologische und phänologische Auswertungen für das mittlere Moseltal – Auswirkungen des Klimawandels auf die Weinrebe im Moselraum. Dissertation Universität Trier.

- MALBERG, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie. 4. aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- MATZARAKIS, A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. In: Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg, Nr. 6, Freiburg.
- MENZEL, A., FABIAN, P. (1999). Growing season extended in Europe. Nature 397-659.
- MENZEL, A., JAKOBI, G., AHAS, R. (2003): Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. International Journal of Climatology 23, 7, 793 - 812.
- MÖLLER D. (2003): Luft. Walter de Gruyter, Berlin.
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- MUF (Ministerium für Umwelt und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz) (1997): Klimaschutz in Rheinland-Pfalz. Umweltbericht 1996, Landtagsdrucksache 12/5828 vom 16.12.1994. Mainz.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (2001): Klimatrends in Deutschland. In: DWD (Hrsg.) Klimastatusbericht 2001, Offenbach.
- POPE, C.A., BURNETT, R.T., THUN, M., CALLE, E.E., KREWSKI, D., ITO, K., THURSTON, G.D. (2002): Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure of fine particulate air pollution. JAMA 287, 1132-1141.
- RÖCKLE, R. und C.-J. RICHTER (1995): Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. PEF-Bericht 136, Forschungszentrum Karlsruhe.
- RODI, W. (1980): Turbulence models and their application in hydraulics. IAHR Section on Fundamentals of Division II: Experimental and mathematical fluid dynamics, Delft.
- RÖTZER, T., CHMIELEWSKI, F.-M. (2001): Phenological maps of Europe. Clim. Res. 18(3), 249-257.
- SAMET, J.M., ZEGER, S.L., DOMINICI, F., CURRIERO, F., COURSAK, I., DOCKERY, D.W., SCHWARTZ, J., ZANOBETTI, A. (2000): The national morbidity, mortality and air pollution study. Part I: morbidity, mortality and air pollution in the United States. Research Report Nr.94, Health Effects Institute, Cambridge.
- SCHÄDLER, G. et al. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. PEF Bericht 138, Forschungszentrum Karlsruhe.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2003a): Klimatologie, 2. neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Eugen Ulmer, Stuttgart.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2003b): Jahreszeitliche Struktur beobachteter Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland. In: Chmielewski, F.M., Foken, T. (Hrsg.): Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, Berlin, Bayreuth.
- ULRICH, W. (1987): Simulationen von thermisch induzierten Winden und Überströmungssituationen. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 57.
- UMWELTBUNDESAMT (2003a): Hintergrundinformation Sommersmog, Berlin.

- UMWELTBUNDESAMT (2003b): Kurzbericht – Ozonsituation 2003 in der Bundesrepublik Deutschland, Berlin.
- UMWELTBUNDESAMT (2004): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 2.1/Februar 2004. INFRAS AG, Bern Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin.
- UMWELTBUNDESAMT (2005): Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM), Berlin.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1995): ISO 7708. Luftbeschaffenheit - Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1997): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf.
- WHO (2004): Meta-analysis of time-series studies of Particulate Matter (PM) and Ozone (O<sub>3</sub>), Report of a WHO Task Group.
- WICHMANN, H.E., CYRYS, J., STÖLZEL, M., SPIX, C., WITTMACK, K., TUCH, T., PITZ, M., PETERS, A., WÖLKE, G., MENTZEL, N., HIETEL, B., SCHULZ, F., HEINRICH, J., KREYLING, W.G., HEYDER, J. (2002): Sources and Elemental Composition of Ambient Particles in Erfurt, Germany. ecomed Verlag, Landsberg, Lech.

**- Anhang -**