

Gesamtstädtische Klimaanalyse Krefeld

unter besonderer Berücksichtigung von vier Plangebieten

Durchgeführt im Auftrag der Stadt Krefeld,
Fachbereich Umwelt sowie Fachbereich Stadtplanung und Bauaufsicht

vorgelegt von:

Prof. Dr. rer. nat. W. Kuttler

Dipl. Landschaftsökol. A. Graf

Dipl. Umweltwiss. S. Blankenstein

Dr. rer. nat. A.-B. Barlag

Fachbereich 9

Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie

Universität Essen

Essen, im Juli 2003

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Kartenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Bedeutung des Stadtklimas.....	1
1.2 Untersuchungsanlass.....	1
2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	2
2.1 Naturräumliche und klimageographische Einordnung.....	2
2.2 Flächennutzung, Siedlungsstruktur und Verkehr	3
2.3 Plangebiete	4
3 Untersuchungsmethoden	5
3.1 Stationäre Messungen	9
3.1.1 Stationäres Klimamessnetz	9
3.1.2 NO ₂ -Messungen mit Passivsammlern	10
3.2 Mobile Messungen	12
3.2.1 Lufttemperaturmessfahrten.....	12
3.2.2 Lufthygienische Profilmessfahrten.....	12
3.2.3 Lufthygienische 24 h-Standmessungen.....	13
3.2.4 BETX – Profilmessungen.....	14
3.2.5 SF ₆ -Tracerausbreitungskampagnen	14
4 Ergebnisse	16
4.1 Repräsentativität des Messzeitraumes	16
4.1.1 Bestimmung und Auftreten austauscharmer Strahlungstage.....	17
4.2. Lufttemperatur	18
4.2.1 Mittleres Temperaturniveau im Untersuchungsgebiet	19
4.2.2 Unterschiede im Tagesgang der Lufttemperatur	20
4.2.3 Klimatologische Ereignistage.....	22
4.2.4 Intensität der Wärmeinsel zwischen Stadt und Umland	23
4.2.5 Temperaturverteilung während nächtlicher Temperaturmessfahrten	24
4.3 Luftfeuchtigkeit	30
4.4 Austauschverhältnisse	31
4.4.1 Durchschnittliche Strömungsverhältnisse.....	31
4.4.2 Häufigkeiten verschiedener Windrichtungen	32
4.4.3 Tages- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit	36
4.4.4 Auftreten von Schwachwinden	38
4.5 Kaltluftausbreitungskampagnen	42

4.5.1	Plangebiet Verberg	42
4.5.2	Plangebiet Fischeln Ost.....	45
4.5.3	Plangebiet Fischeln West	47
4.5.4	Plangebiet Hüls Südwest.....	51
4.6	Human-biometeorologische Verhältnisse.....	55
4.7	Lufthygienische Verhältnisse.....	57
4.7.1	NO ₂ -Messnetz	57
4.7.2	Lufthygienische Standmessungen.....	61
4.7.3	Lufthygienische Messfahrten	67
4.7.4	BETX-Profilmessungen	74
4.8	Zusammenfassende Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Ergebnisse.....	75
4.8.1	Bewertung der klimatischen Situation	75
4.8.2	Bewertung der lufthygienischen Situation.....	80
5	Synthetische Klimafunktionskarte und Planungshinweiskarte	82
5.1.	Synthetische Klimafunktionskarte.....	82
5.1.1	Klimatope.....	83
5.1.2	Klimatische Funktionen	86
5.1.3	Lufthygienische Funktionen.....	87
5.2	Planungshinweiskarte	88
6	Bereiche mit besonderer Planungsrelevanz.....	90
6.1	Plangebiete	90
6.1.1	Verberg	90
6.1.2	Fischeln Ost.....	91
6.1.3	Fischeln West	92
6.1.4	Hüls Südwest.....	94
6.1.4.1	Errichtung eines landwirtschaftlichen Betriebes	94
6.1.4.2	Geplantes Wohnbaugebiet Hüls Südwest	95
6.2	Weitere Gebiete besonderer Planungsrelevanz.....	96
7	Zusammenfassung.....	100
8	Literaturverzeichnis	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Windrichtungsverteilung an den DWD-Stationen Düsseldorf und Essen im Zeitraum 1971 bis 1980 (MURL 1989).	3
Abbildung 2: Kontinuierlich registrierende Klimafeststation Lindental (K4), Krefeld.	6
Abbildung 3: Messfahrzeug der Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie zur mobilen Erfassung lufthygienischer und meteorologischer Größen.	7
Abbildung 4: Relative Häufigkeit der Großwettertypen für den Messzeitraum 1.11.2001 bis 31.10.2002 im Vergleich zum Zeitraum 1881 bis 1998 (nach GERSTENGARBE & WERNER 1999).	16
Abbildung 5: Vergleich der durchschnittlichen Tagesgänge der Lufttemperatur im Gesamtzeitraum sowie an autochthonen Tagen im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	21
Abbildung 6: Isoplethen der Wärmeinselintensität anhand der Temperaturdifferenz zwischen den Standorten Innenstadt (K5) und Fischeln (K3) ($\Delta t_{u-r} = t_{K5} - t_{K3}$) im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2002 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: monatlicher Mittelwert der Lufttemperatur jeder Tagesstunde).	24
Abbildung 7: Temperaturverlauf an den Klimafeststationen während der drei nächtlichen Lufttemperaturmessfahrten am 4./5.1., 27./28.3. und 29./30.7. 2002, Krefeld.	25
Abbildung 8: Streckenverlauf der Temperaturanomalien der drei nächtlichen Temperaturmessfahrten am 4./5.1., 27./28.3. und 29./30.7. 2002 im Vergleich.	26
Abbildung 9: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten an verschiedenen Stationen während der nächtlichen Temperaturmessfahrt am 29./30.7. 2002, Krefeld.	27
Abbildung 10: Mittlerer Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	31
Abbildung 11: Windrichtungshäufigkeiten im Krefelder Untersuchungsgebiet. Blaue Signaturen zeigen den Gesamtzeitraum, rote die Strahlungstage (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Dreiminutenmittelwerte).	35
Abbildung 12: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 - 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	37
Abbildung 13: Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	37

Abbildung 14: Kumulative Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage Stundenmittelwerte).....	38
Abbildung 15: Jahresgänge der Schwachwindhäufigkeit ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) von Feststation Fischeln (K3) und Innenstadt (K5) (Messzeitraum: 1.1. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).....	40
Abbildung 16: Jahresgang der maximalen Dauer von Schwachwindepisoden (Windgeschwindigkeit $\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) an den Feststationen Fischeln (K3) und Stadtwald (K8) (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).....	41
Abbildung 17: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) an verschiedenen Stationen während der Tracerausbreitungskampagne Krefeld Verberg am 12.4. 2002 (1:40 bis 4:46 MEZ) im Rahmen der gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2002 bis 31.10. 2002).....	43
Abbildung 18: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) an verschiedenen Stationen während der Tracerausbreitungskampagne Fischeln Ost am 17.5. 2002 (1:20 – 4:00 MEZ) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	45
Abbildung 19: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) an verschiedenen Stationen während der Tracerausbreitungskampagne Fischeln West am 14.9. 2002 (0:00 bis 2:55 MEZ) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).....	48
Abbildung 20: Schwachwind-Richtungsverteilung ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) an Station Hüls Südwest (K6) sowie Windrichtungsverteilung am 30.9. 2002 (20:45-23:45 MEZ) auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).....	51
Abbildung 21: Mittlerer Tagesgang der PMV-Werte an sommerlichen Strahlungstagen im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.6. 2002 bis 31.8.2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	57
Abbildung 22: Jahresgang der NO_2 -Wochenmittelkonzentrationen an den Passivsammlern im Untersuchungsgebiet Krefeld sowie der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit (WG) an einer Vergleichsstation (K3-Fischeln) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	58
Abbildung 23: Berechnete NO_2 -Durchschnittskonzentrationen an den Standorten der neun Passivsammler im Untersuchungsgebiet der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld während des Zeitraumes vom 29.10. 2001 bis 5.11. 2002.....	60

Abbildung 24: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Minutenmittelwerten in 10 m ü. Gr. während der vier lufthygienischen 24 h-Standmessungen im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	61
Abbildung 25: Messdaten der vier 24 h-Standmessungen (15-Minuten-Mittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	63
Abbildung 26: BETX-Konzentrationen während der vier 24 h-Standmessungen (integrierende Stundenmittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	64
Abbildung 27: Spurenstoffkonzentrationen während der Tracerausbreitungskampagnen Verberg und Fischeln Ost (15-Minuten-Mittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	66
Abbildung 28: Stundenmittel der O ₃ -Konzentration an der LUQS-Messstation Krefeld-Linn am 29.7. 2002 sowie Polynom zur Interpolation (x: Zeit in Tagen).	68
Abbildung 29: BETX-Konzentrationen während der Profilmessungen am 25.6., 29.7. und 14.8. 2002 im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flächenbilanz des aktuell gültigen Flächennutzungsplans und des Entwurfes zum neuen Flächennutzungsplan der Stadt Krefeld (STADT KREFELD 2002).	4
Tabelle 2: Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen im Krefelder Stadtgebiet während austauscharmer Wetterlagen.	7
Tabelle 3: Lage, Merkmale und Messgeräteausstattung der Stationsstandorte im Krefelder Untersuchungsgebiet.	10
Tabelle 4: Übersicht der Datenverfügbarkeit des Krefelder Stationsnetzes im Zeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002 bezogen auf die Rohdaten in Form von Dreiminutenmitteln.	10
Tabelle 5: Analysemethoden des mobilen Messlabors.	13
Tabelle 6: Statistische Angaben zu ausgewählten Kenngrößen der Lufttemperatur des Messnetzes im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	20
Tabelle 7: Anzahl klimatologischer Ereignistage an den Klimafeststationen in Krefeld innerhalb des Messzeitraumes 1.11. 2001 bis 31.10. 2002.	23

Tabelle 8: Statistische Angaben zur relativen Luftfeuchtigkeit im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	30
Tabelle 9: Statistische Angaben zu Windgeschwindigkeit [m s^{-1}] und Windrichtungshäufigkeit [%] im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	32
Tabelle 10: Monatliche relative Häufigkeiten von Schwachwindstunden ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	39
Tabelle 11: Maximale Dauer von Schwachwindepisoden im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte)	40
Tabelle 12: Abgrenzung von windrichtungssektorenabhängigen Wirkgebieten für den SF_6 -Emissionspunkt „Hüls Südwest“ in Abhängigkeit der Flächennutzung in Lee und Häufigkeit dieser Sektoren an Feststation Hüls Südwest (K6), Krefeld (Messzeitraum: 1.11.2001 bis 31.10.2002)	54
Tabelle 13: Übersicht über statistische Kennwerte der sommerlichen Wärmebelastung (PMV) im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.6. 2002 bis 31.8. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).	56
Tabelle 14: Abhängigkeit der NO_2 -Konzentrationen an Station Innenstadt (K5) vom Großwettertyp im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum 1.11.2001 bis 31.10.2002)	59
Tabelle 15: Maximale Immissionskonzentrationen (MIK) sowie gesetzliche Grenz- und Schwellenwerte nach 22. BImSchV (2002) für die untersuchten Spurenstoffe.....	65
Tabelle 16: Bewertungsgrenzen verschiedener klimatologischer Kennwerte basierend auf den gedrehten Differenzen zwischen Maximum- und Minimumwerten der betrachteten klimatischen Kenngrößen.....	77
Tabelle 17: Ergebnisse der Bewertung thermischer, austauschrelevanter und humanbiometeorologischer Verhältnisse im Krefelder Untersuchungsgebiet bezogen auf den Zeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002.....	78
Tabelle 18: Kennwerte der über drei Messfahrten (20.11. 2001, 25.4. 2002, 29.7.2002) gemittelten Streckenabschnittsmittelwerte von CO , NO und NO_2	80

Kartenverzeichnis

Karte 1: Überblick über die Lage der Klimafeststationen und Messeinsätze zur Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	8
Karte 2: Isanomalienkarte der nächtlichen Lufttemperaturverteilung im Untersuchungsgebiet der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld auf Basis der Temperaturmessfahrt am 29./30.7. 2002.	28
Karte 3: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 12.4. 2002 (1:40 - 4:46 MEZ) im Plangebiet Verberg im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2002 bis 31.10. 2002).	44
Karte 4: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 17.5. 2002 (1:20 - 4:00 MEZ) im Plangebiet Fischeln Ost im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002)	46
Karte 5: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 14.9. 2002 (0:00 – 2:55 MEZ) im Plangebiet Fischeln West im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	50
Karte 6: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 30.9. 2002 (20:45-23:35 MEZ) im Plangebiet Hüls Südwest im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	53
Karte 7: CO-Streckenabschnittsmittelwerte während der lufthygienischen Messfahrten am 20.11. 2001, 25.4. und 29.7. 2002 zur Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	70
Karte 8: NO-Streckenabschnittsmittelwerte während der lufthygienischen Messfahrten am 20.11. 2001, 25.4. und 29.7. 2002 zur Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	71
Karte 9: NO ₂ -Streckenabschnittsmittelwerte während der lufthygienischen Messfahrten am 20.11. 2001, 25.4. und 29.7. 2002 zur Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	72
Karte 10: O ₃ -Streckenabschnittsmittelwerte der lufthygienischen Messfahrt am 29.07.2002 sowie Verhältnis zur gleichzeitig an der LUQS-Station Linn des Landesumweltamtes NRW herrschenden Konzentration im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).	73
Synthetische Klimafunktionskarte Krefeld	im Anhang
Planungshinweiskarte Krefeld	im Anhang

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Bedeutung des Stadtklimas

Das Stadtklima hebt sich durch charakteristische Eigenschaften vom unbebauten Umland ab. Die Umwandlung der natürlichen Bodenoberflächen in überwiegend versiegeltes Stadtgebiet, ein geringer Vegetationsanteil, thermische Trägheit der Oberflächenmaterialien, Oberflächenvergrößerung durch Bauungsstrukturen sowie Emissionen aus Industrie, Gewerbe, Verkehr und Hausbrand wirken auf die Lebensqualität des Menschen ein, indem aus den Wechselwirkungen zwischen Bebauung und technischen Aktivitäten einerseits und dem regionalen Klima andererseits die lokalen klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse modifiziert werden. Eine derartige Stadtklimaproblematik prägt sich während austauscharmer Wetterlagen besonders aus und kann eine Minderung der Lebensqualität in der Stadt nach sich führen (KUTTLER 1998).

Als Rechtsbegriffe der Umweltschutzgesetzgebung sind in Hinblick auf die Bauleitplanung die Belange „Klima und Luft“ in der Stadt- und Regionalplanung zu berücksichtigen (z.B. § 1 Abs. 5 Nr. 7, BauGB (1997), §2 Abs. 1 Nr. 2 UVP (2001)). Ferner sind Entscheidungshilfen für die Bauleitplanung in Form von Bewertungen des klimatischen und lufthygienischen Ist-Zustandes städtischer Räume erforderlich, die vorzugsweise durch Stadtklimaanalysen, einschließlich entsprechender Sonderuntersuchungen, erbracht werden.

Klimaanalysen geben für den Planungsprozess Informationen über die Klimate der bebauten und unbebauten Flächen sowie über die Klimate von Flächen mit speziellen Klimateigenschaften, d.h. über klimatische bzw. lufthygienische Lokal- oder Fernwirkungen. Daran schließt sich die bewertende Darstellung der Klimafunktionen einzelner Flächen und des urbanen Flächengefüges in Synthetischen Klimafunktionskarten (BARLAG 1993) sowie die Darstellung von Planungshinweisen zum Erhalt positiver und zur Minimierung negativer Klimafunktionen an.

1.2 Untersuchungsanlass

Als in der Bauleitplanung zu berücksichtigende Güter beeinflussen Klima und Luftqualität unmittelbar die Lebensqualität des Menschen. Anlässlich der geplanten Neuaufstellung des Flächennutzungsplans beauftragte die Stadtverwaltung Krefeld, vertreten durch den Fachbereich Umwelt und den Fachbereich Stadtplanung und Bauaufsicht, mit Auftrag vom 8.12./14.12.2000 sowie 26.6./11.6.2001, die Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie der Universität Essen mit der Erstellung einer Gesamtstädtischen

Klimaanalyse. Zusätzlich wurden vier Plangebiete benannt, für die konkrete Änderungen der Flächennutzung vorgesehen sind. Der vorliegende Bericht präsentiert die Ergebnisse der stationären und mobilen Messungen und gibt darauf aufbauend Planungshinweise zur Erhaltung positiver Klimafunktionen bzw. zur Minimierung negativer Auswirkungen auf das Klima, die durch Flächenumwidmungen entstehen könnten.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

2.1 Naturräumliche und klimageographische Einordnung

Die Stadt Krefeld ($\rho = 6^{\circ}35'E$ und $\lambda = 51^{\circ}20'N$) liegt linksrheinisch in der Niederrheinischen Tiefebene, nahe der niederrheinischen Bucht, und wird durch die Niederterrassenstufe des Rheins zweigeteilt. Das Gelände steigt vom 23 m ü. NN gelegenen Rheinufer auf etwa 40 m ü. NN im Bereich der westlichen Stadtgrenze an, höchste Erhebungen sind der Hülser Berg mit 63 m Ü. NN und die künstlichen Erhebungen Inrather Berg (87 m ü. NN) und Kapuzinerberg (77 m ü. NN) im Nordwesten.

Makroklimatisch ist das Stadtgebiet durch den atlantisch-maritimen Klimabereich Nordwestdeutschland geprägt. Die Winter sind vergleichsweise mild und schneearm, die Sommer mäßig warm. Die Niederschlagsverteilung ist über das Jahr gleichmäßig verteilt, mit einem Maximum im Sommer. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 10 °C, das langjährige Mittel des Jahresniederschlags 760 mm. Überwiegend milde Winter und relativ kühle Sommer ergeben sich aus dem wetterprägenden Einfluss von Atlantik und Nordsee sowie der schützenden Wirkung des Bergischen Landes bei kalten Ostwetterlagen (EMONDS 1981, MURL 1989). Die regionaltypische Windrichtungsverteilung mit Maxima aus Südwest sowie einer Komponente parallel zum Rheintal im Falle Düsseldorfs ist Abbildung 1 zu entnehmen.

Hinsichtlich der großräumigen lufthygienischen Lage grenzt Krefeld im Nordosten an den Belastungsraum Duisburg. Luftverunreinigungen aus den Räumen Düsseldorf im Südosten und Mönchengladbach in südlicher Richtung dürften bei entsprechender Windrichtung die Immissionssituation im Krefelder Stadtgebiet beeinträchtigen.

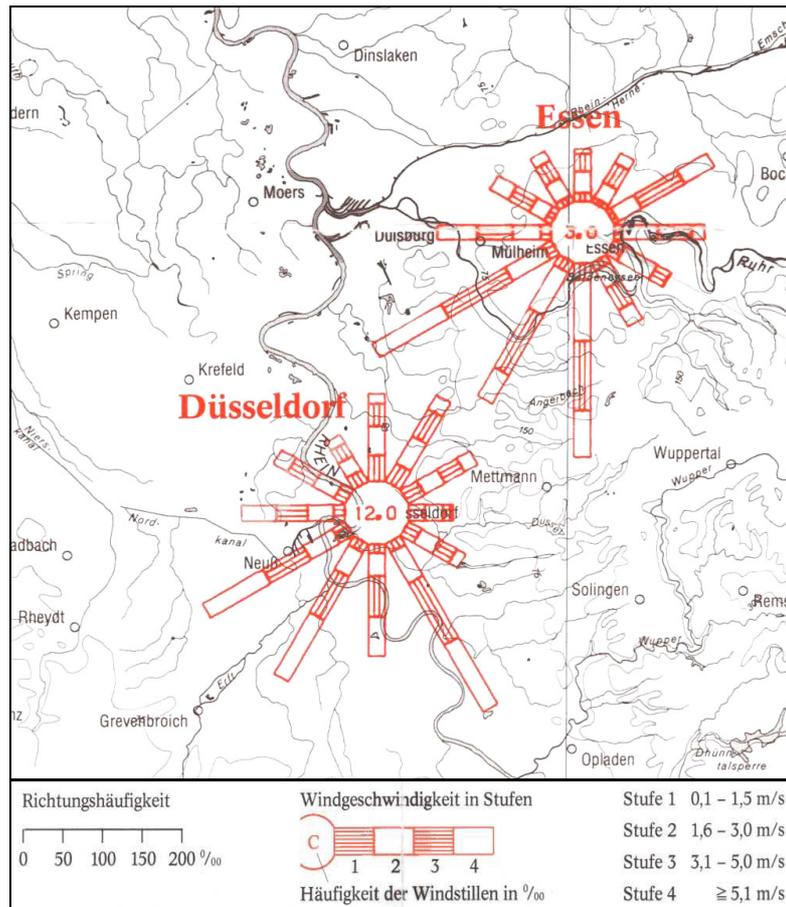


Abbildung 1: Windrichtungsverteilung an den DWD-Stationen Düsseldorf und Essen im Zeitraum 1971 bis 1980 (MURL 1989).

2.2 Flächennutzung, Siedlungsstruktur und Verkehr

Die kreisfreie Stadt Krefeld zählt rund 238.000 Einwohner auf einer Fläche von 138 km² (STADT KREFELD 2002). Die ältesten Siedlungskerne Krefelds sind Uerdingen, Linn, Hüls und Fischeln sowie der Bereich innerhalb der Wälle. Das **Stadtzentrum** liegt leicht exzentrisch zur Stadtfläche in südwestlicher Lage. Vor allem dort, in geringerer Ausdehnung auch in den älteren Siedlungsbereichen, ist die Bebauung großflächig stark verdichtet. In den Randgebieten überwiegt aufgelockerte Wohnbebauung. **Industrie- und Gewerbegebiete** sind schwerpunktmäßig und großflächig im Nordosten der Stadt im Stadtteil Uerdingen, entlang des Rheinufer nahe dem stadteigenen Industriehafen sowie in Fischeln angesiedelt. Weitläufige Bereiche im Norden und Süden der Stadt stehen unter **landwirtschaftlicher Nutzung**, vergleichsweise gering ist der Anteil an **Wäldern**. Im überregionalen **Verkehrsnetz** liegt Krefeld südlich der BAB 40 und nördlich der BAB 44. Die BAB 57 führt in Nordsüdrichtung direkt durch das Stadtgebiet. Tabelle 1 zeigt

die derzeitige und geplante Flächenbilanz Krefelds laut Flächennutzungsplan (STADT KREFELD 2002).

Tabelle 1: Flächenbilanz des aktuell gültigen Flächennutzungsplans und des Entwurfes zum neuen Flächennutzungsplan der Stadt Krefeld (nach STADT KREFELD 2002).

Art der Nutzung	Bestehender Flächen-nutzungsplan		Entwurf zum Flächennutzungsplan nach Beschluss des Planungsausschusses vom 7. November 2001			
	Fläche in Hektar	in Prozent	Fläche in Hektar	in Prozent	Differenz in Hektar	Differenz in Prozent
Wohnbauflächen	2.668,9	19,4	2.718,2	19,7	49,3	1,8
Mischgebiete	350,0	2,5	458,6	3,3	108,6	31,0
Kerngebiete	81,7	0,6	85,4	0,6	3,7	4,5
Flächen f. Gemeinbedarf ¹⁾	324,8	2,4	250,5	1,8	-74,3	-22,9
Zwischensumme	3.425,4	24,9	3.512,7	25,5	87,3	2,5
Gewerbegebiete	545,0	4,0	557,3	4,0	12,3	2,3
Industriegebiete	959,0	7,0	1.075,1	7,8	116,1	12,1
Sondergebiete	76,6	0,6	57,1	0,4	-19,5	-25,5
Straßenverkehrsflächen ²⁾	534,1	3,9	577,1	4,2	43,0	8,1
Fl. f. ruhenden Verkehr	32,5	0,2	30,4	0,2	-2,1	-6,5
Bahn-/Luftverkehrsfl. ³⁾	221,9	1,6	218,0	1,6	-3,9	-1,8
Ver- und Entsorgungsl.	97,1	0,7	94,9	0,7	-2,2	-2,3
Summe allgemeiner Siedlungsbereich	5.891,6	42,8	6.122,6	44,4	231,0	3,9
Grünflächen	1.565,1	11,4	1.862,4	13,5	297,3	19,0
Flächen für Landwirtschaft	4.660,3	33,8	3.865,5	28,0	-794,8	-17,1
Forstwirtschafts-/Waldflächen	1.278,2	9,3	1.555,5	11,3	277,3	21,7
Wasserflächen	357,9	2,6	375,0	2,7	17,1	4,8
nicht überplante Flächen	15,1	0,1	0,0	0,0	-15,1	-100
Insgesamt	13.768,2	100	13.781,0	100		

¹⁾ im Entwurf ohne Kindergärten, Altenheime und Post

²⁾ beim derzeitigen FNP: Hauptverkehrsstraßen / beim Entwurf: Vorbehaltsstraßennetz

³⁾ inkl. 19,1 ha Flächen im sog. Moderationsverfahren

2.3 Plangebiete

Für die vier Plangebiete (vgl. Karte 1) sieht die Stadt Krefeld eine deutliche Änderung der Flächennutzung vor. Für diese Flächen wurde eine detaillierte Untersuchung des klimatischen und lufthygienischen Ist-Zustandes vereinbart. Folgende Areale wurden untersucht:

1. Als Sonderuntersuchungsfläche **Verberg** werden im Folgenden das derzeit überwiegend landwirtschaftlich genutzte Gebiet zwischen den Stadtteilen Verberg, Stadtwald, Gartenstadt und Bockum und die daran angrenzenden Siedlungsflächen bezeichnet. Der

von Norden in das Siedlungsgebiet vorstoßende Freiraum wurde von EMONDS (1981) seinerzeit als potentielle Ventilationsbahn und die Bebauung an der Zwingenbergstraße als Strömungshindernis ausgewiesen. Innerhalb dieses Gebietes soll eine südlich der B 509 gelegene Fläche (²⁵42 rechts, ⁵⁶92 hoch) von etwa 8 ha laut FNP-ENTWURF (2002), abweichend von den Vorgaben des vorangehenden Flächennutzungsplanes (FNP 2001), als Waldfläche ausgewiesen werden. Eine zwischenzeitlich ebenfalls geplante Ausweisung eines Mischgebietes entlang der Werner-Voß-Straße ist im FNP-ENTWURF (2002) nicht enthalten.

2. Das Wohnbaugelände **Hüls Südwest**, das mit etwa 47 ha Fläche bereits im vorangegangenen Flächennutzungsplan ausgewiesen ist, aber bislang nicht realisiert wurde (STADT KREFELD 2002), wurde ebenfalls als Sonderuntersuchungsfläche benannt. Zusätzlich besteht die Absicht, auf einer im Landschaftsplan (12. Änderung, STADT KREFELD 2002) als klimatisch relevant ausgewiesenen Freifläche zwischen der oben genannten Wohnbaufläche und einem im FNP-ENTWURF (2002) neu ausgewiesenen Gewerbe- und Industriegebiet einen landwirtschaftlichen Betrieb zu errichten. Der geplante Standort liegt nördlich der Kreuzung Venloer Straße / Drügstraße (²⁵36 rechts, ⁵⁶91 hoch).

Zwei weitere Sonderuntersuchungsflächen stehen im Zusammenhang mit Änderungen am Rand des Stadtteils Fischeln:

3. Das früher geplante 78 ha große und etwa 3700 Wohneinheiten umfassende Wohngebiet **Fischeln Ost** ist zwar im derzeitigen FNP-ENTWURF (2002) nicht mehr enthalten; dennoch blieb der Auftrag zur Behandlung des entsprechenden Geländes als Sonderuntersuchungsfläche bestehen.

4. Das Sonderuntersuchungsgebiet **Fischeln West** bezeichnet den Bereich um die westlich und südlich des Ortskernes von Fischeln gelegenen Neuausweisungen von Wohnbau- und Gewerbeflächen. Dabei schließt sich die geplante Wohnbaufläche unmittelbar an den Stadtrand an. Sie soll durch einen schmalen Streifen von unter landwirtschaftlicher Nutzung verbleibenden sowie als Grünflächen auszuweisenden Flächen von den neuen Gewerbe- und Industrieflächen entlang der BAB 44 sowie im Westen getrennt sein.

3 Untersuchungsmethoden

Die Messungen zur Gesamtstädtischen Klimaanalyse sowie zu den vier Plangebietern umfassen sowohl stationäre als auch mobile meteorologische und lufthygienische

Erhebungen und wurden teils für das gesamte Stadtgebiet, teils speziell für die benannten Sonderuntersuchungsflächen durchgeführt. Die Messungen wurden in der Zeit vom 1.11.2001 bis 31.10.2002 vorgenommen. Im einzelnen handelte es sich um:

- Acht Klimafeststationen innerhalb verschiedener Flächennutzungstypen, an denen Windrichtung und -geschwindigkeit in 4 m Höhe, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe gemessen wurden,
- neun Passivsammler zur Ermittlung des NO₂-Gehaltes der Luft an den acht Klimafeststationen und einer LUQS-Messstation des Landesumweltamtes NRW, Essen,
- drei nächtliche Lufttemperaturmessfahrten,
- drei lufthygienische Profilmessfahrten,
- drei BETX-Profilmessungen an ausgewählten Standorten,
- vier lufthygienische 24 h-Standmessungen und
- vier SF₆-Tracerausbreitungskampagnen.

Die Angaben von Uhrzeiten erfolgen einheitlich in MEZ, um Verschiebungen durch die Sommerzeit zu vermeiden. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine der in Krefeld errichteten Klimafeststationen, Abbildung 3 das eingesetzte Messfahrzeug, das zugleich ein mobiles Messlabor darstellt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den Terminen der einzelnen Messungen, Karte 1 zu ihrer Lage und der der Klimafeststationen.



Abbildung 2: Kontinuierlich registrierende Klimafeststation Lindental (K4), Krefeld.



Abbildung 3: Messfahrzeug der Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie zur mobilen Erfassung lufthygienischer und meteorologischer Größen.

Tabelle 2: Stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen im Krefelder Stadtgebiet während austauscharmer Wetterlagen.

Messung	Ort	Datum
Lufttemperaturmessfahrt	gesamtes Stadtgebiet	4./5.1.02
		27./28.03.02
		29./30.07.02
Lufthygien. Profilmessfahrt	gesamtes Stadtgebiet	20.11.01
		25.4.02
		29.7.02
BETX-Profil-Messungen	ausgesuchte Standorte	25.6.02
		29.7.02
		14.8.02
SF ₆ -Traceruntersuchung	Verberg	11./12.4.02
	Fischeln Ost	16./17.5.02
	Fischeln West	13./14.9.02
	Hüls	30.9./1.10.02
24 h-Standmessung	Innenstadt	25.6.02
	Verberg	14.8.02
	Fischeln West	14.9.02
	Hüls	30.9./1.10.02

Karte 1: Übersicht über die Lage der Feststationen und Messeinsätze zur Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11.2001 bis 31.10.2002)

Legende

SF6-Emissionspunkte

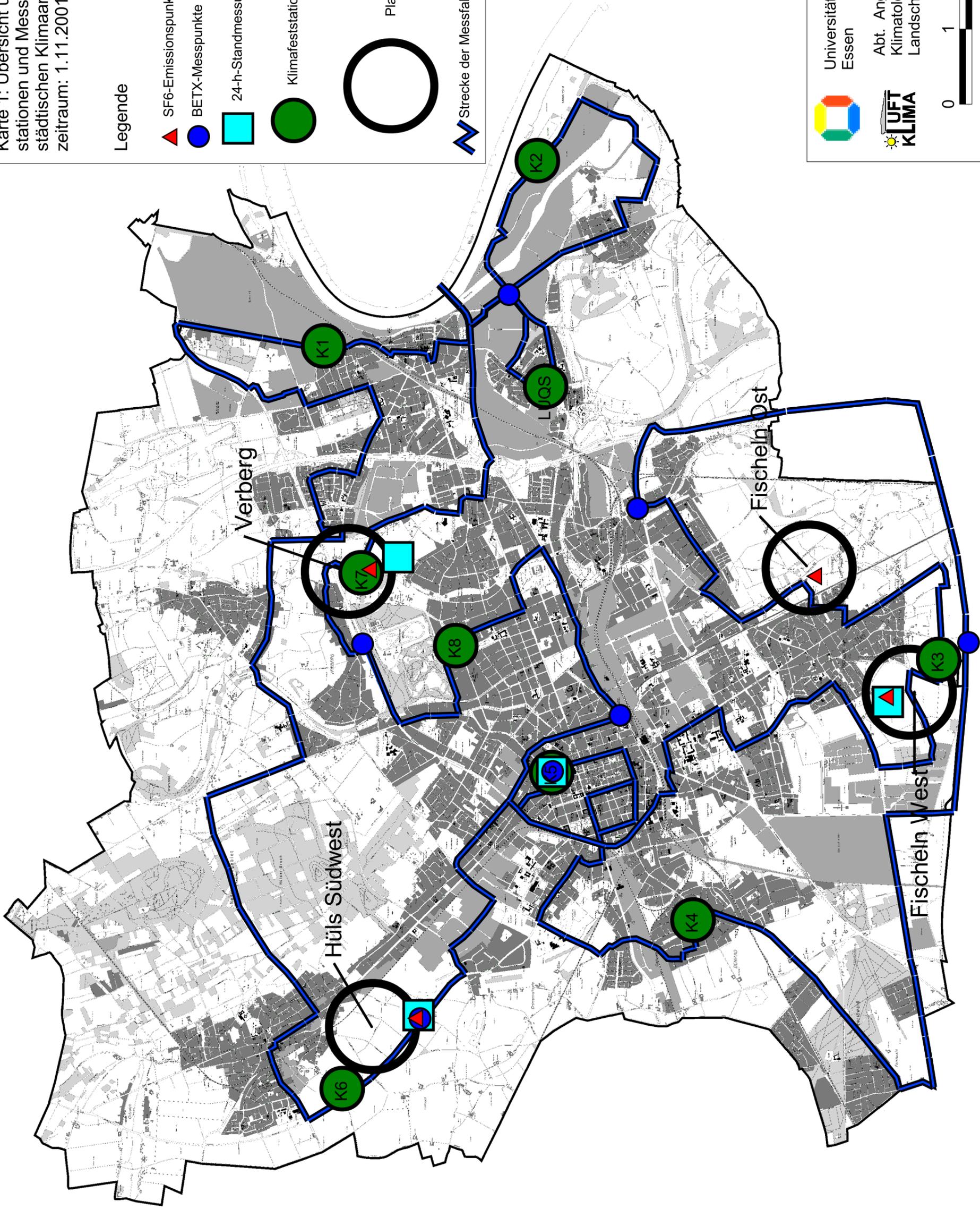
BETX-Messpunkte

24-h-Standmessungen

Klimafeststationen / Passivsammler

Plangebiete

Strecke der Messfahrten



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie

0 1 2 Kilometer



3.1 Stationäre Messungen

Stationäre Messungen ermöglichen eine zeitlich hoch aufgelöste Datenerhebung an einem festen Ort. Dabei entscheidet die Dichte eines Stationsnetzes über die Güte daraus abzuleitender flächenhafter Aussagen. Mobile Messungen während ausgesuchter Wetterlagen verdichten die Flächeninformation. Mit den auf diese Weise gewonnenen Daten und einer Analogieschlussbetrachtung, die die beeinflussenden Klimafaktoren wie Oberflächenform und Flächennutzung berücksichtigt, können zuverlässige Aussagen zu stadtklimatischen und lufthygienischen Charakteristika eines urbanen Untersuchungsraumes unter Berücksichtigung des zeitlich-räumlichen Gefüges getroffen werden.

3.1.1 Stationäres Klimamessnetz

Innerhalb des Untersuchungsgebietes wurde für den Zeitraum vom 1.11.2001 bis 31.10.2002 ein Stationsmessnetz betrieben, das die Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (2 m ü. Gr.), Windgeschwindigkeit und Windrichtung (4 m ü. Gr.) sowie an Station Fischeln (K3) in den Monaten Juni, Juli und August 2002 die Globalstrahlung (2 m ü. Gr.) kontinuierlich registrierte. Die Lage der acht Klimafeststationen (Fa. Thies) wurden so gewählt, dass sie typische Flächennutzungen unter Berücksichtigung der verfügbaren Standorte abdeckten (Tabelle 3).

Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit wurden mit Thermohygrogebern (jeweils bestehend aus einem Pt-100-Widerstandsthermometer und einer Haarharfe) erfasst, wobei eine Wetterhütte die Sensorik vor Strahlungs- und Witterungseinflüssen schützte. Die Windverhältnisse wurden mittels Windfahne und Schalenstern, die Globalstrahlung mit einem Pyranometer gemessen.

Die automatische Messwerterfassung erfolgte mit Dataloggern (Fa. Thies), die die in 15-s-Intervallen abgefragten Messgrößen als Dreiminutenmittelwerte auf Speicherbausteinen (Eproms) ablegten. Die Eproms wurden wöchentlich ausgelesen und die Daten auf Plausibilität überprüft. Die abschließende Auswertung basiert auf den aus den Rohdaten gebildeten Stundenmittelwerten.

Tabelle 4 zeigt die Datenverfügbarkeit des Feststationsnetzes in Krefeld. Die im allgemeinen trotz sorgfältiger technischer Wartung unvermeidbaren Datenausfälle waren gering. Somit stellt das Datenkollektiv eine zusammenhängende Zeitreihe für die anstehenden Auswertungen dar. Mit den aus dem verfügbaren Datenmaterial gewonnenen Stundenmitteln wurden die statistisch relevanten Auswertungen durchgeführt. Für die Analyse der Häufigkeiten von Windrichtung und -geschwindigkeit wurde aufgrund der

gerätebedingten Anlaufgeschwindigkeit (Windgeschwindigkeiten $< 0,5 \text{ m s}^{-1}$ werden als Windstillen definiert) auf die Dreiminutenmittel zurückgegriffen.

Tabelle 3: Lage, Merkmale und Messgeräteausstattung der Stationsstandorte im Krefelder Untersuchungsgebiet.

Nr.	Stations-name	Straße	Beschreibung	Rechts-wert	Hoch-wert	Höhe ü.NN [m]	Messgrößen
K1	Uerdingen	Duisburger Straße	Industriegebiet	2545,2	5692,5	32	t, rF, u, WR
K2	Hafen	Bataverstraße	Rheinufer, gewerbliche Nutzung	2547,8	5689,5	30	t, rF, u, WR
K3	Fischeln	Willicher Straße/ Dohmenstraße	landwirtschaftliche Fläche (Grünland, Acker)	2540,9	5683,9	39	t, rF, u, WR, GS
K4	Lindental	Freizeitanger	Schul- und Kindergartenkomplex in Wohngebiet (Vorort)	2537,2	5687,4	39	t, rF, u, WR
K5	Innenstadt	Nordwall/ Ost-wall	Innenstadt	2539,3	5689,3	39	t, rF, u, WR
K6	Hüls Südwest	Venloer Straße	landwirtschaftliche Fläche (Acker)	2534,9	5692,2	35	t, rF, u, WR
K7	Verberg	Zwingenbergshof	Grünland in einer potentiellen Belüftungsschneise	2542,1	5692,0	31	t, rF, u, WR
K8	Stadtwald	Wilhelmshofallee	Wohngebiet	2541,1	5690,6	34	t, rF, u, WR

t: Lufttemperatur [°C] in 2 m ü.Gr.
 rF: relative Luftfeuchtigkeit [%] in 2 m Höhe ü.Gr.
 u: Windgeschwindigkeit [m s⁻¹] in 4 m Höhe ü.Gr.
 WR: Windrichtung [°] in 4 m Höhe ü.Gr.
 GS: Globalstrahlung [W m⁻²] in 2 m Höhe ü.Gr. ab 22.05.2002

Tabelle 4: Übersicht der Datenverfügbarkeit des Krefelder Stationsnetzes im Zeitraum 1.11.2001 bis 31.10.2002 bezogen auf die Rohdaten in Form von Dreiminutenmitteln.

Stations-Nr.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Stations-name	Uerdingen	Hafen	Fischeln	Lindental	Innenstadt	Hüls Südwest	Verberg	Stadt-wald
Daten-verfügbarkeit [%]	98,7	98,8	94,2	99,9	98,0	95,9	99,7	99,3

3.1.2 NO₂-Messungen mit Passivsammlern

Passivsammler sind ein Hilfsmittel zur zeitlich grobauflösenden Messung von Spurenstoffen, bei der die Luftprobe nicht wie bei aktiven Messverfahren angesaugt wird, sondern der Spurenstoff sich durch Diffusion auf einem Absorber sammelt. Das in Krefeld zur Messung von NO₂ als Leitsubstanz urbaner Luftverunreinigungen eingesetzte

Sammelsystem besteht im Kern aus einem unten offenen Glasröhrchen (Diffusionsröhrchen nach PALMES et al. 1976), in dessen oberem Ende ein Filter sitzt. Das Filter ist mit einer Rezeptorlösung aus Aceton und Triethanolamin (TEA) getränkt und bindet Oxide wie NO_2 und SO_2 durch Komplexbildung. Ein Wetterschutz („Sigma2-Sammler“), in dem vier dieser Röhrchen aufgehängt werden, sorgt für Turbulenzarmut und Trockenheit und wird auf einer Haltestange in 1,5 m Höhe ü. Gr. positioniert.

Die Sammler wurden an den acht Klimafeststationen sowie zu Vergleichszwecken an einer LUQS-Messstation des Landesumweltamtes NRW an der Hammerstraße (Wohngebiet Linn) wöchentlich beprobt.

In wässriger Lösung reagiert Stickstoffdioxid (NO_2) überwiegend zu Nitrit (NO_2^-) sowie in geringerem Ausmaß zu Nitrat (NO_3^-). Diese Ionen wurden nach Aufschluss der Filter bei 80 °C in bidestilliertem Wasser ionenchromatographisch in der entstehenden Extraktionslösung nachgewiesen. Aus Konzentration und Volumen der Extraktionslösung ergibt sich die Gesamtmenge der während der Expositionsdauer im Filter gebundenen NO_2 -Moleküle. Aus dieser direkt gemessenen **Absorption** lässt sich, abgeleitet aus dem 1. FICK'schen Gasdiffusionsgesetz, die über den Expositionszeitraum gemittelte **NO_2 -Konzentration** in der Luft näherungsweise errechnen:

$$c(\text{NO}_2) = \left[\left(\frac{c(\text{NO}_2^-)}{M(\text{NO}_2^-)} + \frac{c(\text{NO}_3^-)}{M(\text{NO}_3^-)} \right) \cdot \frac{V \cdot M(\text{NO}_2) \cdot l}{D(\text{NO}_2) \cdot A \cdot t} \right]$$

mit: $c(\text{NO}_2)$: NO_2 -Konzentration in der Luft in $\mu\text{g m}^{-3}$
 $c(\text{NO}_2^-)$; $c(\text{NO}_3^-)$: Nitrit- und Nitratkonzentration in der Lösung in $\mu\text{g l}^{-1}$
 $M(\text{NO}_2^-)$: Molare Masse von Nitrit, 46 g mol^{-1}
 $M(\text{NO}_3^-)$: Molare Masse von Nitrat, 62 g mol^{-1}
 $M(\text{NO}_2)$: Molare Masse von Stickstoffdioxid, 46 g mol^{-1}
 V : Volumen der Lösung
 l : Länge des Diffusionsröhrchens
 $D(\text{NO}_2)$: molekularer Diffusionskoeffizient für NO_2 , bei 20 °C $1,54 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
 A : Querschnitt des Diffusionsröhrchens
 t : Expositionsdauer in s

Varianten des Verfahrens beinhalten die Berechnung ausschließlich auf Basis der NO_2^- -Konzentration (keine Berücksichtigung von NO_3^-) sowie den Abzug eines Blindwertes (Restkonzentration eines verschlossen exponierten Röhrchens), um einen Einfluss durch Verunreinigungen auszuschließen. Für absolute Messungen kann ein Korrekturfaktor für Abweichungen von den idealen Rahmenbedingungen des Diffusionsgesetzes gebildet werden, der für NO_2 und die beschriebene Anordnung nahe 1 liegt (KUTTLER et al. 2001, SCHULTZ et al. 1994). Für die vorliegende Klimaanalyse wurde nach Sichtung der Daten

und Vergleich mit den vom Landesumweltamt NRW, Essen, in Krefeld-Linn erhobenen Werten die Berechnungsmethode unter alleiniger Berücksichtigung von NO_2^- und ohne Abzug von Blindwerten verwendet.

3.2 Mobile Messungen

Die mobilen Messungen fanden während der für die jeweilige Fragestellung angemessenen Wetterlagen statt, um Worst-Case-Situationen zu erfassen. Dies schließt i.d.R. Austauscharmut, in einigen Fällen (z.B. zur Messung hoher Ozonkonzentrationen) auch Strahlungswetterlagen ein.

3.2.1 Lufttemperaturmessfahrten

Zur Ermittlung der nächtlichen bodennahen Verteilung der Lufttemperatur über die räumlich grobauflösende Standortcharakterisierung durch die Klimafeststationen hinaus, wurden zu unterschiedlichen Jahreszeiten während des Untersuchungszeitraumes drei nächtliche Temperaturmessfahrten durch das Stadtgebiet durchgeführt. Hierzu wurde die Lufttemperatur mit Hilfe eines strahlungsgeschützten Pt-100-Widerstandsthermometers in 2 m ü. Gr. an einem Ausleger vor einem Messfahrzeug erfasst, während dieses mit ca. 30 km h^{-1} (Autobahn- und Krafffahrstraßenabschnitte: 60 km h^{-1}) die Messstrecke abfuhr. Die Messwerte wurden sekundlich aufgezeichnet und repräsentieren somit eine Fahrstrecke von 8 (16) m. Sie wurden entlang vorher festgelegter Streckenabschnitte von mehreren 100 m Länge zu Streckenabschnittsmittelwerten zusammengefasst und chronologisch korrigiert (KUTTLER 1993, DANZEISEN 1983).

Die Messstrecke wurde mit Rücksicht auf die Lage der verschiedenen Flächennutzungsformen, der Plangebiete und der Klimafeststationen festgelegt und ist in Karte 1 wiedergegeben. Die 243 Streckenabschnitte ergeben eine Gesamtlänge von ca. 110 km. Die etwa 5 h andauernde Fahrt fand zwischen Sonnenunter- und -aufgang statt. Die Termine können Tabelle 2 entnommen werden.

3.2.2 Lufthygienische Profilmessfahrten

Lufthygienische Profilmessfahrten dienen zur Ermittlung der hochauflösenden, räumlichen Verteilung von Spurenstoffkonzentrationen entlang einer Messroute mit überwiegender Erfassung Kfz-bürtiger Stoffe. Dazu wurde die in 1,5 m Höhe auf der straßenabgewandten Seite des Messfahrzeuges (Abbildung 3) angesaugte Probeluft im mobilen Messlabor sekundlich auf die Spurenstoffe Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ozon (O_3) analysiert (vgl. Tabelle 5). Bezüglich Fahrgeschwindigkeit

keit, räumlicher Auflösung und Bildung von Streckenabschnittsmittelwerten gilt das bereits in Kapitel 3.2.1 beschriebene Verfahren; die Messstrecke ist mit der der Lufttemperaturmessfahrten identisch.

Die Fahrten wurden zwischen den morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeiten durchgeführt, um den räumlichen Vergleich der Spurenstoffkonzentrationen nicht durch kurzfristig starke Konzentrationsschwankungen zu stören. Zur Vermeidung der Überbewertung singulärer Ereignisse wurde die Messfahrt dreimal innerhalb des Untersuchungszeitraumes wiederholt.

Anwendungsbereiche der Streckenabschnittsmittelwerte sind die Ausweisung kritischer Straßenabschnitte im Stadtgebiet, aber auch die Ermittlung typischer Zusammenhänge zwischen der Konzentration einzelner Spurenstoffe und den Eigenschaften des Streckenabschnitts wie z.B. Straßentyp oder Nutzungsform.

Tabelle 5: Analysemethoden des mobilen Messlabors.

Spurenstoff	Methode
Stickstoffmonoxid (NO)	Chemilumineszens
Stickstoffdioxid (NO ₂)	Chemilumineszens
Kohlenstoffmonoxid (CO)	NDIR-Photometer
Ozon (O ₃)	UV-Absorption
BETX	Gaschromatographie

3.2.3 Lufthygienische 24 h-Standmessungen

Die 24 Stunden andauernden lufthygienischen Standmessungen dienten der Ermittlung des Tagesganges der Immissionskonzentrationen zusammen mit meteorologischen Parametern an einem stadtklimatisch relevanten Standort. Die Untersuchungsorte waren potentielle Frischluftdurchzugsräume, deren Luftqualität überprüft werden sollte, oder Straßenkreuzungen, an denen hohe Konzentrationen erwartet wurden. Die Messungen erfolgten wie bei den lufthygienischen Profilmessfahrten mit dem mobilen Messlabor; die Analysemethoden sind Tabelle 5 zu entnehmen. Die Probeluft wurde in 4 m Höhe ü. Gr. angesaugt. Zusätzlich zu den als 1-Minuten-Mittel abgespeicherten und zur Auswertung in unterschiedlichen Zeitintervallen gemittelten Konzentrationen von Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ozon (O₃) wurden integrierende Stundenmittel der Konzentration von BETX mit dem in Kap. 3.2.4 beschriebenen Verfahren ermittelt.

Die zusätzliche Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit erfolgte in 2 m ü. Gr., die der Windrichtung und -geschwindigkeit mit einem Ultraschallanemometer an einem ausfahrbaren Mast in 10 m Höhe ü. Gr. Die Auswertung lässt sich als Zeitreihe oder in Abhängigkeit von der Windrichtung und -geschwindigkeit, z.B. als Konzentrationswindrose, vornehmen.

3.2.4 BETX – Profilmessungen

Die Bezeichnung BETX steht für die aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Ethylbenzol, Toluol und Xylole (o-,m- und p-Xylol). Das hier verwendete aktive Probenahmeverfahren beinhaltet die Bindung an zwei in einem Glasröhrchen lokalisierte Adsorbentien (TENAX und CARBOTRAP). Luft eines Messortes muss zum Erreichen aussagekräftiger Probemengen mindestens 30 Minuten durch dieses hindurch gepumpt werden. Daher war eine sekundliche Probenahme und Analyse gemeinsam mit den übrigen Spurenstoffen während der lufthygienischen Profilmessfahrt nicht möglich.

Stattdessen wurden zu den gleichen Tagesstunden wie die Profilmessfahrten sieben Punkte unterschiedlicher Standorteigenschaften entlang der Messroute mit einem gesonderten Fahrzeug nacheinander angefahren, und die dort genommenen Proben später im mobilen Messlabor analysiert. Die BETX-Messung liefert, ähnlich wie die NO₂-Messung mit Passivsammlern, ein räumlich grob auflösendes Bild. Um dessen zeitliche und/oder räumliche Einordnung zu erleichtern, wurden zwei der BETX-Profilmessungen zeitgleich mit lufthygienischen Standmessungen und eine zeitgleich mit einer lufthygienischen Profilmessfahrt durchgeführt (vgl. Tabelle 2). Die BETX-Messpunkte gibt Karte 1 wieder.

3.2.5 SF₆-Tracerausbreitungskampagnen

Während ausgewählter austauscharmer Wetterlagen wurden im Bereich der Plangebiete insgesamt vier Messkampagnen zur Ausbreitung eines Tracergases durchgeführt. Die nachts vorgenommenen Messungen dienen zur Analyse der Strömungsdynamik, insbesondere der möglichen Eindringtiefe von Kalt- und/oder Frischluft in bebaute Bereiche hinein.

Dazu wurde das inerte, farb-, schad- und geruchlose Gas Schwefelhexafluorid (SF₆) jeweils an einem Emissionspunkt in potentiellen Kaltluftbildungsgebieten oder Ventilationsschneisen über einige Stunden hinweg mit geringem Massenstrom ($< 1 \text{ g s}^{-1}$) emittiert. Größe und Struktur des Wirkgebietes wurden durch in-situ-Analyse der an

verschiedenen Punkten in der Umgebung des Emissionspunktes sowie in dessen Lee angesaugten Probeluft ermittelt; dabei kam ein Gaschromatograph mit einer Nachweisgrenze von 0,02 ppb zum Einsatz. Die Messkampagnen wurden mit einem Fahrzeug durchgeführt und begannen am Emissionspunkt. Zur Einordnung der gemessenen Konzentrationen wurde vor Emissionsbeginn die Hintergrundkonzentration ermittelt.

Begleitend wurden stichprobenartige Untersuchungen der Windrichtung mit einem optischen Tracer (Rauchtabletten) durchgeführt. Zur Klärung der Qualität der potentiellen Kalt- bzw. Frischluft diente, soweit die Messkampagne nicht ohnehin während einer 24 h-Standardmessung erfolgte, jeweils eine Kurzzeitstandmessung (ähnlich wie in Kap. 3.2.3 beschrieben, jedoch ohne BETX-Messung und nur für die Dauer der Tracergaskampagne) am Emissionspunkt oder in dessen Lee.

Die Termine der Tracerausbreitungskampagnen sind Tabelle 2 zu entnehmen, die Emissionspunkte Karte 1.

4 Ergebnisse

Die in der Stadt Krefeld innerhalb des Messzeitraumes 1.11.2001 bis 31.10.2002 durchgeführten stationären und mobilen meteorologischen und lufthygienischen Messungen erlauben eine zielgerichtete Aussage über flächennutzungs- und geländespezifische Eigenschaften des Untersuchungsgebietes. In den folgenden Kapiteln werden zunächst die meteorologischen, anschließend die lufthygienischen Charakteristika des betrachteten Zeitraumes behandelt.

4.1 Repräsentativität des Messzeitraumes

Die Repräsentativität des Messzeitraumes hinsichtlich des Witterungsverlaufes wurde anhand der langjährigen durchschnittlichen Häufigkeit der Großwettertypen beurteilt. Vergleichsgrundlage bildete die 118jährige Datenreihe des Kataloges der Großwetterlagen in Europa von GERSTENGARBE & WERNER (1999). Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der im Messzeitraum aufgetretenen Großwettertypen im Vergleich mit dem langjährigen Mittel.

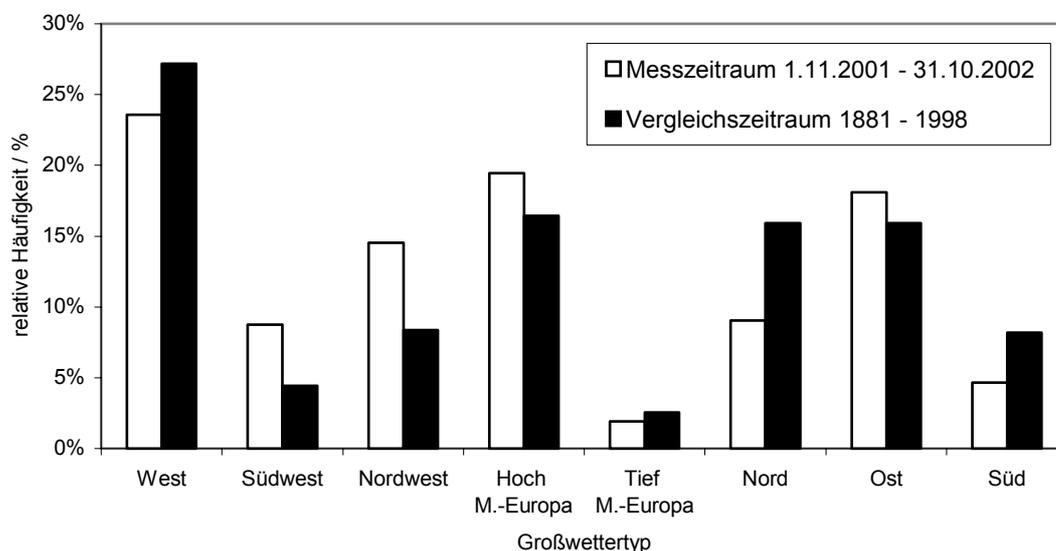


Abbildung 4: Relative Häufigkeit der Großwettertypen für den Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002 im Vergleich zum Zeitraum 1881 bis 1998 (nach GERSTENGARBE & WERNER 1999).

Die Großwettertypen Südwest, Nordwest, Hoch über Mitteleuropa und Ost waren demnach häufiger im Messzeitraum vertreten als in der Vergleichsreihe. Unterrepräsentiert waren dagegen die Großwettertypen Süd, West, Nord, Nordwest und Tief über

Mitteleuropa. Damit wies sich der Messzeitraum mit einer leicht überdurchschnittlichen Häufigkeit gemischter Zirkulationsformen aus, während die zonale und die meridionale Zirkulationsform unterdurchschnittlich häufig auftraten. Wegen des etwa gleich häufigen Auftretens von zyklonalen und antizyklonalen Wetterlagen, die für stadtklimatische Betrachtungen von entscheidendem Interesse sind, ist der Messzeitraum dennoch als repräsentativ anzusehen.

4.1.1 Bestimmung und Auftreten austauscharmer Strahlungstage

Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten und weitgehend ungehinderter Ein- sowie Ausstrahlung spielen für die lufthygienischen und klimatischen Charakteristika eines Standortes eine wichtige Rolle und stellen wegen ihrer Austauscharmut Extremsituationen dar. Daher werden diese in der Regel als Worst-Case-Situationen bezeichnet. In solchen Fällen schlagen sich die Eigenschaften der umgebenden natürlichen und künstlichen Oberflächen besonders deutlich im Mikroklima und in der Luftqualität eines Standortes nieder. Tage mit entsprechender Wetterlage werden als autochthon (eigenbürtig) bezeichnet.

Anhand der Kriterien Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit wurden die austauscharmen Strahlungstage aus dem Gesamtkollektiv der Daten selektiert. Dazu wurde für jede Nacht das maximale Stundenmittel des Temperaturunterschiedes zwischen den Stationen Fischeln (K3) und Innenstadt (K5) als Maß der Wärmeinselintensität bestimmt und der mittleren Windgeschwindigkeit der Nacht an Station Fischeln (K3) als Maß der übergeordneten Windgeschwindigkeit gegenübergestellt. Aus dem Kollektiv aller Nächte mit einer mittleren Windgeschwindigkeit $\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$, der Obergrenze für Schwachwinde nach MURL (1989), konnten - als Indikator für durch starke Ein- und Ausstrahlung sowie geringe Ventilation bedingte Temperaturunterschiede - 25% der Nächte des Kollektives mit der höchsten Wärmeinselintensität als austauscharme Strahlungsnächte bestimmt werden. Da die nächtliche Ausdifferenzierung des Temperaturfeldes Einstrahlung und Austauscharmut am vorangehenden Tag voraussetzt, wurde der Tag vor einer Strahlungsnacht als Strahlungstag angenommen.

Daraus ergeben sich für den Untersuchungszeitraum 33 Strahlungstage, von denen 13 auf das Winter- und 20 auf das Sommerhalbjahr entfallen. Die klimatischen Verhältnisse der autochthonen Tage werden im Ergebnisteil denen des gesamten Untersuchungszeitraumes gegenüber gestellt. Die Anzahl von 33 Strahlungstagen entspricht etwa dem Strahlungstagskollektiv eines Jahres, das auch in anderen Städten festgestellt werden konnte (KUTTLER et al. 2000, KUTTLER et al. 2001, KUTTLER et al. 2002).

4.2 Lufttemperatur

Die Verteilung der Lufttemperatur innerhalb eines Stadtgebietes ist für stadtklimatologische Untersuchungen grundlegend, da sie über den Wärmehaushalt sehr empfindlich auf stadt- und geländespezifische Einflüsse reagiert. Generell ist zu erwarten, dass die Stadt gegenüber dem Umland wärmer ist. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden (HUPFER & KUTTLER 1998):

- Der erhöhte Anteil an versiegelten Flächen führt zu einer verringerten Verdunstung, wodurch sich der fühlbare Wärmestrom gegenüber dem latenten Wärmestrom erhöht.
- Die physikalischen Eigenschaften der Baumaterialien bedingen zusammen mit einer ausgeprägten Dreidimensionalität des Stadtkörpers eine durch Wärmespeicherung hervorgerufene thermische Trägheit mit gegenüber dem Umland herabgesetzten Abkühlungs- und Erwärmungsraten.
- Horizontüberhöhungen beschränken die langwellige Ausstrahlung durch Verminderung des Himmelssichtsfaktors.
- Die strömungsbremsende Wirkung der durch Bebauung und Bewuchs gebildeten Rauigkeitselemente setzt die Windgeschwindigkeit und damit den atmosphärischen Austausch innerhalb des Stadtgebietes herab.
- Industrielle und siedlungsbedingte Wärmeemittenten führen der Stadtatmosphäre sensible Wärme zu.

In der Regel führen diese Einflussfaktoren in Abhängigkeit von Oberflächenform, Flächennutzung, Witterung, Jahres- und Tageszeit zu dem Phänomen der urbanen Wärmeinsel, die als positive Temperaturanomale bebauter Gebiete im Vergleich zu deren nicht oberflächenversiegelten Umgebung definiert wird (KUTTLER 1998).

Die Auswertung der thermischen Verhältnisse innerhalb des Krefelder Untersuchungsgebietes erfolgt anhand des Stationsmessnetzes und wird in Kapitel 4.2.6 durch die Ergebnisse der Temperaturmessfahrten ergänzt. Während das Stationsmessnetz Aussagen über die urbane Wärmeinselintensität mit hoher *zeitlicher* Auflösung zulässt, kann aus den Messfahrten die *räumliche* Verteilung der bodennahen Lufttemperatur für ausgewählte Strahlungsnächte abgeleitet werden.

4.2.1 Mittleres Temperaturniveau im Untersuchungsgebiet

Eine Übersicht über ausgesuchte statistische Kennwerte der Lufttemperatur im Krefelder Untersuchungsgebiet gibt Tabelle 6. Daraus geht hervor, dass sich die mittleren Lufttemperaturen der Feststationsstandorte bezogen auf den Gesamtzeitraum mit Jahresmitteltemperaturen zwischen 10,6 °C und 11,1 °C naturgemäß relativ wenig unterscheiden. Ebenfalls fallen die Unterschiede der absoluten Stundenminima und -maxima der Lufttemperaturen vergleichsweise gering aus, lassen jedoch typische, flächennutzungsabhängige Unterschiede erkennen. Die absoluten Maxima liegen zwischen 33,9 °C und 35,5 °C, die absoluten Minima zwischen -7,6 °C und -5,9 °C. Die Umlandstandorte Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) sind wie die Standorte aufgelockerter Wohnbebauung, Verberg (K7) und Stadtwald (K8), im unteren Temperaturniveau angesiedelt. Verdichtete Gebiete mit hohem Versiegelungsanteil - Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5) - weisen demgegenüber um 0,5 K bis 1 K erhöhte mittlere Lufttemperaturen auf. Die Feststationen Hafen (K2) und Lindental (K4) nehmen eine Mittelstellung ein. Dies ist vermutlich auf die mikroklimatische Auswirkung der thermischen Trägheit des Wasserkörpers einerseits bzw. auf eine mittlere Siedlungsdichte andererseits zurückzuführen.

Bezüglich des Datenkollektivs der überwiegend auf das Sommerhalbjahr entfallenden autochthonen Tage liegen die Mittelwerte zwischen 15,2 °C und 16,7 °C. Interstationäre Unterschiede fallen sowohl hinsichtlich der Mittelwerte als auch hinsichtlich der absoluten Minima und Maxima mit einer Spannweite von 0,9 °C bis 1,8 °C bzw. 31,9 °C bis 33,0 °C höher als im Gesamtzeitraum aus. Die Standorte Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5) liegen über dem Gebietsmittel, die Umlandstationen Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6), sowie Verberg (K7) und Stadtwald (K8) lassen sich im unteren Temperaturniveau angliedern. Auch hier nehmen die Feststationen Hafen (K2) und Lindental (K4) eine Mittelstellung ein. Durch das ausschließliche Auftreten winterlicher Strahlungstage in den Monaten Oktober und November mit vergleichsweise milder Witterung fallen die absoluten Minima der Lufttemperatur im Kollektiv der Strahlungstage deutlich geringer als im Gesamtzeitraum aus. Die kombinierten Kriterien zur Bestimmung der Strahlungstage, nämlich Temperatur- und Austauschverhältnisse, bringen außerdem mit sich, dass die heißesten Tage des Jahres nicht automatisch auch in die Gruppe der Strahlungstage fallen.

Tabelle 6: Statistische Angaben zu ausgewählten Kenngrößen der Lufttemperatur des Messnetzes im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Zeitraum	Lufttemperatur [°C]	Stationsname								Gebietsmittel
		Uerdingen (K1)	Hafen (K2)	Fischehn (K3)	Lindental (K4)	Innenstadt (K5)	Hüls Südwest (K6)	Verberg (K7)	Stadtwald (K8)	
Gesamtzeitraum	\bar{t}	11,3	11,1	10,6	10,8	11,3	10,7	10,6	10,6	10,9
	σ_t	7,1	7,0	6,9	7,0	7,1	7,0	7,0	7,1	7,0
	$t_{\max, \text{abs}}$	35,3	35,3	34,4	34,8	35,5	33,9	34,5	34,5	34,8
	$t_{\min, \text{abs}}$	-6,0	-6,4	-5,9	-6,5	-6,4	-6,5	-6,7	-7,6	-6,5
autochthone Tage	\bar{t}	16,5	16,1	15,3	15,7	16,7	15,5	15,2	15,3	15,8
	σ_t	6,4	6,4	6,5	6,6	6,3	6,6	6,7	6,7	6,5
	$t_{\max, \text{abs}}$	32,8	32,6	32,4	32,3	33,0	32,1	31,7	31,9	32,3
	$t_{\min, \text{abs}}$	1,7	1,5	0,9	1,5	1,8	1,2	1,2	1,4	1,4

4.2.2 Unterschiede im Tagesgang der Lufttemperatur

Es ist bekannt, dass mikroklimatische Unterschiede zwischen verschiedenen Standorten an Tagen mit hoher Ein- und Ausstrahlung, weitgehender Wolkenlosigkeit und Austauscharmut besonders stark hervortreten. Wegen des unterschiedlichen thermischen Verhaltens von Baumaterialien und natürlicher Oberflächen ergibt sich durch die thermische Trägheit der urbanen Oberflächen eine gegenüber dem Umland verlangsamte Abkühlungsrate in der Stadt. Nachts treten daher meist die größten Differenzen der Lufttemperatur zwischen Stadt und unbebautem Umland auf.

Abbildung 5 stellt den durchschnittlichen Tagesgang der Lufttemperatur des Gesamtmeszeitraumes dem der Strahlungstage gegenüber.

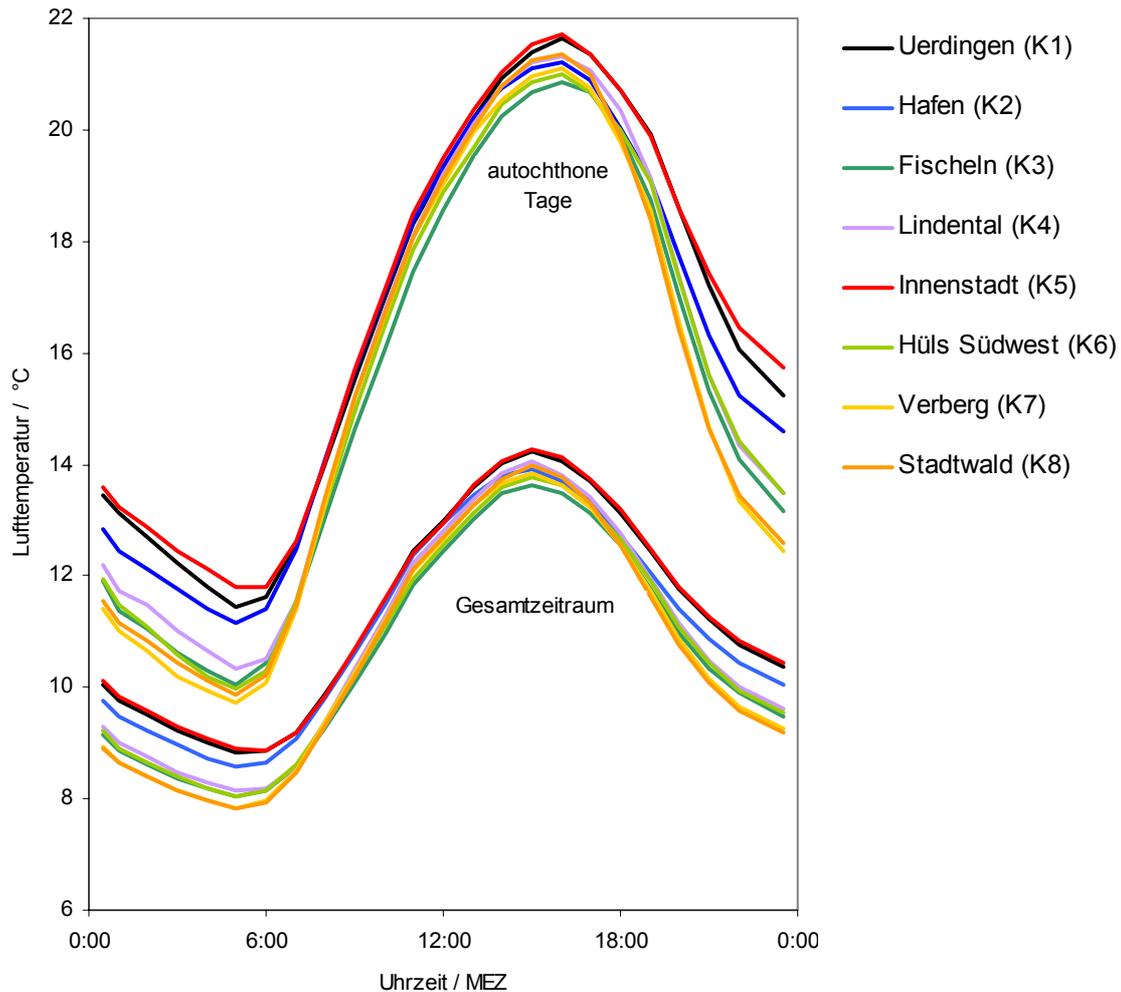


Abbildung 5: Vergleich der durchschnittlichen Tagesgänge der Lufttemperatur im Gesamtzeitraum sowie an autochthonen Tagen im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Die durchgehend höheren Lufttemperaturen an Strahlungstagen sind auf den Großteil der Strahlungstage im Sommerhalbjahr zurückzuführen. Während im Gesamtzeitraum die maximale interstationäre Differenz der Lufttemperatur bei 1,4 K lag, betrug sie bezogen auf das Kollektiv der Strahlungstage bis zu 3,3 K. In beiden Fällen ist dies die nächtliche Differenz zwischen den Stationen Innenstadt (K5) und Verberg (K7) bzw. Stadtwald (8). Tagsüber bleiben Temperaturdifferenzen zwischen den Stationen, meist unterhalb von 0,5 K, bestehen. Insgesamt verhalten sich die interstationären Unterschiede im Tagesgang der Lufttemperatur typisch für die unterschiedlichen Flächennutzungen, mit hohen Temperaturen und geringer nächtlicher Abkühlung innerhalb der Bebauung und niedrigeren Temperaturen sowie ausgeprägter nächtlicher Abkühlung im unbebauten Umland.

4.2.3 Klimatologische Ereignistage

Der Jahresgang der thermischen Unterschiede zwischen den Standorten der Feststationen wird anhand klimatologischer Ereignistage in Tabelle 7 dargestellt. Diese geben an, wie häufig bestimmte Schwellenwerte der Lufttemperatur im Winter und Sommer an den einzelnen Feststationen über- bzw. unterschritten werden. Aus dem Vergleich mit den ebenfalls in Tabelle 7 aufgeführten langjährigen Mittelwerten (1951 bis 1987) der nahe Krefeld gelegenen Station Tönisvorst des Deutschen Wetterdienstes (MURL 1989) gehen ein überdurchschnittlich milder Winter und Sommer für den Untersuchungszeitraum hervor. Dies zieht relativ geringe, aber standorttypische, interstationäre Unterschiede nach sich, so, wie es sich bereits anhand der statistischen Kennwerte in Tabelle 6 abzeichnete.

Im Winterhalbjahr zeichnen sich die Feststationen Uerdingen (K1), Hafen (K2) und Innenstadt (K5) durch die geringe Anzahl von Frosttagen und Eistagen aus. An den Feststationen Verberg (K7) und Stadtwald (K8) waren die Zahl der Frost- und Eistage dagegen maximal. Analog verhielt sich die Anzahl von nur 238 bis 249 Heiztagen an den Feststationen Uerdingen (K1), Hafen (K2) sowie Innenstadt (K5), während sich die Zahl der Heiztage an den übrigen Feststationen zwischen 260 und 266 bewegt. Zwischen den Umlandstationen und den Feststationen innerhalb aufgelockerter Wohnbebauung tritt jedoch keine nennenswerte Differenzierung auf.

Im Sommerhalbjahr weisen die Feststationen Uerdingen (K1), und Innenstadt (K5) die höchste Anzahl an Sommer-, Grillpartytagen und heißen Nächten auf. Die Feststation Hafen (K2) nimmt hier zusammen mit Station Lindental (K4) eine Übergangsstellung zu den übrigen Stationen des Messnetzes ein.

Insgesamt sind damit die dichter bebauten Bereiche, Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5), auf ein thermisch höheres Niveau gehoben. Die Feststationen in den vorörtlich geprägten Wohngebieten - Lindental (K4), Verberg (K7), Stadtwald (K8) - sind dagegen sowohl im Winter als auch im Sommer überdurchschnittlich kalt, was einen erhöhten Heizenergieverbrauch nach sich zieht. Die Unterschiede dürften sich noch deutlicher in Jahren mit weniger mildem Witterungsverlauf manifestieren. Rechnet man beispielsweise die Anzahl der Frosttage auf das langjährige Mittel um, so ergeben sich für Station Stadtwald (K8) bereits 78 anstatt 54 Tage, für die Station Innenstadt (K5) 46 anstatt 32 Tage. Die Differenz zwischen beiden Stationsstandorten steigt damit von 22 auf 32 Tage an.

Tabelle 7: Anzahl klimatologischer Ereignistage an den Klimafeststationen in Krefeld innerhalb des Messzeitraumes 1.11. 2001 bis 31.10. 2002.

Tage mit Überschreitung von Temperaturschwellenwerten		Stationsname								Gebietsmittel	langj. Mittel Tönisvorst ¹⁾
		Uerdingen (K1)	Hafen (K2)	Fischeln (K3)	Lindental (K4)	Innenstadt (K5)	Hüls Südwest (K6)	Verberg (K7)	Stadtwald (K8)		
Winter	Anz. Eistage ($t_{\max} < 0 \text{ °C}$)	2	2	1	2	2	2	2	2	1,9	10,5
	Anz. Frosttage ($t_{\min} < 0 \text{ °C}$)	35	34	44	44	32	44	47	54	41,8	60,6
	Anz. Heiztage ($t_{\text{mittel}} < 15 \text{ °C}$)	242	249	266	260	238	261	263	260	254,9	k.A.
	Kalte Tage ($t_{\text{mittel}} < 0 \text{ °C}$)	13	14	15	17	14	17	18	19	15,9	k.A.
Sommer	Anz. Sommertage ($t_{\max} \geq 25 \text{ °C}$)	34	29	25	27	34	26	25	30	28,8	28,5
	Anz. heiße Tage ($t_{\max} \geq 30 \text{ °C}$)	10	8	7	8	10	8	9	9	8,6	5,6
	Anz. Grillpartytage ($t_{21h} > 20 \text{ °C}$)	38	31	24	27	37	23	18	19	27,1	k.A.
	Anz. heiße Nächte ($t_{0h} > 20 \text{ °C}$)	17	14	3	7	13	7	6	6	9,1	k.A.
Summe Winter		292	299	326	323	286	324	330	335	314,4	k.A.
Summe Sommer		99	82	59	69	94	64	58	64	73,6	k.A.

¹⁾ Quelle: MURL (1989)

4.2.4 Intensität der Wärmeinsel zwischen Stadt und Umland

Exemplarisch für den Jahres- und Tagesgang der Temperaturdifferenz zwischen einem Stadt- und einem Umlandstandort stellt Abbildung 6 die Wärmeinselintensität zwischen Innenstadt (K5) und Fischeln (K3) dar. Anhand des Isoplethendiagramms kann für jede Stunde des Tages die mittlere monatliche Temperaturdifferenz zwischen dem Innenstadtstandort und dem Umland entlang der Gitterpunkte im Diagramm abgelesen werden. Während im Winter Temperaturunterschiede zwischen den Stationen zurücktreten, bildet sich besonders in den Sommermonaten ein deutlicher Tagesgang mit maximaler nächtlicher Überwärmung des Stadtstandortes bis zu 1,6 K heraus. An Einzeltagen können diese Werte weitaus größere Beträge annehmen als im dargestellten Mittel. So liegen das absolute Maximum der Wärmeinselintensität zwischen Innenstadt (K5) und Fischeln (K3) bei 4,8 K. Auch tagsüber bleiben sommerliche Überwärmungen, jedoch unter 1 K, bestehen.

Insgesamt ist der Standort Innenstadt (K5) in 90,6 % der Jahresstunden eine gegenüber der Umlandstation Fischeln (K3) überwärmt. Beim Vergleich der übrigen Feststationen mit Fischeln (K3) ergeben sich dagegen folgende relativen Häufigkeiten der Jahresstunden

mit Überwärmung: 89,1 % (Uerdingen, K1), 81,2 % (Hafen, K2), 67,1 % Lindental (K4), 56,6 % (Hüls Südwest, K6), 55,8 % (Verberg, K7), 50,3 % (Stadtwald, K8).

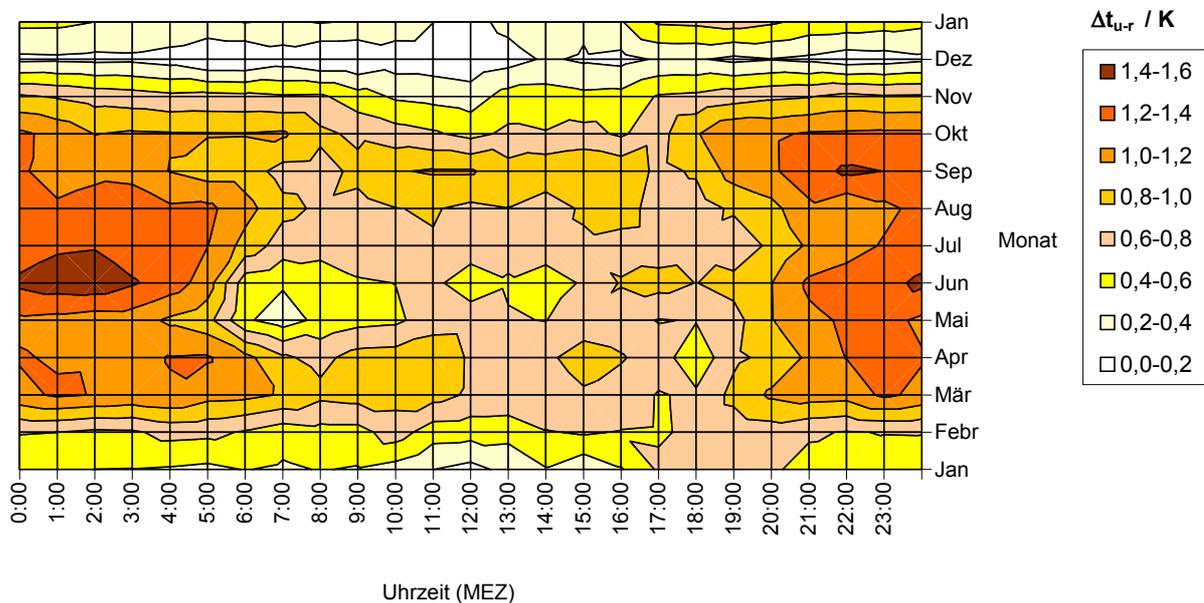


Abbildung 6: Isoplethen der Wärmeinselintensität anhand der Temperaturdifferenz zwischen den Standorten Innenstadt (K5) und Fischeln (K3) ($\Delta t_{u-r} = t_{K5} - t_{K3}$) im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: monatlicher Mittelwert der Lufttemperatur jeder Tagesstunde).

Zusammenfassend lässt sich das thermische Niveau der Feststationsstandorte folgendermaßen gruppieren: Die Feststationen Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5) bewegen sich auf dem höchsten thermischen Niveau, Fischeln (K3), Hüls Südwest (K6), Verberg (K7) und Stadtwald (K8) weisen dagegen die relativ geringsten Kennwerte der Lufttemperatur auf. Die Feststationen Hafen (K2) und Lindental (K4) nehmen eine Zwischenstellung ein.

4.2.5 Temperaturverteilung während nächtlicher Temperaturmessfahrten

Je eine nächtliche Temperaturmessfahrt wurde wetterlagenabhängig im Winter (4./5.1. 2002), Frühjahr (27./28.3.2002) und Sommer (29./30.7. 2002) bei wolkenlosem Himmel durchgeführt. Der Temperaturverlauf an den acht Feststationen während der Messfahrten ist in Abbildung 7 dargestellt.

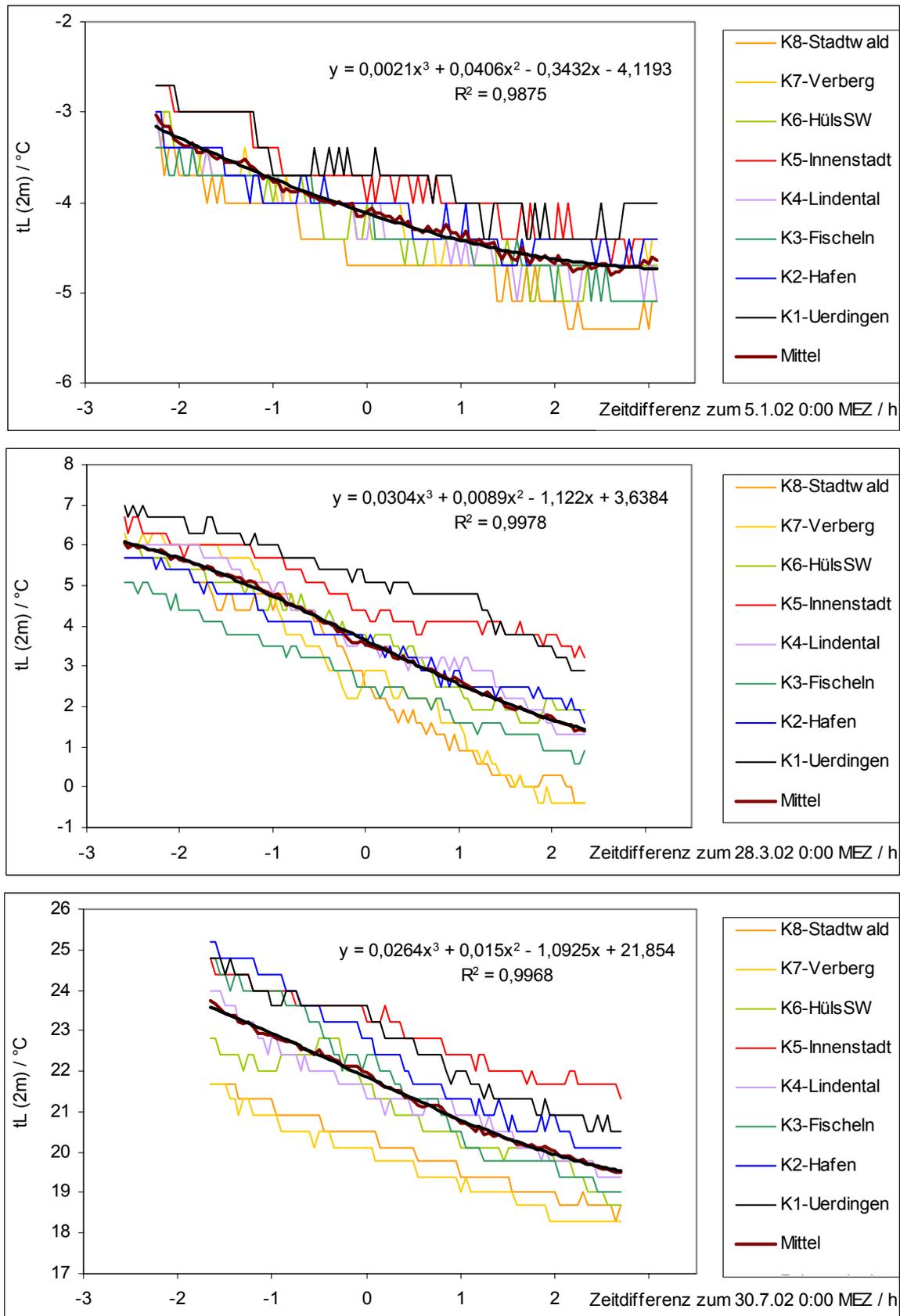


Abbildung 7: Temperaturverlauf an den Klimafeststationen während der drei nächtlichen Lufttemperaturmessfahrten am 4./5.1., 27./28.3. und 29./30.7. 2002, Krefeld.

Die weiteste Ausdifferenzierung des Lufttemperaturfeldes weist demnach die Nacht am 29./30.7.2002 auf. Korrigiert man die im Rahmen der Lufttemperaturmessfahrten ermittelten Temperaturen gemäß Kap. 3.2.1 mit der jeweils in Abbildung 7 zugeordneten Polynomfunktion, so ergibt sich für die Temperaturanomalien während der Messfahrten der in Abbildung 8 gezeigte Verlauf.

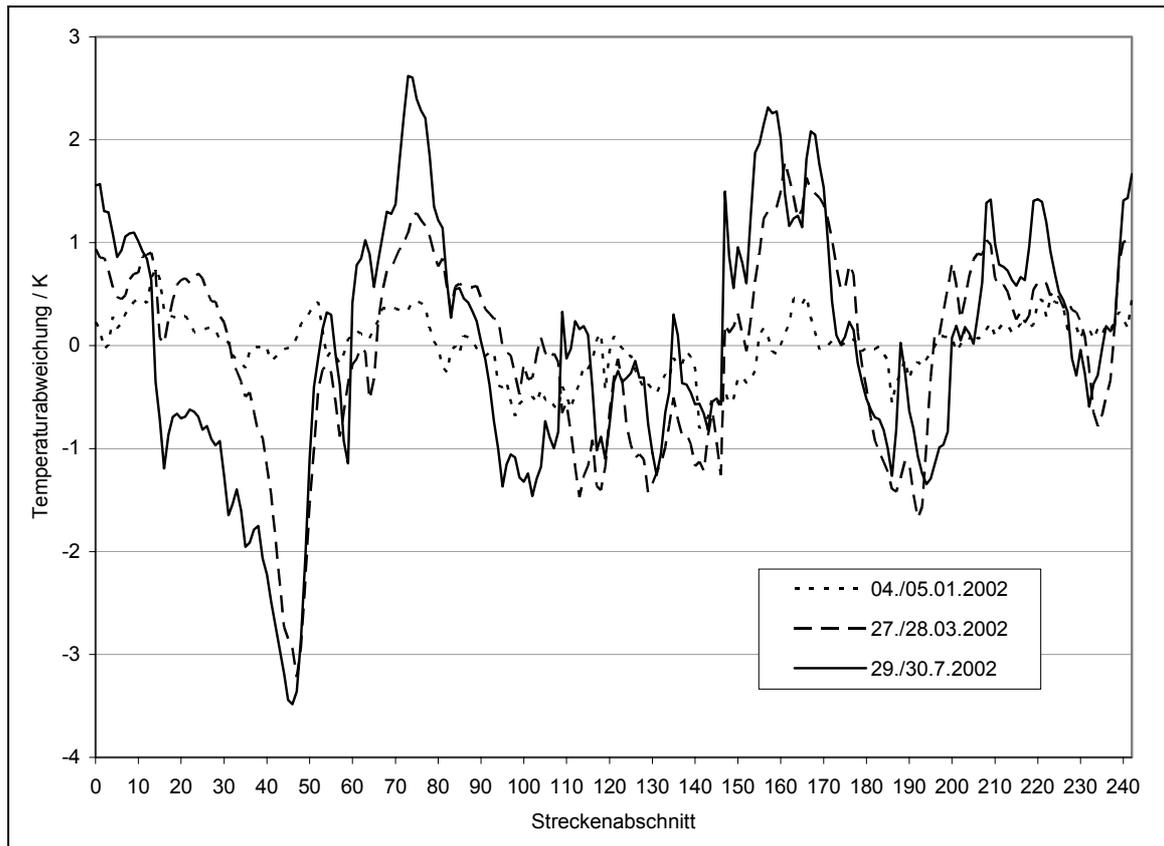


Abbildung 8: Streckenverlauf der Temperaturanomalien der drei nächtlichen Temperaturmessfahrten am 4./5.1., 27./28.3. und 29./30.7. 2002 im Vergleich.

Während die erste Messfahrt im Januar nur eine geringe Temperaturdifferenzierung aufweist, liegen die im Frühjahr und im Sommer aufgenommenen Anomalien in vergleichbaren Größenordnungen und verhalten sich gleichsinnig. Größere Abweichungen ergeben sich lediglich im Bereich der Streckenabschnitte 20-30 (westliches Uerdingen / Gartenstadt), 100 (Forstwald) und 200 (Bockum) mit deutlich negativen Anomalien im Sommer, während diese Bereiche im Frühjahr keine oder nur leicht positive Anomalien aufwiesen. Im Bereich um Messpunkt 70 (Innenstadt) fällt im Sommer die Überwärmung deutlicher aus als im Frühjahr bzw. um Messpunkt 189 (Verberg) fehlt kleinräumig die sonst negative Abweichung.

Aufgrund der weiten Temperaturdifferenzierung, des über die Messfahrdauer sehr gleichmäßigen Abkühlungsverhaltens (vgl. Abbildung 7) und der auch nachts noch hohen und somit besonders planungsrelevanten Lufttemperaturen wird in Karte 2 die Sommermessfahrt dargestellt.

Abbildung 9 zeigt die Windrichtungsverteilung der beiden Freilandstationen in Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) und der vergleichsweise gut ventilerten Station Hafen (K2). Die übrigen Stationen weisen durchweg höhere Calmenhäufigkeiten bzw. niedrigere mittlere Windgeschwindigkeiten auf.

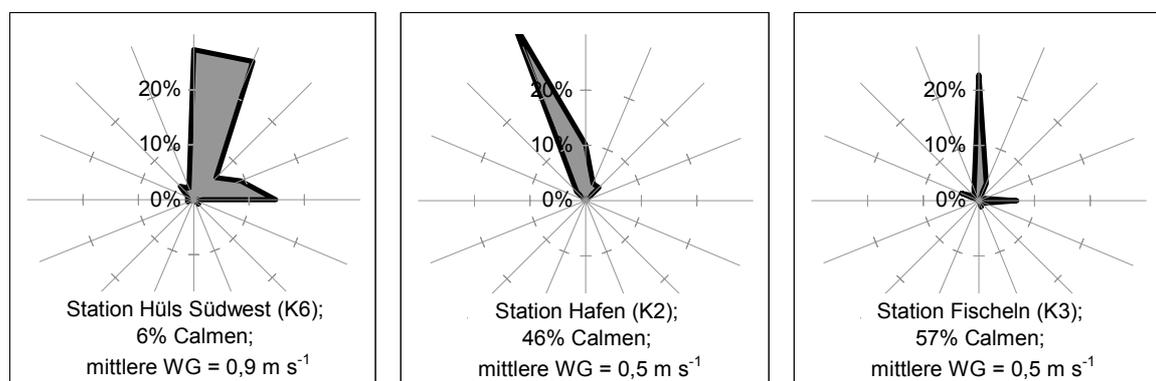


Abbildung 9: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten an verschiedenen Stationen während der nächtlichen Temperaturmessfahrt am 29./30.7. 2002, Krefeld.

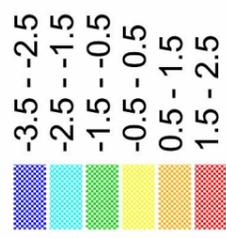
Die geringen Windgeschwindigkeiten und die hohe Häufigkeit an Calmen weisen deutlich auf die günstigen Bedingungen zur Einstellung einer ausgeprägten städtischen Wärmeinsel in der betreffenden Nacht hin. Als übergeordnete Windrichtungen traten vor allem Nord und Nord-Nordost, daneben auch Ost und Ost-Nordost auf. An der Station Hafen (K2) macht sich ein leichter Kanalisierungseffekt entlang des Rheins durch Einschwenken auf Nord-Nordwest bemerkbar.

Die auf Basis der Streckenabschnittswerte unter Berücksichtigung von Flächennutzung und Topographie interpolierte flächenhafte Darstellung der Temperaturanomalien in der Messfahrtnacht in Karte 2 weist vor allem die Krefelder Innenstadt mit einem entsprechend der vorherrschenden Windrichtung leicht nach Süden verschobenen Maximum sowie (sekundär) den rheinnahen Bereich der Stadtteile Uerdingen und Linn als Kerne der städtischen Überwärmung aus. Ein schwaches lokales Maximum bei Verberg ist angesichts der beiden anderen Messfahrten (s.o.) als atypisch zu werten. Die stärkste Abkühlung konnte nördlich der Stadt im Freilandgebiet „Hülser Bruch“ mit Wald- und Grünlandnutzung sowie dem östlich benachbarten Waldgebiet beobachtet werden.

Karte 2: Isanomalienkarte der nächtlichen Lufttemperaturverteilung im Untersuchungsgebiet der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld auf Basis der Temperaturmessfahrt am 29./30.7.2002.

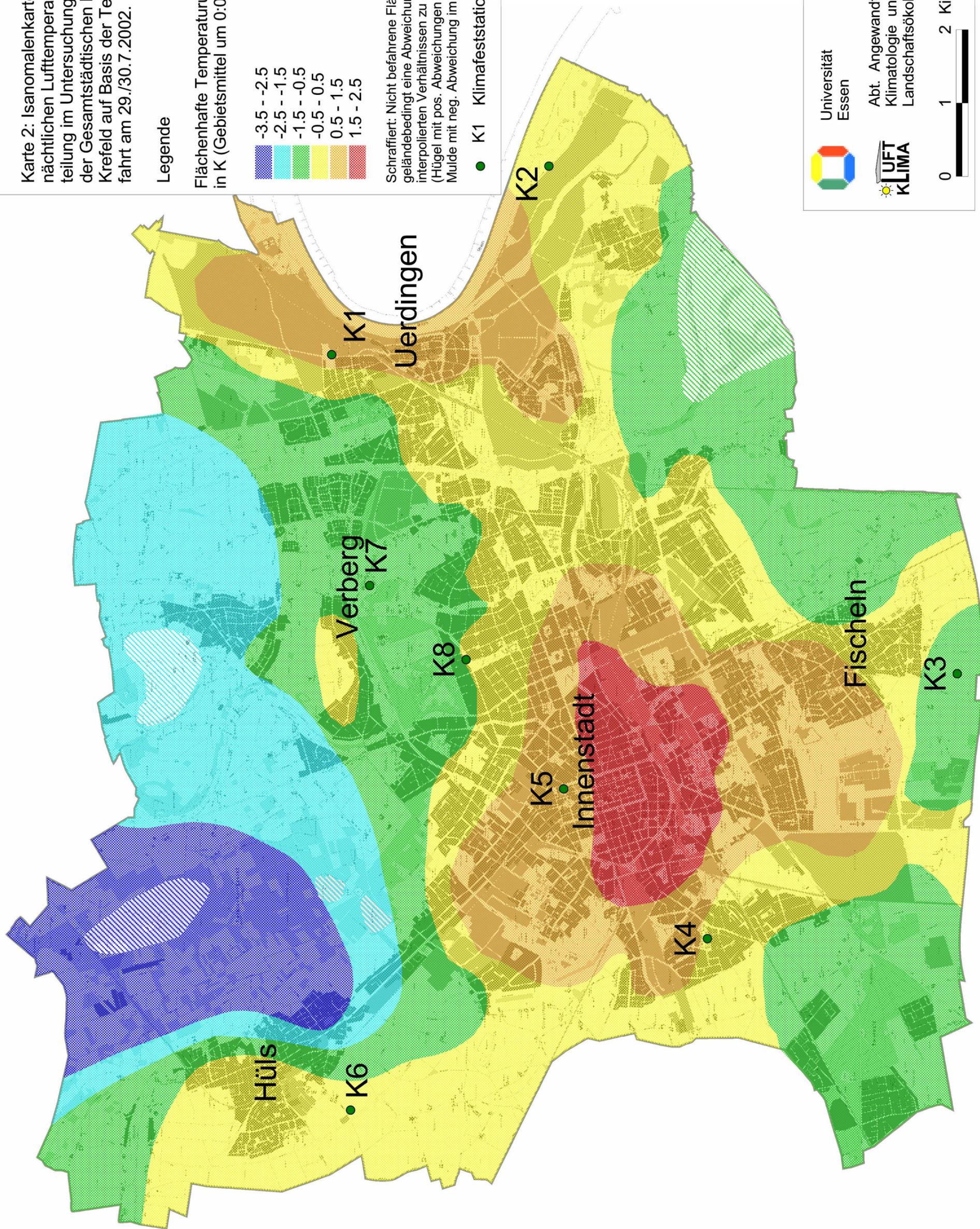
Legende

Flächenhafte Temperaturunterschiede in K (Gebietsmittel um 0:00 MEZ: 22°C)



Schraffiert: Nicht befahrene Flächen, für die geländebedingt eine Abweichung von den interpolierten Verhältnissen zu erwarten ist (Hügel mit pos. Abweichungen im Norden, Mulde mit neg. Abweichung im Südosten)

● K1 Klimafeststation



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



0 1 2 Kilometer

Demgegenüber bleibt oberhalb der Terrassenkante auch im Freiland die Abkühlung relativ gering. Verallgemeinernd lässt sich festhalten, dass im grundsätzlich wärmeren bebauten Bereich die Dichte und räumliche Ausdehnung der Bebauung für das Ausmaß der Überwärmung entscheidend ist, im grundsätzlich kühleren Umland hingegen die Geländehöhe. Dabei stellen sich insbesondere bei enger räumlicher Nachbarschaft von Erhebungen und Mulden die tieferen Temperaturen in den Mulden ein, da sich hier die dichtere Kaltluft sammelt und die geringeren Windgeschwindigkeiten, aber auch das in der Regel höher anstehende Grundwasser (vgl. auch EMONDS 1981) das Zustandekommen von Inversionen begünstigen. Eine Ausnahme stellt aufgrund des mäßigenden Temperatureinflusses und der geringen Oberflächenrauigkeit des Wasserkörpers der ebenfalls tiefgelegene Rheinuferbereich dar. Besonders deutlich zeigt sich der Geländeeinfluss entlang der durch Hüls und östlich an Fischeln vorbei verlaufenden Terrassenstufe, an der sich die tiefere Temperatur jeweils im Osten einstellt.

Aus diesem Verteilungsmuster lassen sich in Form von Analogieschlussbetrachtungen Rückschlüsse auf weitere kleinräumige Temperaturanomalien an Orten ziehen, die sich entweder mit dem Messbus nicht befahren ließen oder aus Zeitgründen nicht in die Messroute mitaufgenommen werden konnten. So ist zu vermuten, dass im Latumer Bruch und dem nördlich bis Linn angrenzenden Freilandgebiet tiefere, über den natürlichen und künstlichen Hügeln im Norden des Stadtgebietes (Kapuzinerberg, Inrather Berg, Hülsberg, Egelsberg) dagegen höhere Temperaturen herrschten als in der Karte dargestellt.

Die Temperaturdifferenz zwischen den kältesten und den wärmsten Bereichen des Stadtgebietes erreicht in dieser Nacht etwa 6 K. Dieser hohe Wert beruht jedoch auf der singulären Erscheinung einer besonders starken Abkühlung östlich von Hüls, so dass für die Ermittlung der Wärmeinselintensität sinnvoller ein die mittleren Umlandverhältnisse repräsentierender Standort herangezogen wird, wie in Kap. 4.2.5 mit Station Fischeln (K3) geschehen. Im vorliegenden Fall beträgt der Temperaturunterschied etwa 3 K.

Auch angesichts der Überwärmung des Siedlungsbereiches gilt es zu differenzieren zwischen dem einen kleinen Teil der Gesamtsiedlungsfläche einnehmenden Kernbereich und den großen Flächen nur mäßiger Überwärmung zwischen der Innenstadt und Urdingen sowie in der Mehrzahl der Vororte. Beide Erscheinungen sind auf Baukörperstrukturen zurückzuführen, die für Krefeld typisch sind. Diese zeichnen sich durch eine durch enge Straßen getrennte vielgeschossige Bebauung in der schachbrettartigen Innenstadt sowie durch den ausgesprochenen Grünflächenreichtum der reinen Wohngebiete aus. Gewerbe- und Industrieflächen sowie die eng bebauten alten Ortskerne der Vororte nehmen dabei eine Mittelstellung ein, die im Einzelfall nach Gebäudehöhe und -dichte, Ausdehnung und Einfluss benachbarter Strukturen stark variieren kann.

4.3 Luftfeuchtigkeit

Neben der Lufttemperatur wurde an den acht Klimafeststationen die relative Luftfeuchtigkeit erfasst. Tabelle 8 gibt hierzu eine Übersicht ausgewählter statistischer Kennwerte. Abbildung 10 zeigt den mittleren jährlichen Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit. Die insbesondere nachts hervortretenden interstationären Unterschiede betragen bis zu zehn Prozentpunkte. Eine vergleichsweise geringe relative Luftfeuchtigkeit weisen die Feststationen Lindental (K4) und Innenstadt (K5) auf. Am höchsten fällt sie an Station Stadtwald (K8) aus, was in erster Linie auf die Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit von der Lufttemperatur zurückzuführen ist. Als Einzelelement gibt die relative Luftfeuchtigkeit im interstationären Vergleich wenig Interpretationsaussage. In Hinblick auf Kombinationsgrößen im Rahmen human-biometeorologischer Beobachtungen kommt ihr jedoch eine große Bedeutung zu (Kap. 4.6).

Tabelle 8: Statistische Angaben zur relativen Luftfeuchtigkeit im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Zeitraum	Relative Feuchte [%]	Stationsname								Gebietsmittel
		Uerdingen (K1)	Hafen (K2)	Fischeln (K3)	Lindental (K4)	Innenstadt (K5)	Hüls Südwest (K6)	Verberg (K7)	Stadtwald (K8)	
Gesamtzeitraum	\overline{rF}	75,3	76,7	78,3	73,6	71,3	77,7	77,1	81,6	76,4
	σ_{rF}	17,4	16,8	16,6	17,4	17,1	16,3	18,0	17,8	17,4
	$rF_{\min, \text{abs.}}$	24,3	26,8	26,9	20,8	21,6	26,2	23,1	25,2	24,3
autochthone Tage	\overline{rF}	66,5	66,7	70,2	64,2	59,4	69,1	69,5	73,4	67,4
	σ_{rF}	18,0	18,2	19,1	19,4	16,2	18,7	21,7	21,2	19,5
	$rF_{\min, \text{abs.}}$	27,2	31,6	32,2	24,4	26,8	26,2	27,4	29,7	28,1

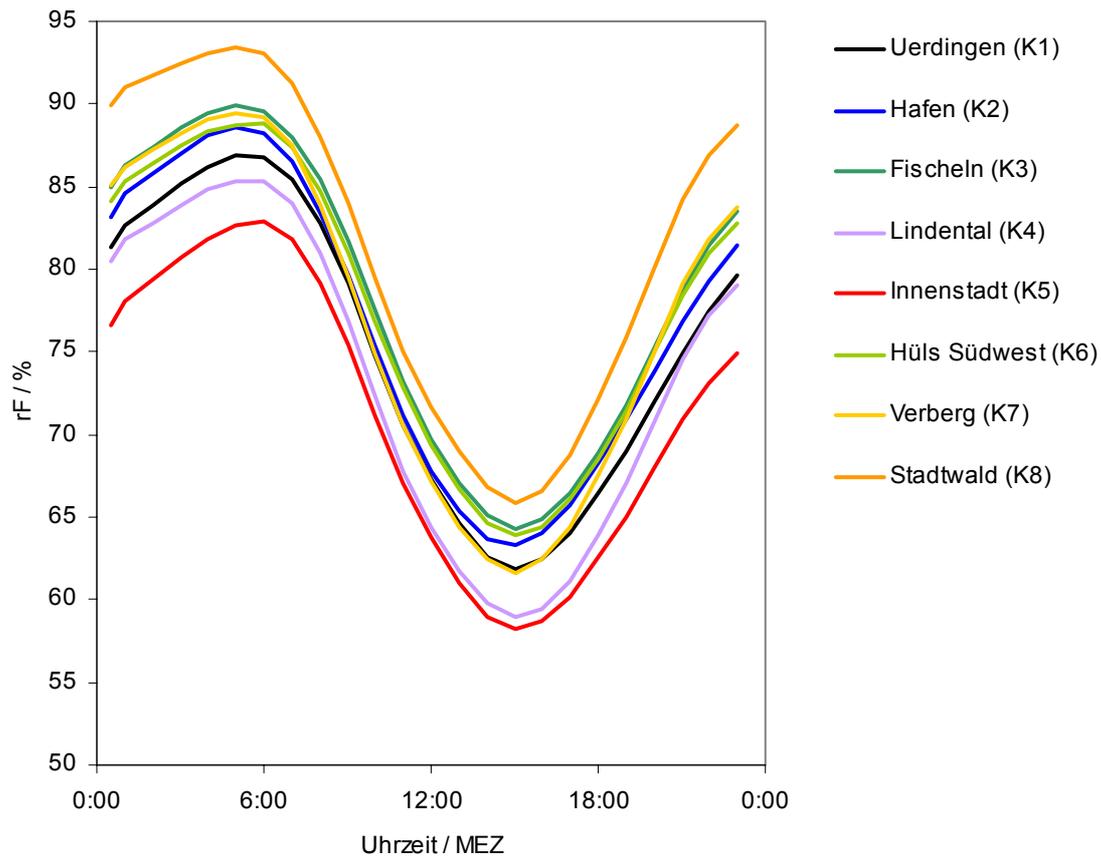


Abbildung 10: Mittlerer Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

4.4 Austauschverhältnisse

4.4.1 Durchschnittliche Strömungsverhältnisse

Bebauung und Bewuchs sind Rauigkeitselemente, die die übergeordnete Strömung abbremsen und/oder umlenken können (DÜTEMEYER 2000). Bisweilen findet durch Düseneffekte auch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit statt. Für lufthygienische und klimatische Fragestellungen spielen Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowohl der übergeordneten Strömung als auch der durch Bebauung und Bewuchs modifizierten Strömungsverhältnisse eine große Rolle. Tabelle 9 gibt eine Übersicht über die Windverhältnisse bezogen auf den Gesamtzeitraum und auf das Datenkollektiv der Strahlungstage im Krefelder Untersuchungsgebiet. Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind an den Standorten Fischeln (K3) sowie Hüls Südwest (K6) aufgrund ihrer guten Anströmbarkeit im Stationsvergleich mit $2,3 \text{ m s}^{-1}$ bzw. $2,2 \text{ m s}^{-1}$ maximal. An den Standorten Lindental (K4), Innenstadt (K5) sowie Stadtwald (K8) sind die Windgeschwin-

digkeiten durch hindernisbedingte Rauigkeits- bzw. Umlenkeffekte auffällig reduziert ($1,2 \text{ m s}^{-1}$, $1,1 \text{ m s}^{-1}$ bzw. $1,0 \text{ m s}^{-1}$). Daraus folgt, dass insbesondere an den Standorten Lindental (K4), Innenstadt (K5), Verberg (K7) und Stadtwald (K8) während autochthoner Tage mit Austauscharmut zu rechnen ist. Die Hauptwindrichtung des Gesamtzeitraums liegt bei allen Stationen innerhalb des Westsektors, an Strahlungstagen überwiegen dagegen Winde aus östlichen Richtungen. In beiden Fällen ist eine deutliche Südkomponente vorhanden.

Tabelle 9: Statistische Angaben zu Windgeschwindigkeit [m s^{-1}] und Windrichtungshäufigkeit [%] im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Zeitraum		Stationsname								Gebietsmittel
		Uerdingen (K1)	Hafen (K2)	Fischeln (K3)	Lindental (K4)	Innenstadt (K5)	Hüls Südwest (K6)	Verberg (K7)	Stadtwald (K8)	
Windgeschw.	\bar{u}	1,5	1,8	2,3	1,2	1,1	2,2	1,4	1,0	1,6
Gesamtzeitraum	σ_u	0,7	0,9	1,3	0,7	0,5	1,4	0,9	0,8	1,0
	$u_{\text{max,abs.}}$	6,0	7,9	10,4	5,6	4,3	10,7	6,3	5,1	7,0
Hauptw.-richtung	Sektor	SW	SSW	SW	SW	NW	SW	S	WSW	SW
Gesamtzeitraum	Häufigkeit	11,9	17,0	12,0	9,9	15,0	13,2	9,8	21,1	10,1
Windgeschw.	\bar{u}	1,0	1,2	1,4	0,8	0,9	1,4	0,8	0,6	1,1
Strahlungstage	σ_u	0,5	0,6	0,8	0,5	0,4	0,7	0,7	0,6	0,7
	$u_{\text{max,abs.}}$	3,0	3,7	3,9	2,0	1,9	4,2	2,6	2,3	3,0
Hauptw.-richtung	Sektor	ESE	S	SSE	SSE	SSE	SE	SSE	WSE	SE
Strahlungstage	Häufigkeit	16,4	15,7	16,0	12,2	18,3	14,1	10,4	9,3	9,3

4.4.2 Häufigkeiten verschiedener Windrichtungen

Windrichtungshäufigkeitsrosen geben den Prozentsatz der aus den einzelnen Sektoren stammenden Windrichtungen in Diagrammform wieder. Die 16-teiligen Windrosen in Abbildung 11 zeigen stationsweise die Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen Windrichtungen zusammen mit den Anteilen der Calmen (Dreiminutenmittel der Windgeschwindigkeiten $< 0,5 \text{ m s}^{-1}$). Dem gesamten Untersuchungszeitraum sind die Windrichtungshäufigkeiten der Strahlungstage gegenübergestellt.

Die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Windrichtungen zeigt eine Hauptwindrichtung aus südlichen und westlichen Richtungen an. Insbesondere weisen die beiden Umlandstationen Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) ein weitgehend unbeeinflusstes Windrichtungsspektrum auf, was die in dieser Region typischen Windrichtungsverteilung mit einem Maximum im Südwest-Sektor und einem Nebenmaximum im Südsüdost-Sektor

widerspiegelt. Die übrigen Stationen lassen, bedingt durch spezifische Flächennutzungen und der Anordnung von Rauigkeitselementen aus Baukörper- und Vegetationsstrukturen deutliche Abweichungen von der übergeordneten Windrichtungsverteilung erkennen, wobei vor allem standortspezifische Unterschiede in den Calmenhäufigkeiten festzustellen sind.

Während die Feststationen Hafen (K1) und Lindental (K4) im Gesamtzeitraum nur wenig von den übergeordneten Strömungsverhältnissen abweichen, die durch die Feststationen Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) charakterisiert werden, ist die Windrichtung an Feststation Verberg K(7) in südliche Windrichtungen verschoben, ein ausgeprägtes Maximum im südwestlichen Sektor fehlt. An der Innenstadtstation (K5) vor dem Polizeipräsidium zeigt sich ein prägnantes Beispiel einer Strömungskanalisation mit Windrichtungen aus überwiegend nordwestlichen und südöstlichen Richtungen. Die Konstellation der Gebäude im Bereich der dortigen Straßenkreuzung Ostwall/Nordwall mit unterschiedlichen Haushöhen und dem breiten Kreuzungsbereich der beiden Straßen erzwingt eine Hauptwindrichtung aus Nordost mit einem Nebenmaximum aus Südost. An Feststation Stadtwald (K8) innerhalb vegetationsreicher Wohnbebauung ist die Hauptwindrichtung scharf auf Westsüdwest reduziert. Hier zeichnet die Windrose die Lage der Wilhelmshofallee nach.

Bezüglich der Calmenhäufigkeiten im Gesamtzeitraum ergibt sich gegenüber den Umlandstationen für Uerdingen (K1) ein etwa doppelt so häufiges Auftreten von Windstillen (6,1, %). An Feststation Hafen (K2) sind Windstillen mit 2,6 % minimal. Häufige Windstillen mit 14,2 % bzw. 14,1 % herrschen an den Standorten der Feststationen Lindental (K4) und Verberg (K7) vor, wobei ein hoher Vegetationsanteil innerhalb der dortigen aufgelockerten Wohnbebauung im Falle von Lindental (K4) bzw. die Nähe zum großflächig bewaldeten, luvseitigen Stadtwald im Falle von Verberg (K7) als ursächlich für die Windminderung angesehen wird. Im Stadtzentrum, das sich durch großflächig vegetationsarme, mehrgeschossige Bauweise auszeichnet, beschränken sich Windstillen an Feststation Innenstadt (K5) auf 8 %. Das spezifische Muster dichter Vegetation und Wohnbebauung der unmittelbaren Umgebung führt an Feststation Stadtwald (K8) im Stationsvergleich zum höchsten Calmenanteil (24,4 %).

An Strahlungstagen zeigt sich eine vom Gesamtzeitraum deutlich abweichende übergeordnete Windrichtungshäufigkeitsverteilung mit Maxima im süd- bis südöstlichen Sektor. So weisen die Umlandstationen Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) das Hauptmaximum der Windrichtung jeweils im Südsüdost- bzw. Südost-Sektor auf. Die Hauptwindrichtung dreht sich an Strahlungstagen an den Feststationen Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5) stärker in östliche Richtungen als an den Feststationen Hafen (K2),

Lindental (K4) und Verberg (K7). Am Stadtwald (K8) bleibt die Hauptwindrichtung gleich. Wie aus Abbildung 11 hervorgeht, steigen die Calmenhäufigkeiten an Strahlungstagen je nach Station auf 8,5 % bis 46 % an und erhöhen sich damit gegenüber dem Gesamtzeitraum um den Faktor 1,9 bis 3,8.

Somit kann das Hauptmaximum einer jeden Station im Gesamtzeitraum auf die vorherrschende Windrichtung während allochthoner Wetterlagen, die sekundären Maxima auf die Hauptwindrichtungen während der Strahlungstage zurückgeführt werden. Boden-nahe Spurenstoffemissionen werden damit je nach Wetterlage in verschiedene Richtungen verfrachtet bzw. kommen aus verschiedenen Richtungen. Bei allochthonen Wetterlagen stammen sie aus südwestlichen, bei autochthonen Wetterlagen aus südöstlichen Richtungen. Unter Berücksichtigung, dass für den Untersuchungszeitraum 33 Strahlungstage festgestellt wurden, entfallen 9 % der Jahresstunden auf Situationen, in denen die Stationsstandorte unter lufthygienischer Beeinflussung aus südöstlichen Richtungen stehen.

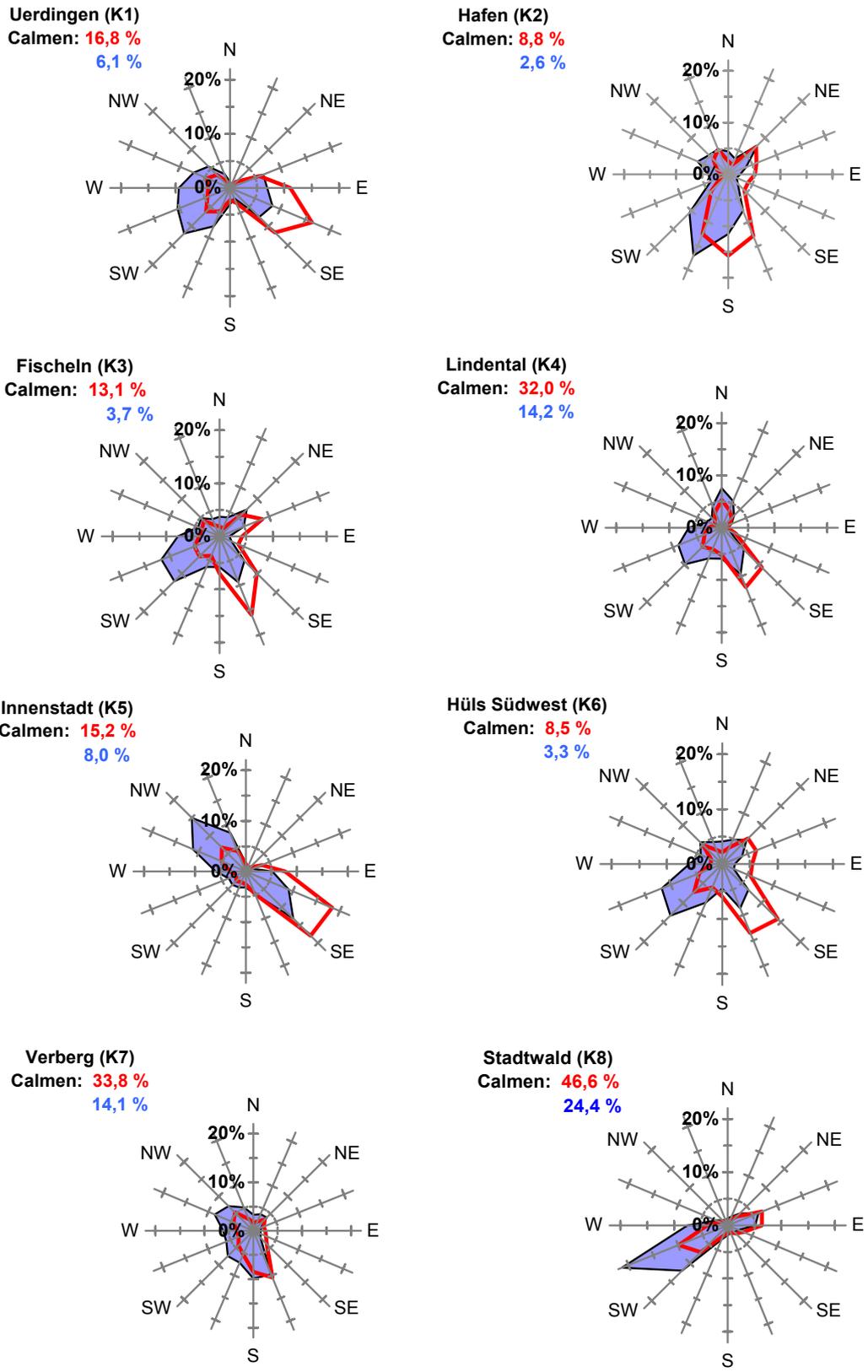


Abbildung 11: Windrichtungshäufigkeiten im Krefelder Untersuchungsgebiet. Blaue Signaturen zeigen den Gesamtzeitraum, rote die Strahlungstage (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Dreiminutenmittelwerte).

4.4.3 Tages- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit

Den mittleren Tages- und Jahresgang der Windgeschwindigkeit an den Standorten der Feststationen zeigen Abbildung 12 und Abbildung 13. Aufgrund der durch die Sonneneinstrahlung bedingten Erwärmung der Erdoberfläche und der daraus resultierenden Konvektionsprozesse kommt es insbesondere am Nachmittag zu höheren Windgeschwindigkeiten in Bodennähe mit einem Tagesmaximum. Dieses Phänomen ist bei allen Station zu beobachten (Abbildung 12). Im Jahresgang weisen die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten erwartungsgemäß ein spätsommerliches Minimum sowie ein Maximum im Winter auf (Abbildung 13), was primär auf die im Sommer geringen und im Winter stärkeren großräumigen Luftdruckgegensätze zwischen den niederen und höheren Breiten der Nordhalbkugel mit daraus resultierendem typischen Windgeschwindigkeitsmuster zurückzuführen ist. Kleinräumig führt die Belaubung der Vegetation im Sommerhalbjahr zu einer zusätzlichen Strömungsminderung im Vergleich zum Winter.

Im interstationären Vergleich wird in Abbildung 12 und Abbildung 13 die zu allen Tages- und Jahreszeiten begünstigte Austauschsituation an den Umlandstandorten Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6), der eingeschränkte Austausch an den bebauungsgeprägten Standorten sowie eine Zwischenstellung der Feststation Hafen (K2) deutlich. Insgesamt sinken die Strömungsgeschwindigkeiten an den Feststationen gegenüber den Umlandstationen häufig um mehr als die Hälfte, bedingt durch die Rauigkeitswirkung von Baukörperstrukturen und hochgewachsener Vegetation.

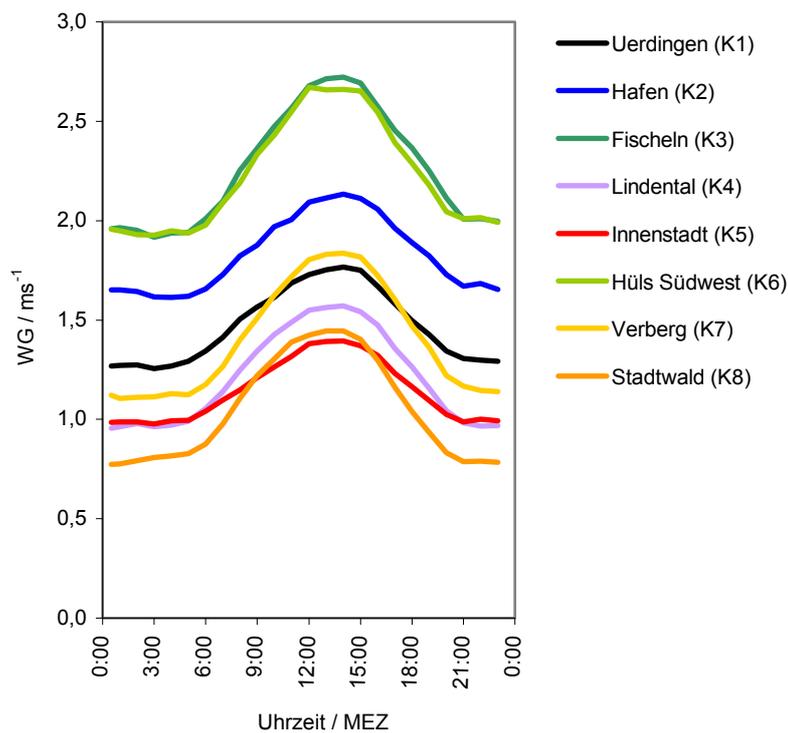


Abbildung 12: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 - 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

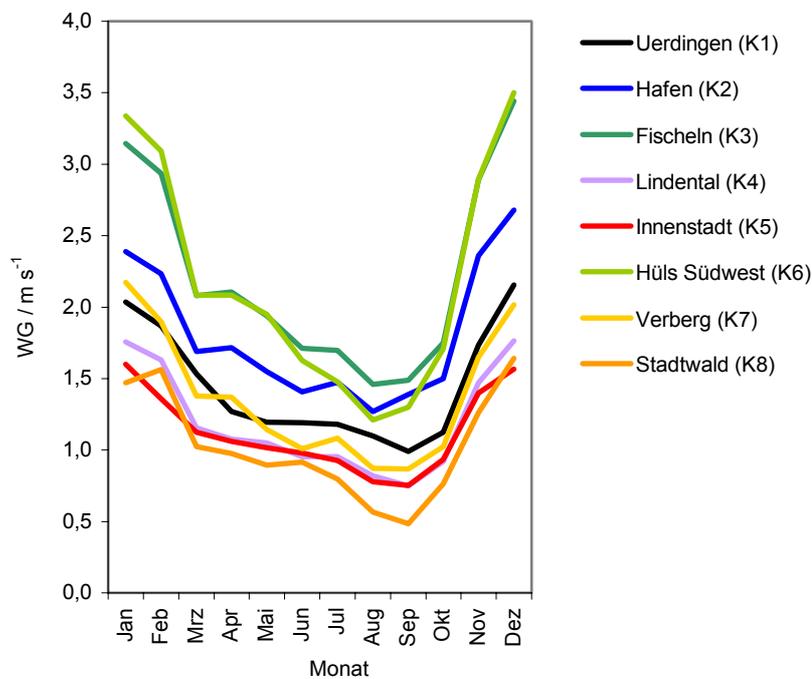


Abbildung 13: Mittlerer Jahrgang der Windgeschwindigkeit im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

4.4.4 Auftreten von Schwachwinden

Für die Belüftungssituation einer Stadt interessieren besonders die Häufigkeit und das zeitliche Auftreten geringer Windgeschwindigkeiten, da es durch Abkopplung des bodennahen Windfeldes vom übergeordneten Strömungsregime zu verringerten Austauschbedingungen unterhalb des Dachniveaus kommen kann.

Abbildung 14 zeigt die kumulative Häufigkeitsverteilung dieser als Schwachwinde bezeichneten eingeschränkten Belüftungssituationen im Krefelder Untersuchungsgebiet mit folgenden Anteilen von Schwachwindstunden ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$ nach MURL (1989)) im Untersuchungszeitraum: 79,4 % (Innenstadt K5), 76,9 % (Stadtwald K8), 71,5 % (Lindental K4), 59,6 % (Uerdingen K1), 58,3 % (Verberg K7), 41,4 % (Hafen K2), 34,7 % (Hüls Südwest K6), 29,2 % (Fischeln K3). Die Windgeschwindigkeiten an den relativ frei anströmbaren Feststationen Hafen (K2), Fischeln (K3), Hüls Südwest (K6) mit geringem Anteil sind deutlich in Richtung höherer Werte verschoben. Damit sind insbesondere die Standorte Lindental (K4), Innenstadt (K5) und Stadtwald (K8) hinsichtlich ihres Luftaustausches benachteiligt. Uerdingen (K1) und Verberg (K7) nehmen eine Zwischenstellung ein.

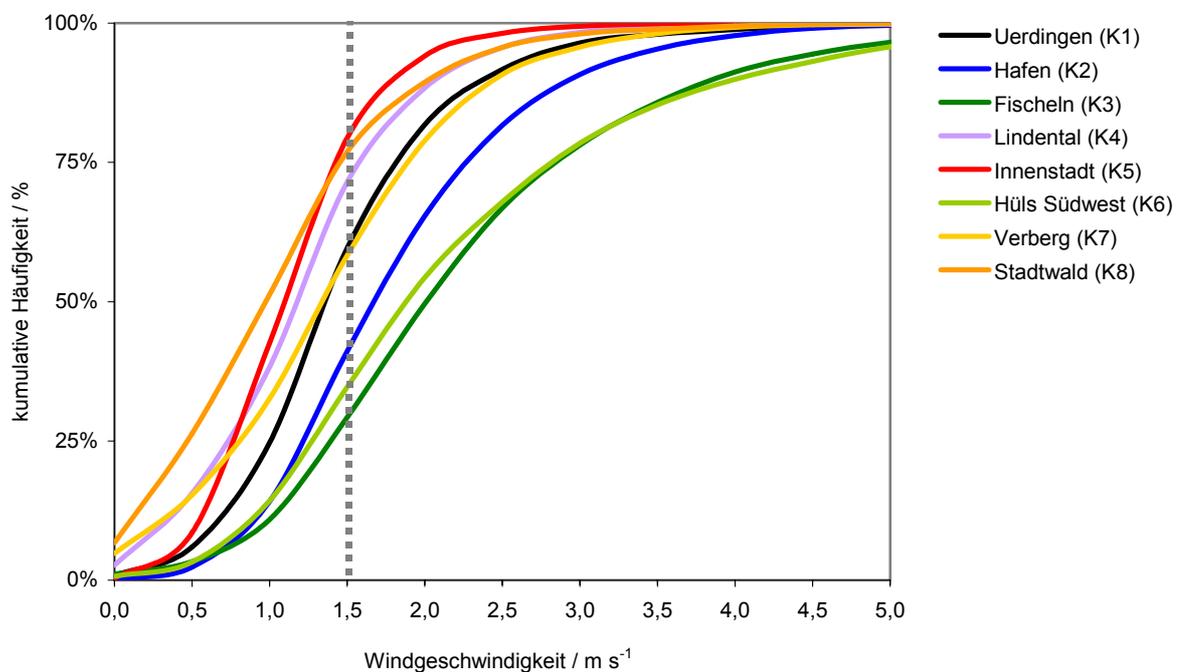


Abbildung 14: Kumulative Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Den Jahresverlauf der Schwachwindstunden an den einzelnen Stationen zeigt Tabelle 10 mit einer geringen relativen Häufigkeit in den Wintermonaten und einem Maximum im Herbst, übereinstimmend mit dem Jahrgang der Windgeschwindigkeiten in Abbildung 13. Die Stationen in bebauungsgeprägter Umgebung zeigen dabei erwartungsgemäß deutlich höhere Anteile an Schwachwindstunden (z.T. > 90 %) als die Umlandstationen. Als Extrembeispiel unterschiedlicher Anzahlen von Schwachwindstunden vergleicht Abbildung 15 den Jahrgang an den Feststationen Fischeln (K3) und Innenstadt (K5).

Tabelle 10: Monatliche relative Häufigkeiten von Schwachwindstunden ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Rel. Häufigkeit von Schwachwindstunden [%]	Stationsname								Gebietsmittel
	Uerdingen (K1)	Hafen (K2)	Fischeln (K3)	Lindental (K4)	Innenstadt (K5)	Hüls Südwest (K6)	Verberg (K7)	Stadtwald (K8)	
Jan	21,0	11,4	7,3	35,6	44,0	5,6	18,5	54,8	24,8
Feb	24,8	16,6	8,1	41,4	68,0	7,8	25,1	50,8	30,3
Mrz	58,5	42,5	31,9	73,2	82,2	32,5	58,1	76,0	56,9
Apr	66,4	45,1	28,3	79,0	83,5	31,0	55,0	78,5	58,4
Mai	76,2	50,8	31,2	81,0	91,3	31,5	73,4	87,9	65,4
Jun	79,6	60,7	39,9	91,9	94,7	44,6	80,9	85,3	72,2
Jul	76,9	52,8	42,4	87,7	95,9	54,7	73,5	89,4	71,7
Aug	81,8	73,1	54,8	96,7	99,0	74,7	89,8	100,0	83,7
Sep	88,2	64,3	55,6	93,9	93,9	70,6	81,2	96,4	80,5
Okt	83,9	51,9	34,5	90,4	95,6	42,9	81,6	95,3	72,0
Nov	43,2	17,9	12,9	58,2	63,5	15,2	46,3	64,3	40,2
Dez	26,9	15,5	10,3	40,2	53,7	15,7	30,7	52,6	30,7
Jahresmittel	60,6	41,9	29,8	72,4	80,4	45,6	59,5	77,6	57,2

Die maximale Dauer von Schwachwindepisoden (Tabelle 11) variiert je nach Feststation und Jahreszeit stark. Die längsten Schwachwindepisoden treten an allen Stationen in den Monaten August und September auf. Dabei ist der Jahrgang an den Feststationen Hafen (K2), Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) gering ausgeprägt, Schwachwindepisoden dauern dort in allen Monaten weniger als 65 Stunden (= 2,7 Tage) an. Im Falle von Stadtwald (8) und Innenstadt (K5) treten dagegen maximale Episodenlängen von bis zu 296 Stunden bzw. 577 Stunden auf, was bedeutet, dass in der Innenstadt (K5) an 12 aufeinanderfolgenden Tagen im August, am Stadtwald (K8) sogar den gesamten Monat hindurch Schwachwinde vorherrschten. Abbildung 16 gibt als Extrembeispiel die unterschiedlichen Längen der Schwachwindepisoden zwischen Station Fischeln (K3) und Stadtwald (K8) wieder.

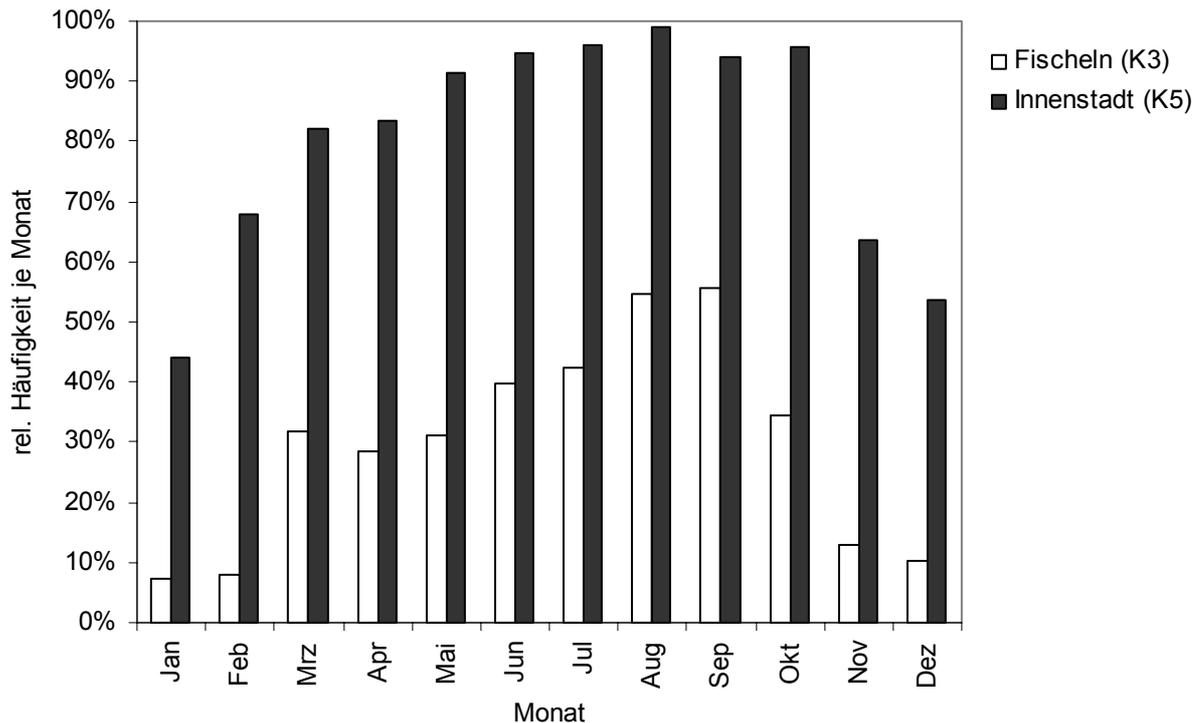


Abbildung 15: Jahrgänge der Schwachwindhäufigkeit ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) von Feststation Fischeln (K3) und Innenstadt (K5) (Messzeitraum: 1.1. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Tabelle 11: Maximale Dauer von Schwachwindepisoden im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Maximale Episodendauer [h]	Stationsname								Gebietsmittel
	Uerdingen	Hafen	Fischeln	Lindental	Innenstadt	Hüls Südwest	Verberg	Stadt-wald	
	(K1)	(K2)	(K3)	(K4)	(K5)	(K6)	(K7)	(K8)	
Jan	29	22	20	46	49	19	34	83	37,75
Feb	18	17	12	58	111	11	18	53	37,25
März	48	47	43	72	141	36	69	123	72,38
Apr	181	64	36	164	261	23	45	358	141,5
Mai	72	41	22	112	118	15	64	210	81,75
Jun	40	39	15	93	97	35	45	99	57,88
Jul	60	48	26	89	331	28	94	232	113,5
Aug	72	70	23	255	296	45	138	577	184,5
Sep	214	63	42	180	238	63	79	282	145,1
Okt	56	24	20	113	111	19	60	107	63,75
Nov	64	21	12	73	72	11	70	174	62,13
Dez	41	17	14	55	71	21	44	87	43,75
Jahresmittel	75	39	24	109	158	27	63	199	87

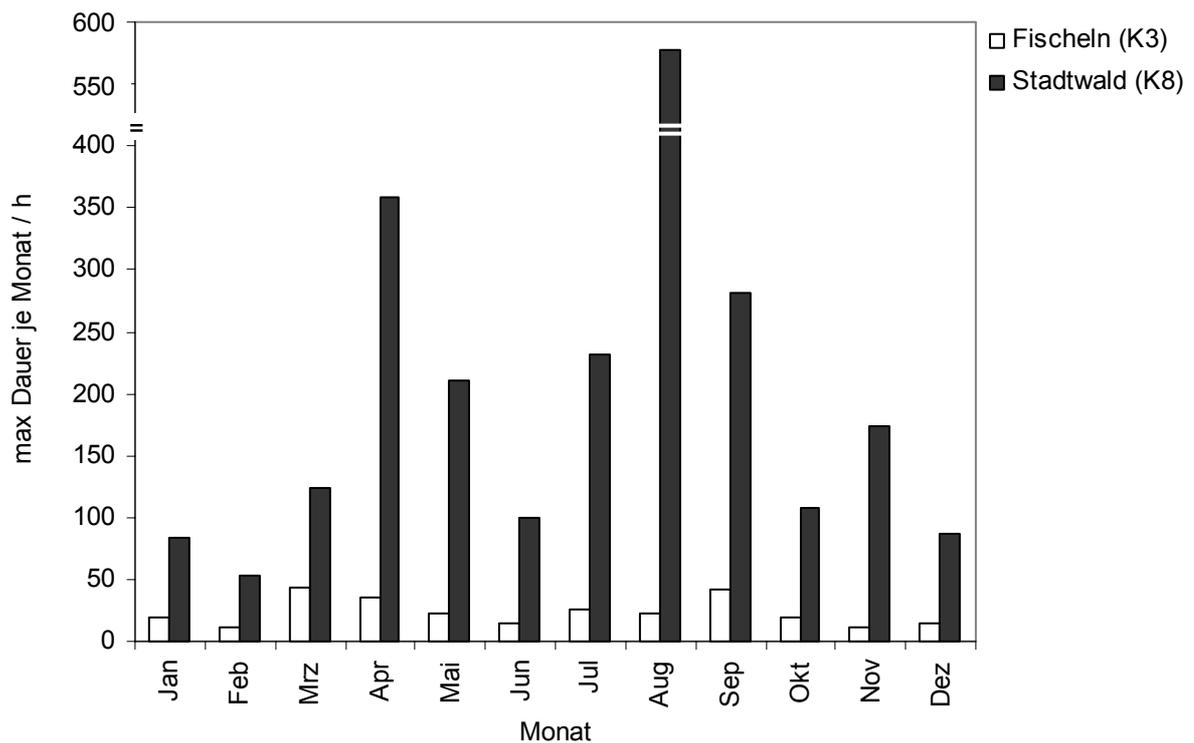


Abbildung 16: Jahrgang der maximalen Dauer von Schwachwindepisoden (Windgeschwindigkeit $\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) an den Feststationen Fischeln (K3) und Stadtwald (K8) (Messzeitraum 1.11. 2001 bis 31.10. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Berücksichtigt man die durchschnittliche Schwachwindhäufigkeit aller Stationen sowie das Mittel der maximalen Schwachwindepisodenlänge je Monat, muss für das Krefelder Untersuchungsgebiet davon ausgegangen werden, dass in 56,3 % der Jahresstunden verringerte Austauschbedingungen vorherrschen, die eine Andauer von durchschnittlich vier zusammenhängenden Tagen pro Monat aufweisen können. Allerdings können die Austauschverhältnisse lokal deutlich von diesem Mittelwert abweichen.

Insgesamt ist der Luftaustausch an autochthonen Tagen sowie im Gesamtzeitraum an den Standorten Lindental (K4), Innenstadt (K5) und Stadtwald (K8) wegen des hohen Anteils von Schwachwinden und Windstillen benachteiligt. Die Standorte Uerdingen (K1) und Verberg (K7) nehmen eine Zwischenposition ein, die Feststationsstandorte Hafen (K2), Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) weisen die geringsten Anteile an Schwachwindstunden auf.

4.5 Kaltluftausbreitungskampagnen

Durch die Freisetzung und Verfolgung des Tracergases SF_6 in potentiellen Kaltluftbildungsgebieten im Bereich der vier Plangebiete während ausgewählter Wetterlagen wurden die Kaltluftdynamik und die mögliche Eindringtiefe von Kaltluft vom Emissionspunkt in den bebauten Bereich hinein kartiert. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber, ob eine Fläche, für die Nutzungsänderungen geplant sind, in ihrem derzeitigen Zustand als Kalt- bzw. Frischluftbildungsgebiet oder Ventilationsschneise fungiert. Da thermisch oder gravitativ angetriebene Kaltluftströme in schwach reliefiertem Gelände mit geringen Temperaturunterschieden wie im Krefelder Stadtgebiet naturgemäß selten sind, kommen für derartige Untersuchungen vor allem Wetterlagen mit einem leichten übergeordneten Strömungsantrieb in Betracht. In drei der vier Plangebiete bedeutet dies eine Windrichtung aus den Sektoren Südwest bis Nord. Diese Wetterlagen sind jedoch meist keine für Kaltluftuntersuchungen relevanten austauscharmen Strahlungswetterlagen. Die gewählten Termine stellen daher Kompromisse zwischen der optimalen Anströmrichtung und einer optimalen kaltluftspezifischen Wetterlage dar.

4.5.1 Plangebiet Verberg

Die Messungen wurden am 12.4.2002 von 1:40 Uhr bis 4:46 Uhr MEZ durchgeführt. Das Einsatzdatum wurde aufgrund des Vorherrschens einer kaltluftrelevanten Wetterlage (Übergang Hoch Fennoskandien / Trog Mitteleuropa nach DEUTSCHER WETTERDIENST 2002) mit geeigneter übergeordneter Windrichtung (s.u.) ausgewählt. Das Tracergas SF_6 wurde 100 m südlich von Station Verberg (K7) mit einem Massenstrom von $0,8 \text{ g s}^{-1}$ emittiert. Zuvor wurde eine Hintergrundkonzentration von 0,07 ppb ermittelt. Die mittlere Windgeschwindigkeit und Windrichtungsverteilung an unterschiedlich beeinflussten Messstandorten während dieses Zeitraums ist Abbildung 17 zu entnehmen.

Danach nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit von der weitgehend frei anströmbaren Station Fischeln (K3) bis zur stark durch Bäume und Gebäude beeinflussten Station Stadtwald (K8) in der Nähe des Untersuchungsgebiets ab. Letztere weist zudem eine hohe Häufigkeit an Windstillen (Calmen) auf, bei denen die geringe Strömungsgeschwindigkeit unter $0,5 \text{ m s}^{-1}$ keine Aussagen über die Windrichtung mehr erlaubt. An den übrigen Stationen ist eine unterschiedlich starke Westabweichung von der am Freilandstandort vorherrschenden Hauptwindrichtung Nord feststellbar. Die Windrichtungen stimmen gut mit der stadteinwärts weisenden Ventilationsrichtung der von EMONDS (1981) vermuteten Schneise überein, so dass das kartierte Gebiet hoher SF_6 -Konzentrationen

zugleich das Wirkgebiet der potentiellen Luftleitbahn unter den optimalen Bedingungen eines leichten übergeordneten Antriebs repräsentiert.

Die lufthygienische Qualität der während der Untersuchung an einem etwa 200 m südlich des Emissionspunktes gelegenen Standort vorgefundenen Luft wurde im Rahmen einer Kurzzeitstandmessung ermittelt. Auf diese wird in Kap. 4.7.2 eingegangen.

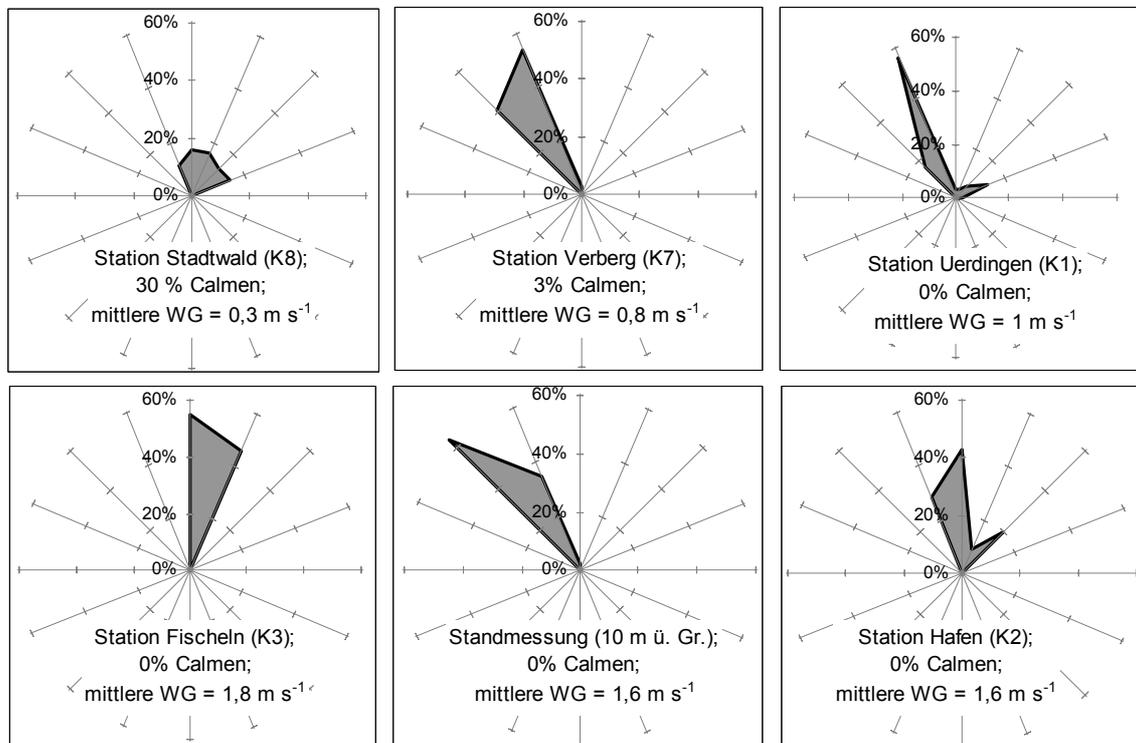
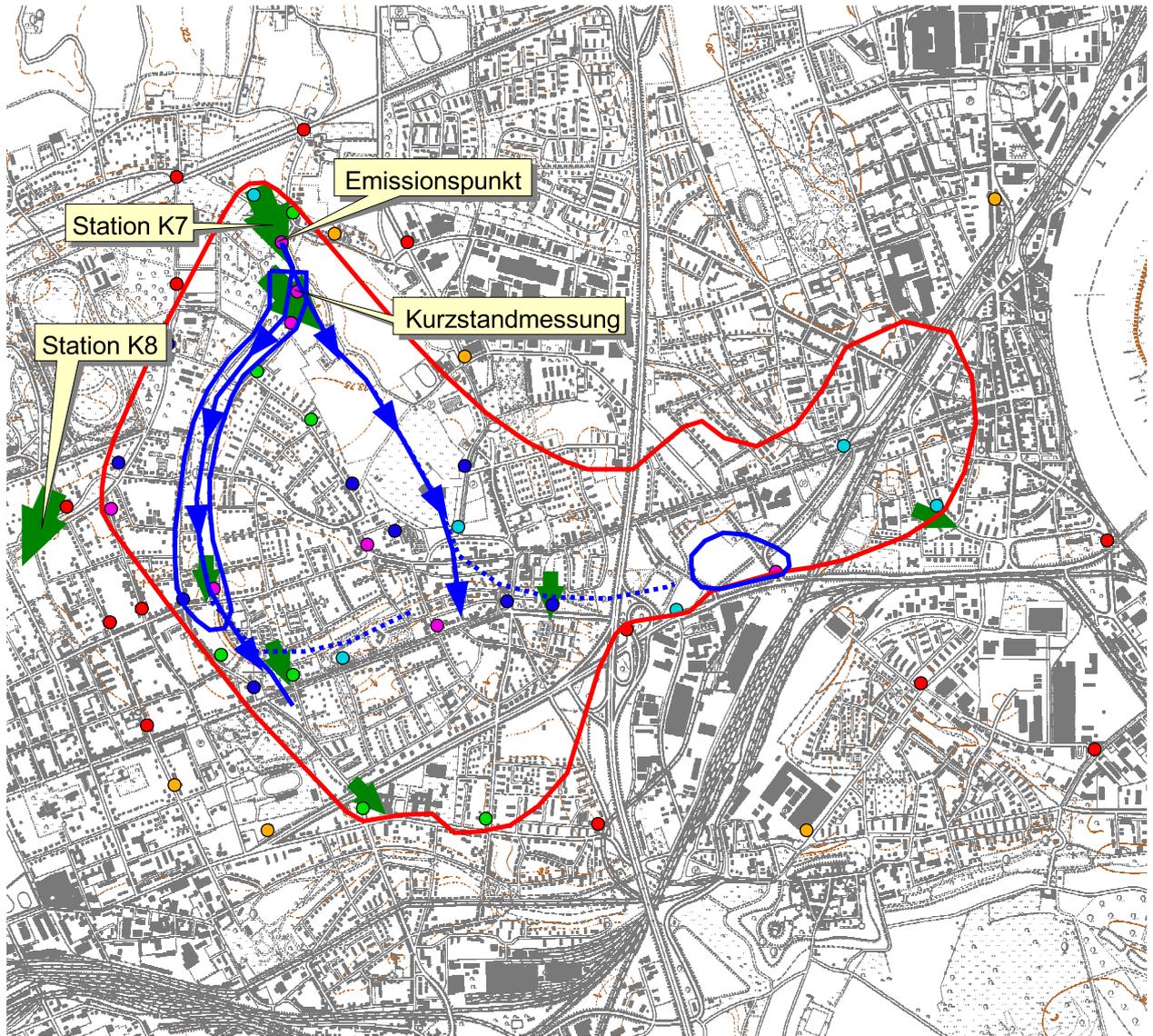


Abbildung 17: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) an verschiedenen Stationen während der Tracerausbreitungskampagne Krefeld Verberg am 12.4.2002 (1:40 bis 4:46 MEZ) im Rahmen der gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11.2002 bis 31.10.2002).

Die gemessenen SF_6 -Konzentrationen sind in Karte 3 dargestellt. Demnach finden sich hohe Konzentrationen erwartungsgemäß zunächst in Lee des Emissionspunktes. Eine leichte Geländekuppe süd-südöstlich des Emissionspunktes sorgt dafür, dass die Hauptströmung des schweren Tracergases - ebenso wie es für die Kaltluft zu erwarten ist - vorzugsweise Bereichen geringer Geländehöhe folgt und sich daher zweiteilt.

Ein besonders deutlicher Leiteffekt ist bei der als Grünzug ausgestalteten Talung zu erkennen, die den Bereich Schönhausenpark / Sollbrüggenpark mit dem Freiland verbindet. Weiter südlich zeigt eine rapide Abnahme der gemessenen Konzentrationen das Ende der bodennahen Verfrachtung mit der Hauptwindrichtung bzw. die zunehmende Verdünnung durch Luft aus anderen Quellen an.



Legende

-  Hauptwirkgebiet
-  Sammelgebiet in Muldenlage

Vermutete Strömung

-  mit Hauptwindrichtung
-  gravitativer Versatz

SF6-Konzentration / ppb

-  0 - 0.1
-  0.1 - 1
-  1 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  > 20

Windrichtung

-  Station K7 / K8 / Standmessung
-  Rauchtabletten

Karte 3: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 12.4.2002 (1:40-4:46 MEZ) im Plangebiet Verberg im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11.2001 bis 31.10.2002)



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



0 0.5 1 1.5 Kilometer



Es kommt jedoch zu einem dem allgemeinen Gefälle in Richtung Rheinufer folgenden gravitativen Versatz nach Osten, der die in diesem Bereich erhöht verlaufende BAB 57 zu unter- oder überqueren vermag und das Wirkgebiet auf Teile Uerdingens ausdehnt.

4.5.2 Plangebiet Fischeln Ost

In der Nacht vom 16. auf den 17.5.2002 wurde ab 1:20 bis zum Versuchsende um 4:00 MEZ das Tracergas SF₆ etwa im Zentrum des geplanten Wohngebietes östlich Fischeln mit einem mittleren Massenstrom von 0,26 g s⁻¹ emittiert. Eine Kurzstandmessung zur Überwachung der Kaltluftqualität wurde etwa 50 m östlich des Emissionspunktes durchgeführt (Karte 4). Die zuvor mehrfach gemessene Hintergrundkonzentration war mit 0,22 ppb hoch. Stationsmessdaten zu den Strömungsverhältnissen zeigt Abbildung 18.

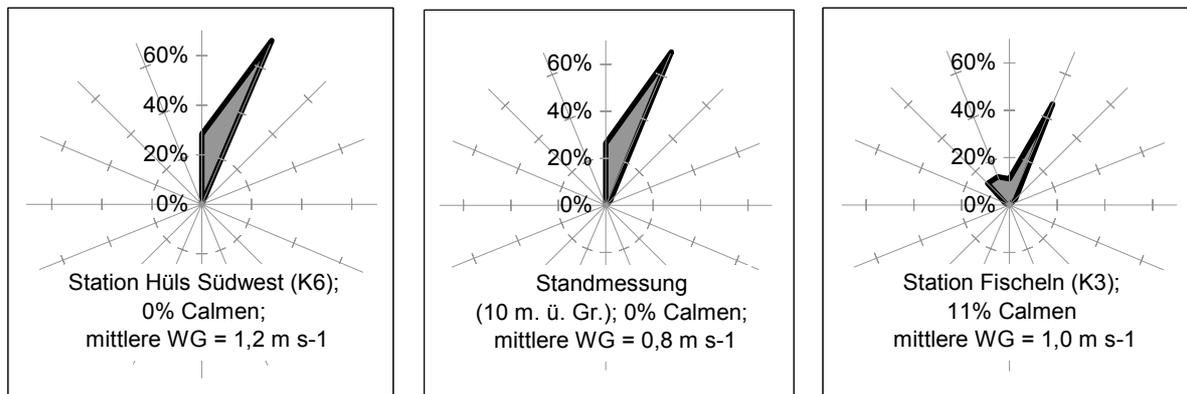
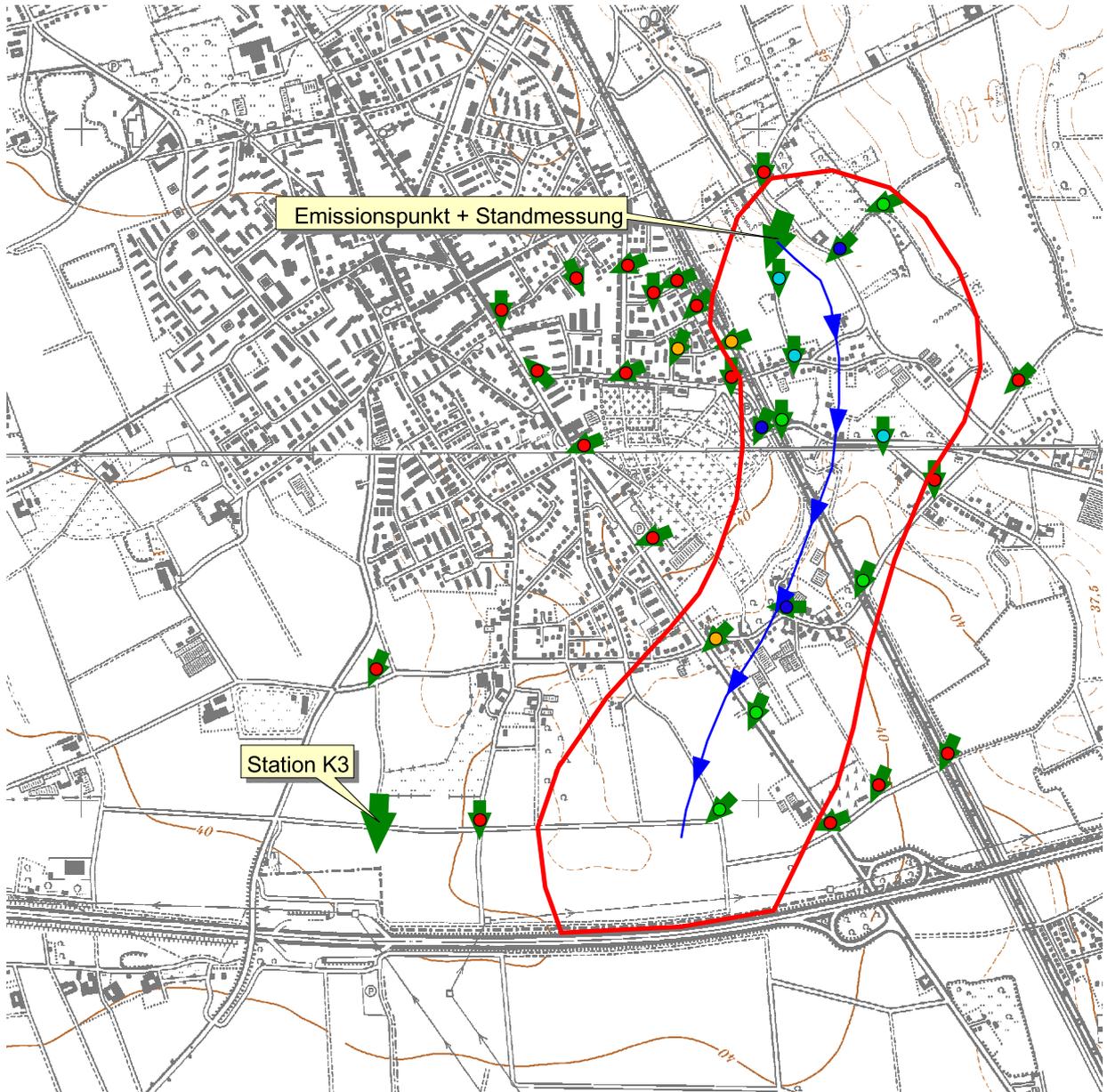


Abbildung 18: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) an verschiedenen Stationen während der Tracerausbreitungskampagne Fischeln Ost am 17.5. 2002 (1:20 – 4:00 MEZ) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Die übergeordnete Hauptwindrichtung an den beiden Freilandstationen sowie in 10 m Höhe über dem Emissionspunkt war Nord-Nordost und wies somit eine Komponente vom Emissionspunkt auf das west-südwestlich gelegene, bereits bebaute Gebiet Fischelns auf. Darüber hinaus waren mit Windgeschwindigkeiten, die auch im frei anströmbaren Bereich gering blieben, gute Voraussetzungen gegeben, um vom übergeordneten Windfeld abgekoppelte, thermisch oder gravitativ generierte Kaltluftströmungen gegebenenfalls nachzuweisen. Die Darstellung der gemessenen SF₆-Konzentrationen und der daraus abgeleiteten Form des Wirkgebietes in Karte 4 zeigt jedoch, dass die den Emissionspunkt überstreichende bodennahe Strömung das bebaute Gebiet unter zunächst deutlicher Westabweichung von der Hauptwindrichtung umfließt.



Legende

Wirkgebiet

SF6-Konzentration / ppb

- 0 - 0.22
- 0.22 - 1
- 1 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- > 20

Vermutete Strömung

Windrichtung

Rauchtabletten

Station K3 / Standmessung

Karte 4: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 17.5.2002 (1:20 - 4:00 MEZ) im Plangebiet Fischeln Ost im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11.2001 bis 31.10.2002)



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



0 0.5 1 Kilometer

Auf der Westseite des Wirkgebietes im Bereich des Bebauungsrandes stellt sich – anders als auf seiner Ostseite – ein steiler Konzentrationsgradient des Tracers ein, so dass ein Eindringen von SF₆ nur an zwei Punkten in geringem Ausmaß zu beobachten ist.

Auch am Auslass einer schneisenartigen kleinen Grünfläche in die Raderfeldstraße (nördlich Gropperstraße) konnte kein Tracereintrag nachgewiesen werden.

Eine entscheidende Rolle bei der Bildung dieses Strömungsfeldes spielt offensichtlich das Mikrorelief. Obwohl die Höhenunterschiede im Bereich Fischeln nur gering und kaum sichtbar sind, zeigen die in Karte 4 wiedergegebenen Höhenlinien, dass der bisherige südöstliche Ortsrand Fischelns in weiten Teilen der 40 m – Höhenlinie folgt. Im Osten und Süden liegt das Gelände etwas tiefer und bildet das Tal eines in der amtlichen Stadtkarte 1:20.000 (STADT KREFELD 1997) zu erkennenden Baches, der nach Norden abfließt. Die dichte Kaltluft sucht zunächst nahezu rechtwinklig zur Hauptwindrichtung Anschluss an die Tiefenlinie des Tales und wird dann von dieser bachaufwärts gedrückt.

Der Widerstand des sehr geradlinigen und verhältnismäßig dichten östlichen Bebauungsrandes von Fischeln trägt möglicherweise dazu bei, die übergeordnete Strömung bodennah abzulenken und den Austausch mit dem unbebauten Umland zu erschweren. Eine ausreichende Überwärmung des Ortskernes über sein Umland, um eine weitreichende thermische Ost-Nordostströmung zu generieren, liegt offensichtlich nicht vor.

Mit einem Kaltlufteintrag aus dem Bereich des geplanten Wohngebietes nach Fischeln ist somit nur zu rechnen, wenn eine ausreichend starke übergeordnete Strömung nahezu senkrecht zum östlichen Bebauungsrand, also etwa aus Ost-Nordost, vorliegt. Zugleich ist jedoch eine Belüftung nur erforderlich bzw. relevant, wenn Schwachwindsituationen vorherrschen. Durch diese dreifache Einschränkung bezüglich Windrichtung, Mindest- und Höchstgeschwindigkeit ergibt sich eine sehr geringe Anzahl an Situationen mit stadtklimatologisch relevanter Kaltluftzufuhr aus dem Plangebiet. So beträgt z.B. die relative Häufigkeit aller Wetterlagen des Gesamtmesszeitraumes, bei denen an Station Fischeln (K3) der Wind aus den Sektoren Nordost bis Südost kam sowie eine Geschwindigkeit von $1,5 \text{ m s}^{-1}$ nicht über- und von 1 m s^{-1} nicht unterschritt, nur 4,3 %.

4.5.3 Plangebiet Fischeln West

Die Tracerausbreitungskampagne zum Plangebiet Fischeln West wurde in der Nacht vom 13. auf den 14.9.2002 durchgeführt. Der mittlere Emissionsmassenstrom betrug $0,4 \text{ g s}^{-1}$, die Hintergrundkonzentration belief sich auf 0,04 ppb. Die Kampagne fiel zusammen mit einer 24 h-Standmessung 100 m westlich des Emissionspunktes (vgl. Kap. 4.7.1). In

Abbildung 19 sind Winddaten der Standmessung und weiterer Feststationen während des Kampagnenzeitraumes von 0:00 bis 2:55 zusammengefasst.

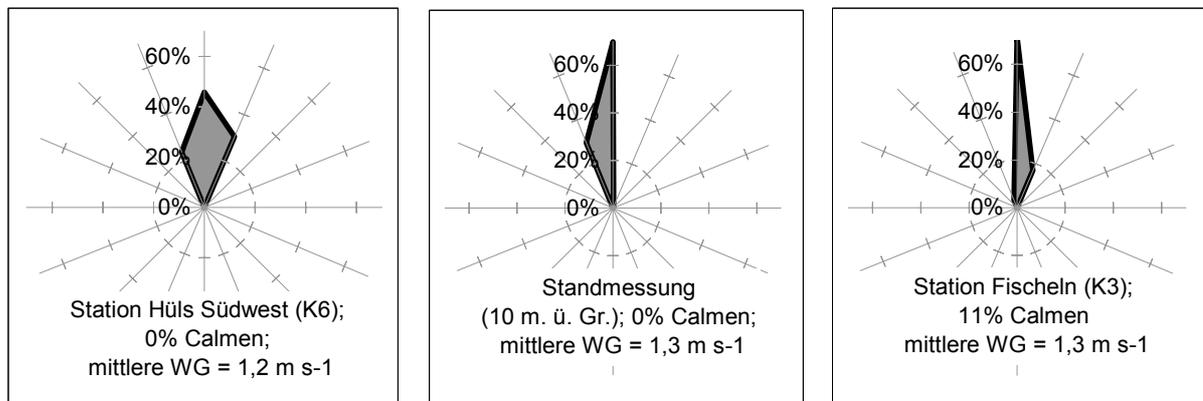


Abbildung 19: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) an verschiedenen Stationen während der Tracerausbreitungskampagne Fischeln West am 14.9. 2002 (0:00 bis 2:55 MEZ) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

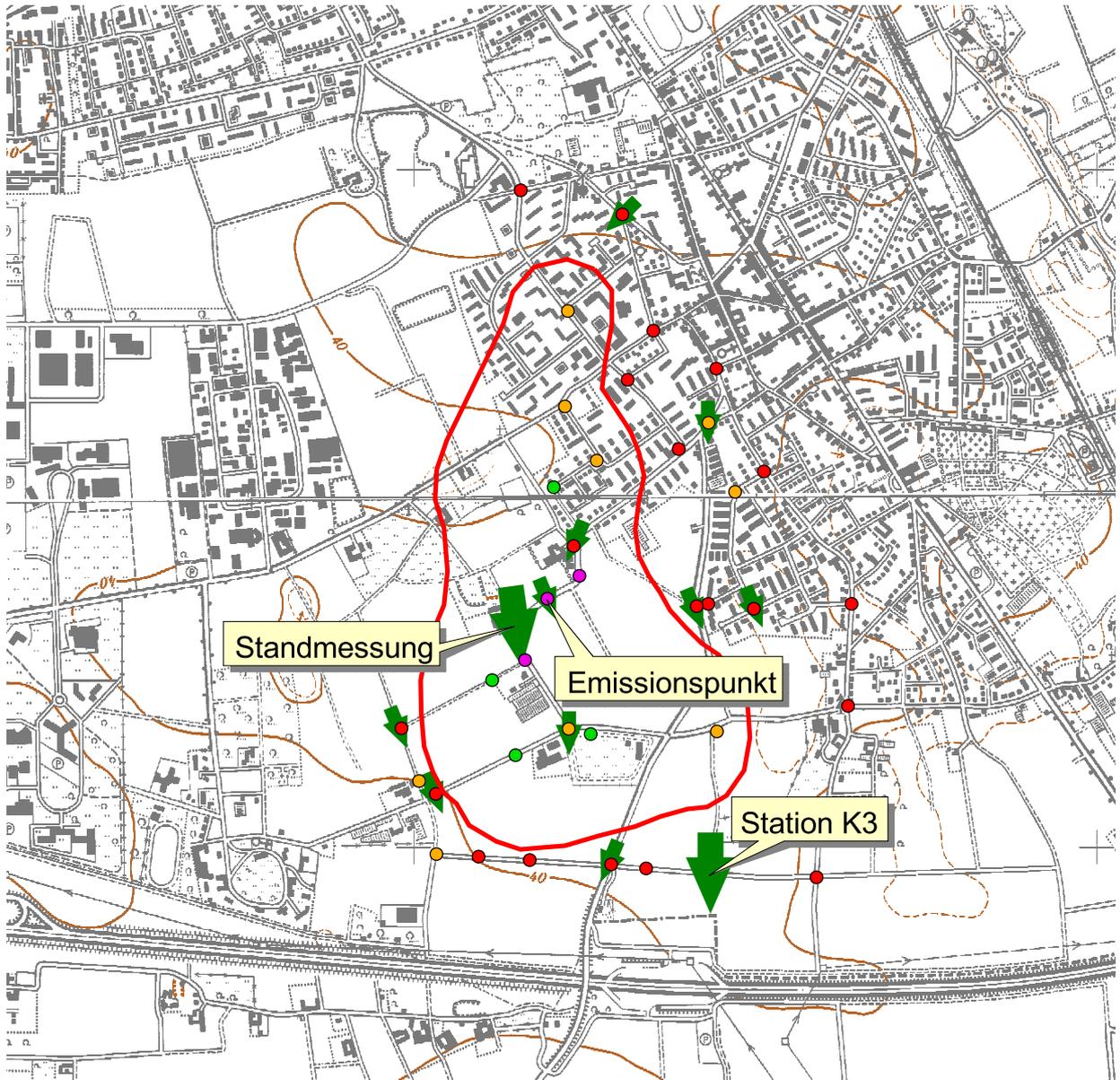
Optimale Rahmenbedingungen für ein Vordringen des Tracers in das bebaute Gebiet Fischelns würde ein leichter übergeordneter Westwind bieten. Da Wetterlagen mit Westwind jedoch im Allgemeinen nur selten mit Austauscharmut bzw. Wolkenlosigkeit einhergehen und eine geeignete windschwache Westlage zur Durchführung der Kampagne nicht vorgefunden werden konnte, wurde eine möglichst windschwache Lage ohne Ostkomponente ausgewählt, um gegebenenfalls die Einstellung eines autochthonen Strömungssystems nachweisen zu können. Wie die Abbildung zeigt, liegt übergeordnet eine schwache Nordströmung vor.

Wie die Übersicht der gemessenen SF₆-Konzentrationen in Karte 5 zeigt, wurden Höchstwerte nur in unmittelbarer Umgebung des Emissionspunktes festgestellt. Weniger hohe, aber deutlich über der Hintergrundkonzentration liegende Werte wurden jedoch nicht nur in Lee des Emissionspunktes, sondern auch im Randbereich Fischelns vorgefunden, teilweise fast entgegen der übergeordneten Windrichtung.

Mögliche Ursachen sind thermisch oder gravitativ angetriebene Kaltluftbewegungen. Einerseits ermöglicht das Relief mit einer leichten Kuppenlage des Emissionspunktes bei kurzzeitiger Abschwächung des bodennahen Windes einen Abfluss in fast alle Richtungen und ein Verbleiben des so eingetragenen SF₆ in geschützten Mulden oder Baukörperstrukturen. Daneben kommt auch ein durch die städtische Wärmeinsel Krefelds induzierter Flurwind in Frage, der intermittierend, insbesondere während geringer übergeordneter Windgeschwindigkeit, Kaltluft auf das Zentrum Krefelds oder Fischelns

zuführt. Die enge Scharung der Isanomalien im Bereich des Plangebiets laut Karte 2 weist darauf hin, dass hier mit einem steilen Temperaturgradienten günstige Bedingungen für dieses im Rahmen der übrigen Kampagnen nicht vorgefundene Phänomen vorliegen. Stichprobenartige Lufttemperaturmessungen an einigen der SF₆-Messpunkte zeigten ebenfalls einen Temperaturanstieg Richtung Norden.

Der unbebaute Bereich der durch die 40 m-Höhenlinie umgrenzten Kuppe ist somit als potenzielles Kaltluftbildungs- bzw. Frischlufttherkunftsgebiet anzusehen, das – allerdings in begrenztem Ausmaß - zur Ventilation seiner tiefergelegenen Nachbargebiete beitragen kann.



Legende

Wirkgebiet

SF6-Konzentration / ppb

- 0 - 0.05
- 0.05 - 1
- 1 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- > 20

Windrichtung

- ↑ Rauchtabletten
- ↑ Station K3 / Standmessung

Karte 5: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 14.09.2002 (0:00 - 2:55 MEZ) im Plangebiet Fischeln West im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Meszeitraum: 1.11.2001 bis 31.10.2002)



Universität
Essen



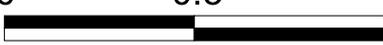
UFT
KLIMA

Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie

N



0 0.5 1 Kilometer



4.5.4 Plangebiet Hüls Südwest

In der Nacht vom 30.9. auf den 1.10.2002 fand im Sonderuntersuchungsgebiet Hüls Südwest die letzte der insgesamt vier SF₆-Kampagnen statt. Der Emissionspunkt im Bereich der geplanten Neuerrichtung eines landwirtschaftlichen Betriebes war zuvor während des Untersuchungszeitraumes mehrfach angefahren und stets wegen zu hoher Windgeschwindigkeiten oder für die Fragestellung irrelevanter Windrichtungen verworfen worden. Dies ist - zusammen mit der Existenz mehrerer Windkraftanlagen in der Umgebung - als weiterer Hinweis auf die hohe Windanfälligkeit des Gebietes und die geringe Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens von Austauscharmut zu werten. Auch in der Untersuchungsnacht wurden trotz überregionalen Vorherrschens eines durch schwache Südwinde geprägten Hochs über Mitteleuropa (BERLINER WETTERKARTE 2002) bodennahe Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 3 m s⁻¹ (stichprobenartige Handmessungen) und eine deutliche Ostkomponente der Windrichtung vorgefunden. Die zugehörigen Stationsdaten zeigt Abbildung 20 (untere Hälfte), ebenso die Richtungsverteilung von Schwachwinden während des gesamten Untersuchungszeitraumes (obere Hälfte).

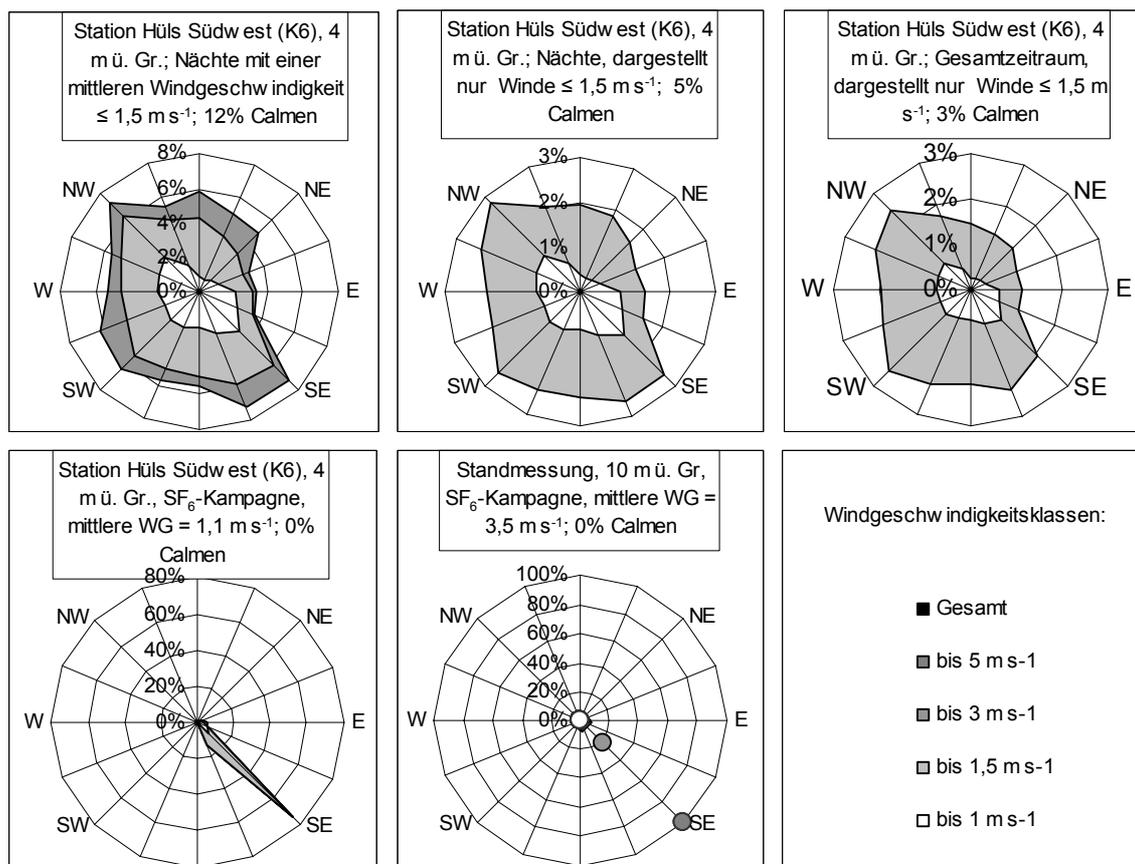


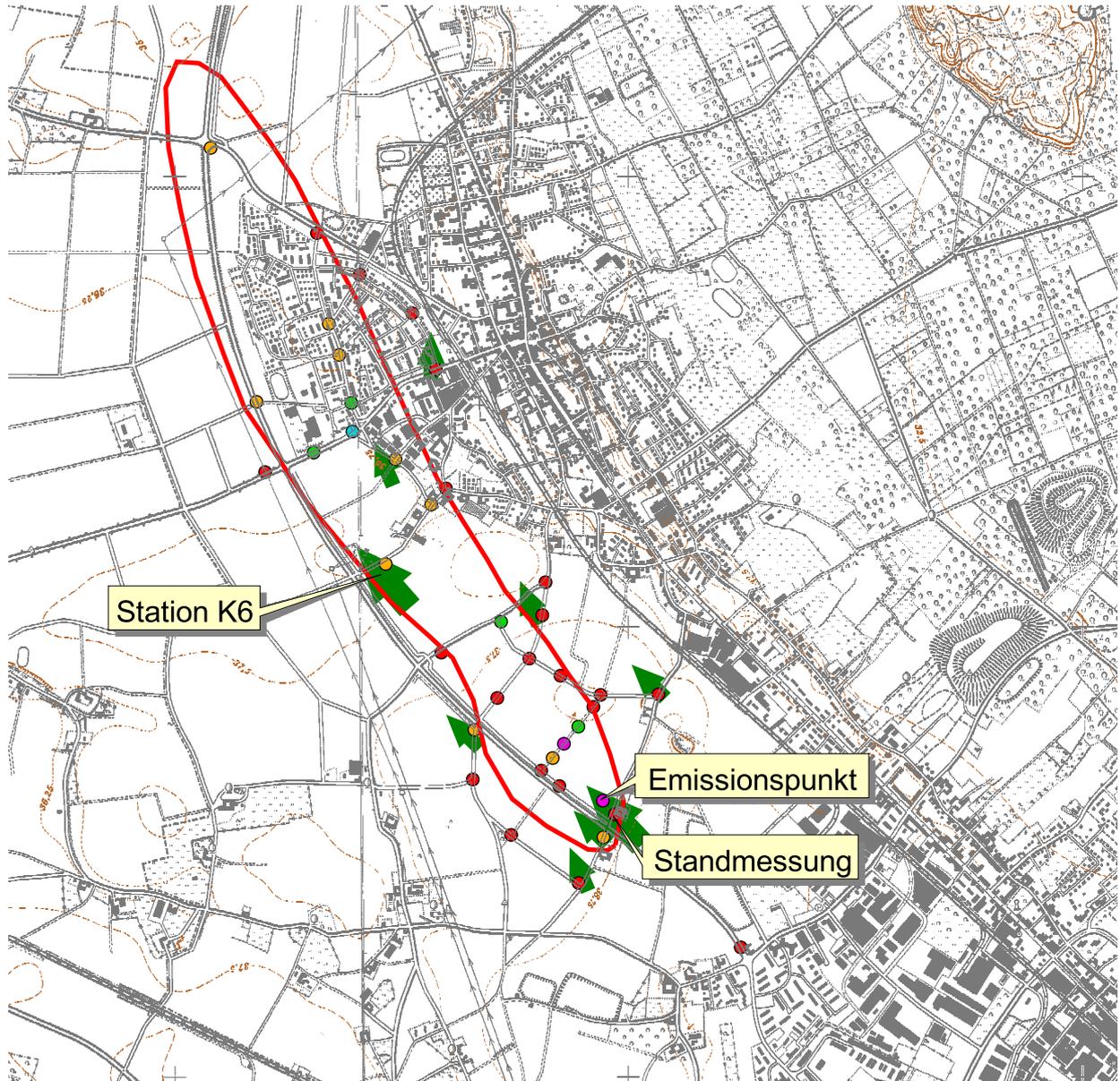
Abbildung 20: Schwachwind-Richtungsverteilung ($\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) an Station Hüls Südwest (K6) sowie Windrichtungsverteilung am 30.9. 2002 (20:45-23:45 MEZ) auf der Basis von Dreiminutenmittelwerten (Standmessung: Minutenmittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Während windschwacher Nächte (Windgeschwindigkeit $\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$) treten demnach im Untersuchungsgebiet am häufigsten die Windrichtungen Südost, Süd-Südost und Nordwest auf. Innerhalb dieser Vorzugsrichtung liegt auch die mit hoher Konstanz eingehaltene Windrichtung während der Untersuchungsnacht. Die Windgeschwindigkeit am Standort des Messwagens in 10 m ü. Gr. liegt deutlich über derjenigen in 4 m ü. Gr. der nächstgelegenen Feststation (K6), als dies während der Kampagne „Verberg“ (vgl. Kap. 4.5.1) der Fall war. Dies kann auf die erhöhte Oberflächenrauigkeit in unmittelbarer Umgebung der Station (K6) aufgrund des im September bereits hoch gewachsenen Mais (1,8 m ü. Gr.) zurückzuführen sein.

Das Tracergas wurde am 30.9.2002 von 20:50 Uhr bis 23:35 Uhr MEZ mit einem mittleren Massenstrom von $0,5 \text{ g s}^{-1}$ emittiert, die vorher gemessene Hintergrundkonzentration betrug 0,04 ppb. Die Qualität der Luft am Ort der Standmessung wird in Kap. 4.7.1 besprochen.

Die vorgefundene Strömungssituation anhand der gemessenen SF_6 -Konzentrationen und der Rauchtablettenuntersuchungen sind in Karte 6 dargestellt. Anders als im Falle der Untersuchung „Verberg“ (vgl. Kap. 4.5.1) ist die Ausbreitungsrichtung des Tracers streng an die vorherrschende Windrichtung gebunden, ein Kaltluftabfluss über die im Osten parallel zur Ausbreitungsrichtung verlaufende Terrassenstufe konnte nicht nachgewiesen werden. Als Hauptursache hierfür ist die bereits erwähnte Anfälligkeit des in sich ebenen, etwa 6 m über dem benachbarten Hülser Bruch gelegenen Bereiches für hohe Windgeschwindigkeiten bei gleichzeitig großer Richtungskonstanz zu sehen.

Von einer Luftzufuhr aus dem Sonderuntersuchungsgebiet ist daher nur das ebenfalls hochgelegene Siedlungsgebiet westlich des Ortskernes von Hüls betroffen. In Nächten mit geringerer Ostkomponente des vorherrschenden Windes ist jedoch ein Eindringen auch in die übrigen Teile von Hüls zu erwarten. Bei weiterer Rechtsdrehung des Windes auf SW ist mit einem Abtransport in Richtung Hülser Bruch über die zwischen Hüls und Inrath gelegene Bebauungseingestelle zu rechnen. Diese Strömungsrichtung wurde von EMONDS (1981) als Ventilationsbahn ausgewiesen, die größte Ausdehnung der im Landschaftsplan (12. Änderung, STADT KREFELD 2002) ausgewiesenen Fläche zur „Ausstattung der Landschaft zur Verbesserung des Klimas“ orientiert sich ebenfalls in dieser Richtung. Bei Wind aus den Sektoren SW bis NW liegen Teile Inraths bzw. des Krefelder Stadtzentrums in Lee, für den gesamten Bereich NNW bis SE der Freilandbereich westlich der Venloer Straße.



Legende

 Wirkgebiet

SF6-Konzentration / ppb

-  0 - 0.05
-  0.05 - 1
-  1 - 5
-  5 - 10
-  10 - 20
-  > 20

Windrichtung



Station K6 / Standmessung



Rauchtabletten

Karte 6: Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne am 30.9.2002 (20:50-23:35 MEZ) im Plangebiet Hülse Südwest im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11.2001 bis 31.10.2002).



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



0 0.5 1 1.5 Kilometer



Überträgt man die Windrichtungsverteilung des gesamten Untersuchungszeitraumes von der nahegelegenen Station Hüls Südwest (K6) an den Emissionspunkt, so sind für die oben genannten Strömungssituationen die in Tabelle 12 genannten Häufigkeiten zu erwarten.

Tabelle 12: Abgrenzung von windrichtungssektorenabhängigen Wirkgebieten für den SF₆-Emissionspunkt „Hüls Südwest“ in Abhängigkeit der Flächennutzung in Lee des Emissionspunktes und Häufigkeit dieser Sektoren an Feststation Hüls Südwest (K6), Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Windrichtungssektoren	Dichtbesiedelte Bereiche in Lee des Emissionspunktes	Häufigkeit	Häufigkeit $\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$
Ost (NNW bis SE)	keine	34%	10%
Süd (SSE bis S)	Hüls	14%	5%
Süd-Südwest (SSW)	keine / Südrand Hüls	8%	2% ^{*1}
West (SW bis NW)	Inrath / Krefeld	44%	12% ^{*2}
Summe		100%	29%
^{*1, *2} aufgrund des überwiegend maritimen Witterungstyps dieser Wetterlage geringe Kaltluftbildung			

Dabei wurden Calmen ausgeschlossen, so dass sich für alle Lagen gemeinsam die Häufigkeit 100% ergibt. Das Problem der Ventilation dichtbesiedelter Bereiche zur Verringerung einer Überwärmung oder lufthygienischen Problemsituation stellt sich jedoch in erster Linie bei austauscharmen Wetterlagen, so dass die Richtungsverteilung aller Schwachwinde gesondert aufgeführt wurde. Die relative Summenhäufigkeit aller potentiell kritischen Situationen, in denen die Strömung auf Teile von Hüls, Inrath oder Krefeld gerichtet ist, beträgt demnach 19%.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in allen vier Tracerausbreitungskampagnen Wirkgebiete abgegrenzt werden konnten, die sich jedoch hinsichtlich ihrer Form (einfache Verfrachtung mit der übergeordneten Strömung in Hüls Südwest, teilweise Abkoppelung in Verberg und Fischeln) und Relevanz (Nutzung und vorhandene Überwärmung des Wirkgebiets) unterscheiden. Dieser Aspekt wird als Grundlage für Planungshinweise in Kap. 6.1 wieder aufgegriffen.

4.6 Human-biometeorologische Verhältnisse

Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Wind, sowie kurz- und langwellige Strahlungsströme wirken gemeinsam auf den Menschen ein und bestimmen thermische Behaglichkeit bzw. thermischen Diskomfort. Dabei steht die gesundheitliche Bedeutung eng mit der Wärme- und Kreislaufregulation des Menschen in Zusammenhang. Aus wissenschaftlichem Interesse erfolgte unter zu Hilfenahme der ab Mai 2002 an Feststation Fischeln (K3) gemessenen Globalstrahlung über das Auftragsvolumen der Gesamtstädtischen Klimanalyse Krefeld hinaus eine Einschätzung der räumlich differenzierten human-biometeorologischen Verhältnisse während der Sommermonate im Krefelder Stadtgebiet.

Die Beschreibung und Bewertung der human-biometeorologischen Verhältnisse erfolgte gemäß den Empfehlungen der VDI-Richtlinie 3787, Bl.2 anhand von PMV-Werten, die exemplarisch für die Feststationsstandorte des temporären Messnetzes bestimmt wurden. Als gruppenbezogenes psycho-physisches Beurteilungskriterium für ein großes Personenkollektiv beschreibt der PMV (Predicted Mean Vote) die thermische Behaglichkeit anhand einer Skala von -3,5 (kalt) bis + 3,5 (heiß), wobei der Wert 0 thermische Behaglichkeit bedeutet.

Der PMV gibt den Grad des thermischen Empfindens bzw. der thermischen Belastung einer Person an, die sich am Standort der betrachteten Feststation außerhalb von Gebäude- oder Vegetationsschatten befindet. Der PMV-Wert wurde hier mit dem numerischen Modell RayMan Vers. 1.2 (MATZARAKIS et al. 2000) berechnet, in das als Eingangsgrößen, basierend auf der Wärmebilanzgleichung nach FANGER (1972), die aktuellen Werte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit sowie der Globalstrahlung einfließen. Alle Aussagen zum PMV-Wert gelten für eine männliche, 1,75 m große und 75 kg schwere, mit einem leichten Anzug bekleidete Normperson.

Tabelle 13 gibt eine Übersicht über ausgewählte statistische Kennwerte der PMV-Werte an den acht Feststationen, bezogen auf die Tagesstunden (Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang) der Monate Juni, Juli und August 2002. An den Umlandstationen Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) lagen die PMV-Werte an 3,6 % bis 4,6 % der Tagesstunden (= 42 bis 53 Stunden) über 2,5. Mit 5,2 % bis 5,9 % (= 62 bis 69 Stunden) traten solche Wärmebelastungen an den übrigen Stationen auf. Mit einer relativen Häufigkeit von 0,3 % bis 1,2 % (= 1 Stunde bis 6 Stunden) waren Wärmebelastungen während der Nachtstunden an allen Feststationsstandorten vernachlässigbar gering. Die interstationären Unterschiede werden auffälliger, wenn die Anzahlen der mindestens sechsständigen Episoden mit PMV-Werten über 0,5 betrachtet werden. So traten an der Feststation Fischeln (K3) nur 24 Episoden, in der Innenstadt (K5) jedoch 37 Episoden auf.

Tabelle 13: Übersicht über statistische Kennwerte der sommerlichen Wärmebelastung (PMV) im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum: 1.6. 2002 bis 31.8. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

Zeitraum	Stationsname								Gebietsmittel
	Uerdingen (K1)	Hafen (K2)	Fischeln (K3)	Lindental (K4)	Innenstadt (K5)	Hüls Südwest (K6)	Verberg (K7)	Stadt-wald (K8)	
Absolutes PMV-Maximum	4,4	4,4	4,0	4,3	4,4	4,0	4,1	4,3	4,2
Absolutes PMV-Minimum	-3,3	-3,2	-3,8	-3,3	-2,8	-3,7	-3,5	-3,0	-3,3
Rel. Häufigkeit der Tagesstunden mit PMV 0,5 -1,5 [%]	11,4	11,1	10,8	11,1	10,9	11,2	10,5	12,0	11,1
Rel. Häufigkeit der Tagesstunden mit PMV 1,5-2,5 [%]	6,3	5,1	5,2	6,0	7,1	5,5	5,2	7,1	5,9
Rel. Häufigkeit der Tagesstunden mit PMV > 2,5 [%]	5,3	5,3	3,6	5,2	5,9	4,6	5,3	5,2	5,1
Rel. Häufigkeit der Nachtstunden mit PMV > 0,5 [%]	1,1	0,8	0,3	0,8	1,2	0,5	0,3	0,3	0,7
Anzahl Episoden mit PMV >0,5 von mind. 6 h Dauer	31	28	24	30	37	27	31	35	30,4

Abbildung 21 zeigt den mittleren Tagesgang der PMV-Werte an sommerlichen Strahlungstagen. Besonders gegen Tagesmitte treten die Unterschiede der thermischen Belastung deutlich hervor und betragen bis zu PMV 0,5. Die durchschnittlichen Maxima liegen bei PMV 1,6 bis PMV 2,1. Diese können bezogen auf Einzeltage jedoch auf über PMV 4 ansteigen. In der Nacht bestehen ähnliche interstationäre Differenzen, die absoluten Werte liegen jedoch außerhalb der Wärmebelastung. Übereinstimmend mit den Ergebnissen aus Tabelle 13 weisen Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5) die höchste thermischen Belastungen, die Feststationen Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6) die geringsten auf. Die relativ geringen Unterschiede der sommerlichen human-biometeorologischen Wärmebelastung zwischen den Umlandstationen und den übrigen Feststationen weisen auf einen „Gartenstadtcharakter“ des Human-Bioklimas der Stadt Krefeld hin, bei dem die urbanen Einflüsse eher gering ausfallen.

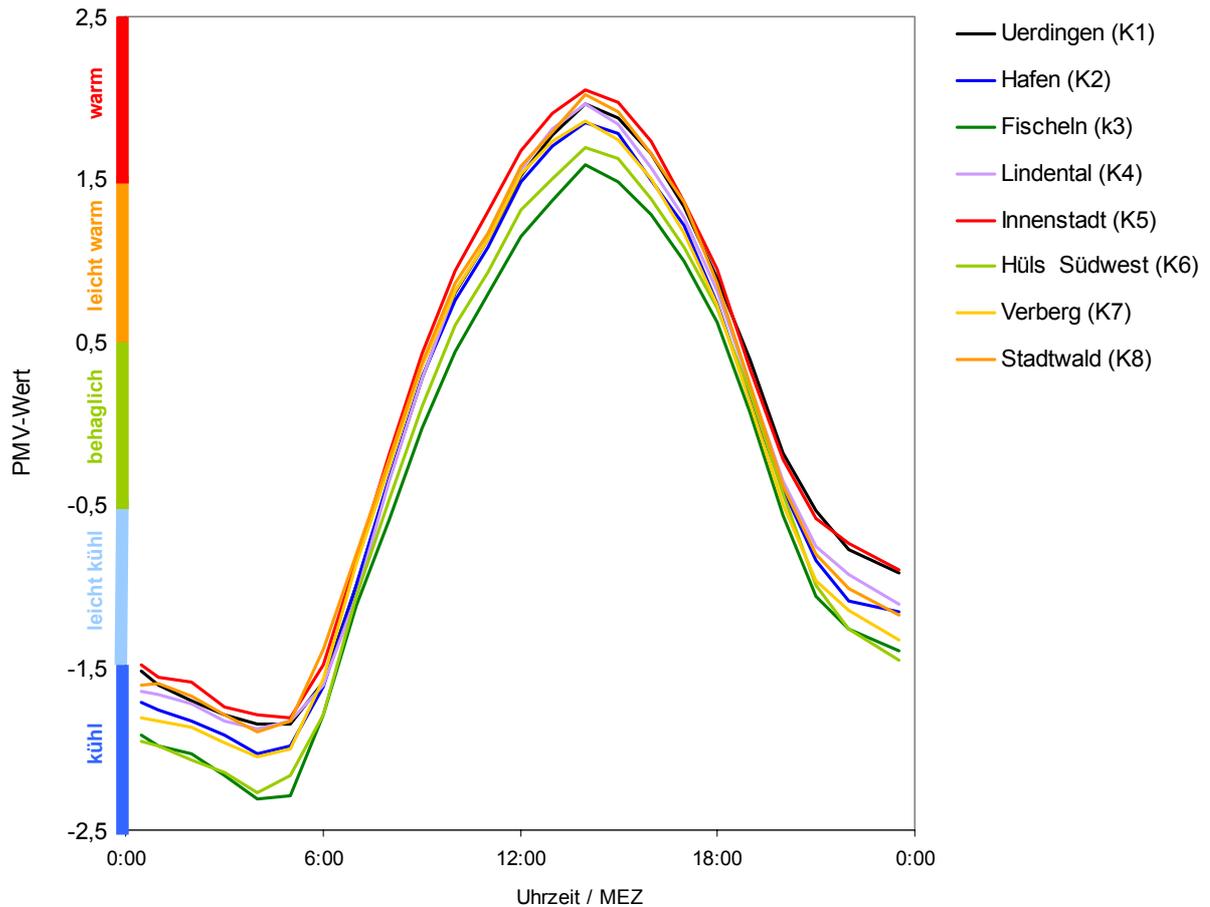


Abbildung 21: Mittlerer Tagesgang der PMV-Werte an sommerlichen Strahlungstagen im Krefelder Untersuchungsgebiet (Messzeitraum 1.6. 2002 bis 31.8. 2002, Datengrundlage: Stundenmittelwerte).

4.7 Lufthygienische Verhältnisse

4.7.1 NO₂-Messnetz

Durch die stationäre, grobauflösende Messung der Leitsubstanz NO₂, die sich als überwiegend sekundärer Spurenstoff in der Atmosphäre aus primär Kfz-bürtigem NO bildet, mittels Passivsammler an verschiedenen Standorten können mögliche saisonale, großwetterlagenbedingte sowie standorttypische Konzentrationsunterschiede erkannt werden.

Den Jahresgang der nach Kap. 3.1.2 errechneten Wochenmittelwerte der NO₂-Konzentrationen aller Stationen zeigt Abbildung 22.

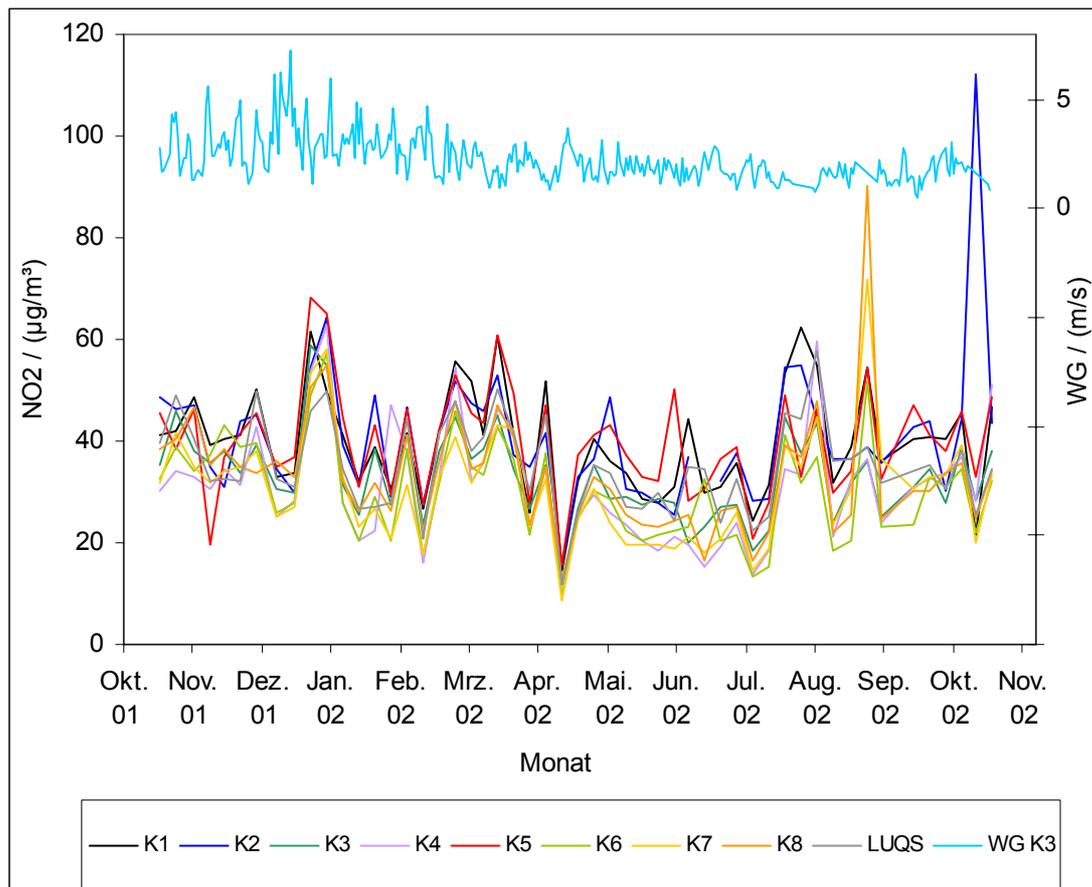


Abbildung 22: Jahresgang der NO₂-Wochenmittelkonzentrationen an den Passivsammlern im Untersuchungsgebiet Krefeld sowie der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit (WG) an einer Vergleichsstation (K3-Fischeln) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Ein ausgeprägter Jahresgang der NO₂-Konzentrationen mit besonders hohen Werten in einer bestimmten Jahreszeit besteht nicht. Stattdessen machen sich Zeiträume mit für die Jahreszeit über- bzw. unterdurchschnittlichen Windgeschwindigkeiten bei austauschbedingt geringer bzw. hoher Konzentration bemerkbar. Die einzelnen Standorte verhalten sich dabei überwiegend gleichsinnig, eine deutliche Ausnahme stellt der in der Woche vom 22. bis 29.10.2003 an Station Hafen (K2) gemessene Wert, zugleich das absolute Maximum des Messzeitraums, dar. In diesen Zeitraum fällt ein Brand in unmittelbarer Nähe zur Station, bei dem N-Verbindungen freigesetzt wurden, so dass dieser Wert bei Rückschlüssen auf flächentypische Konzentrationen außer Acht gelassen wird.

Näheren Einblick in die Abhängigkeit der Konzentrationen vom Auftreten austauscharmer Wetterlagen vermittelt Tabelle 14. Hierzu wurde jeder Expositionswoche die während dieses Zeitraums nach DEUTSCHER WETTERDIENST (2001, 2002) überwiegend vorherrschende Großwetterlage zugeordnet; die Wetterlagen wurden anschließend nach

GERSTENGARBE & WERNER (1999) zu Großwettertypen zusammengefasst. Die hier exemplarisch für die Innenstadtstation (K5) dargestellten Mittelwerte und Streuungen der NO₂-Konzentrationen zeigen, dass vergleichsweise geringe Werte mit den häufig auftretenden und selten mit Austauscharmut verbundenen westlichen Lagen sowie mit Nordlagen verbunden ist.

Tabelle 14: Abhängigkeit der mittleren NO₂-Konzentrationen an Station Innenstadt (K5) vom Großwettertyp im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Großwettertyp	NO ₂ / µg m ⁻³	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Anzahl
Nordwest	36,3	9,0	19,7	46,5	8
Nord	36,8	11,3	20,8	47,1	6
West	37,4	10,8	15,8	52,9	12
Südwest	38,9	7,7	28,2	45,8	4
Ost	39,2	8,5	30,0	49,6	5
Südost	39,6	6,7	32,3	45,3	3
Süd	42,9	9,9	37,2	54,4	3
Hoch Mitteleuropa	46,7	13,6	30,7	68,3	10
Tief Mitteleuropa ¹⁾	49,1	-	-	-	1)

¹⁾ Wegen des einmaligen Auftretens nicht näher auswertbar

Höhere Werte weisen erwartungsgemäß Ost- und Südlagen sowie Hochdruckwetterlagen auf. Bezüglich der nur einmal aufgetretenen Situation mit dem Zentrum eines Tiefdruckgebietes über Mitteleuropa sind keine verallgemeinernden Aussagen möglich. Im vorliegenden Falle ging der Tiefdrucklage im selben Expositionszeitraum eine Ostlage voraus. Da Großwettertypen nicht zwingend mit der Bodenwindrichtung korrelieren und NO₂ als überwiegend sekundärer Spurenstoff kaum direkt emittiert wird, sollte Tabelle 14 nicht zu einer kleinräumigen Quellrichtungszuordnung, sondern eher zur Identifikation von Großwetterlagen nach DEUTSCHER WETTERDIENST (2001, 2002, ff.) herangezogen werden, die für die Krefelder Innenstadt problematisch sein könnten.

Einen Vergleich der lufthygienischen Situation der durch die Passivsammlerstandorte repräsentierten Klimatope unter Verwendung von NO₂ als Indikator erlaubt Abbildung 23, die für jede Station das höchste und niedrigste Wochenmittel sowie den Mittelwert zu- und abzüglich der Standardabweichung zeigt. Wie schon aus Abbildung 22 zu ersehen, treten die Unterschiede zwischen den Standorten im Vergleich zu den zeitlichen Schwankungen

der Konzentration eher zurück. Dennoch lassen sich anhand der Mittelwerte die drei städtisch bzw. industriell geprägten Standorte Uerdingen (K1), Hafen (K2) und Innenstadt (K5) mit um $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ von den Umland- und Wohngebietsstationen Fischeln (K3), Lindental (K4), Hüls Südwest (K6), Verberg (K7) und Stadtwald (K8) mit um $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ unterscheiden.

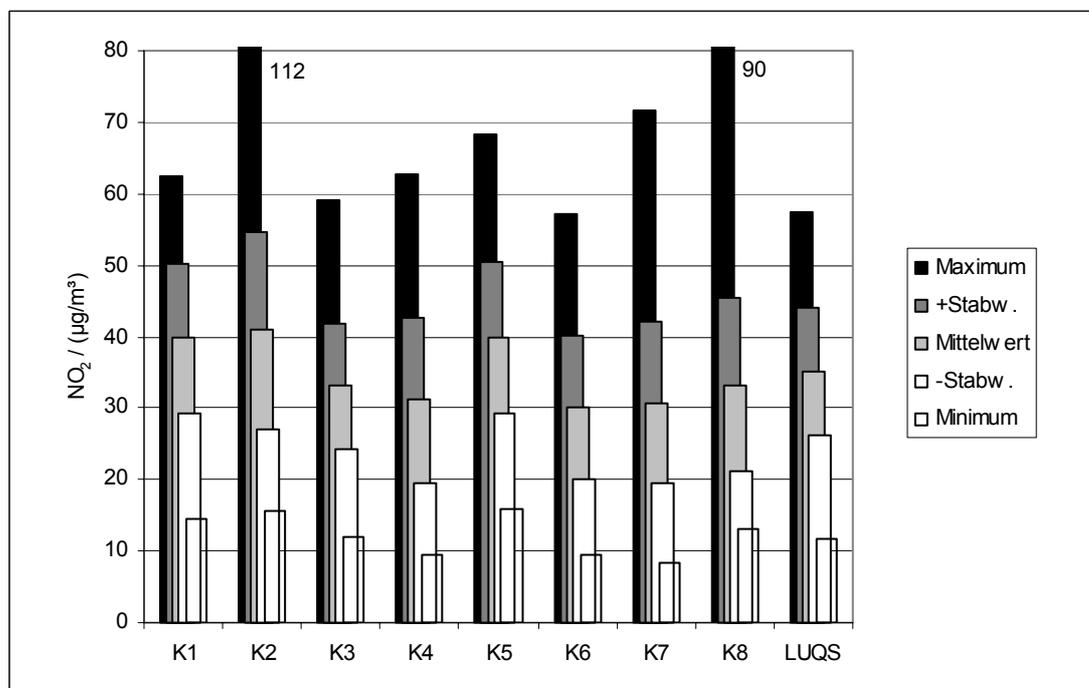


Abbildung 23: Berechnete NO_2 -Durchschnittskonzentrationen an den Standorten der neun Passivsammler im Untersuchungsgebiet der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld während des Zeitraumes vom 29.10. 2001 bis 5.11. 2002.

Der neben dem LUQS-Container des Landesumweltamtes NRW, Essen, in Linn aufgestellte Sammler nimmt eine Mittelstellung ein, die sowohl seine Lage in einem Wohngebiet als auch die Nähe zu Gewerbe- und Industrieflächen bzw. den zugehörigen stark genutzten Verkehrswegen dokumentiert. Ein Vergleich mit den am LUQS-Container aktiv gemessenen NO_2 -Konzentrationen (Mitteilung des Landesumweltamtes NRW, Essen, 2002) spricht für eine Überschätzung durch das Passivsammlerverfahren von etwa $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die absolute Höhe der Mittelwerte ist daher nur bedingt zu interpretieren. Dennoch soll nicht unerwähnt bleiben, dass der ab 2010 gültige Grenzwert der NO_2 -Jahresmittelkonzentration (vgl. Tabelle 15) von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am Standort der Station Hafen (K2) leicht überschritten wird; auch nach Herausnahme des oben erwähnten Brandereignisses bleibt dieser Standort – mit nun $39,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - ebenso wie die Standorte Uerdingen und Innenstadt - in der Nähe dieses Wertes. Vor dem Hintergrund weiter zunehmenden Kfz-Verkehrs und der interannuellen Schwankung der Häufigkeit

austauscharmer Wetterlagen können zukünftige Grenzwertüberschreitungen an diesen Standorten nicht ausgeschlossen werden.

4.7.2 Lufthygienische Standmessungen

Die punktuelle Überprüfung der Spurenstoffkonzentrationen an einem festen Punkt über 24 Stunden liefert Tagesgänge während Worst-Case-Situationen und ermöglicht so entweder eine Einordnung von Standorten, an denen hohe Konzentrationen erwartet werden (Beispiel Innenstadt), oder die Überwachung der lufthygienischen Qualität von ventilationsrelevanter (Kalt-)luft am Ursprungsort bzw. im Durchzugsbereich. Die Untersuchungsorte sind Karte 1 zu entnehmen. Die Strömungsverhältnisse während der vier lufthygienischen Standmessungen an repräsentativen Standorten ist in Abbildung 24 dargestellt.

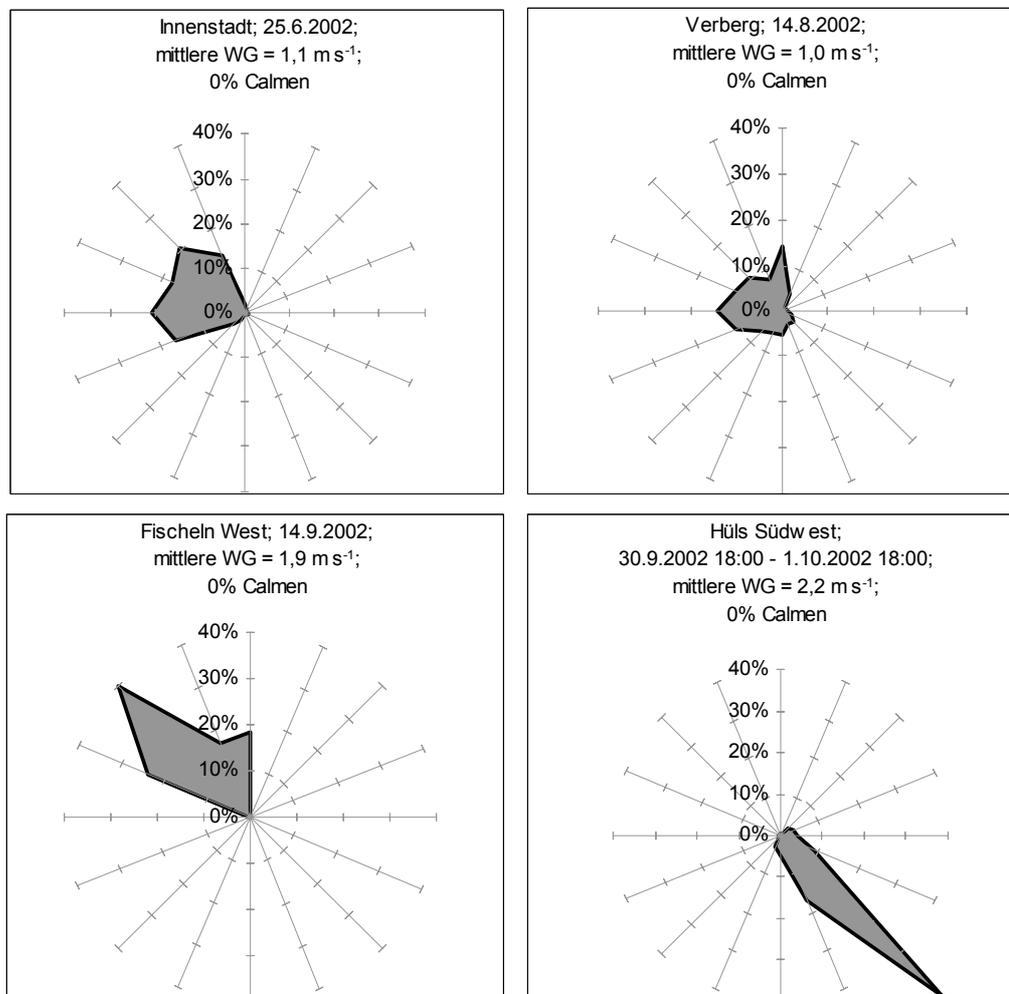


Abbildung 24: Windrichtungsverteilung auf der Basis von Minutenmittelwerten in 10 m ü. Gr. während der vier lufthygienischen 24 h-Standmessungen im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Während die neben Station Innenstadt (K5) und die in Verberg durchgeführte Standmessung durch sehr geringe mittlere Windgeschwindigkeiten und eine hohe Variabilität der aufgetretenen Windrichtungen geprägt sind, zeigen die Termine in Fischeln West mit der vorherrschenden Windrichtung Nordwest und Hüls Südwest (Südost) deutlich den Einfluss der jeweils für die begleitende Kaltluftausbreitungskampagne gewählten Wetterlage.

Weitere meteorologische Rahmenbedingungen sowie die Konzentrationen der vier Spurenstoffe O_3 , NO, NO_2 und CO als 15-Minuten-Mittel zeigt Abbildung 25.

Die primären Spurenstoffe CO und NO als Indikatoren insbesondere für den Kfz-Verkehr in unmittelbarer Nähe des Messstandortes zeigen im Falle der außerhalb des Wochenendes durchgeführten Messungen in der Innenstadt, bei Verberg und bei Hüls Südwest deutlich den morgendlichen sowie - meist schwächer - den abendlichen Berufsverkehr an, wobei im Falle der Messung bei Verberg die CO-Konzentration im Bereich der Nachweisgrenze liegt. Der bei Sonneneinstrahlung unter Mitwirkung von NO_2 , O_2 und Kohlenwasserstoffen gebildete sekundäre Spurenstoff O_3 weist ein Maximum am Spätnachmittag auf. NO_2 , das teils direkt emittiert, vor allem aber aus NO gebildet wird, verhält sich intermediär.

Abbildung 26 zeigt die zugehörigen Konzentrationen der aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol, o-Xylol und m/p-Xylol sowie deren Summen. Im Falle der drei außerhalb des Wochenendes durchgeführten Messungen ist stets ein ausgeprägtes Maximum im Zeitraum des morgendlichen Berufsverkehrs sowie ein schwächeres im Rahmen des abendlichen Rückgangs des atmosphärischen Austausches erkennbar.

Im Vergleich der vier Standmessungen untereinander erweist sich der Standort Hüls Südwest in unmittelbarer Nähe sowohl zur vielbefahrenen Venloer Straße als auch zu lokalen Emittenten als derjenige mit der höchsten Konzentration primärer Spurenstoffe.

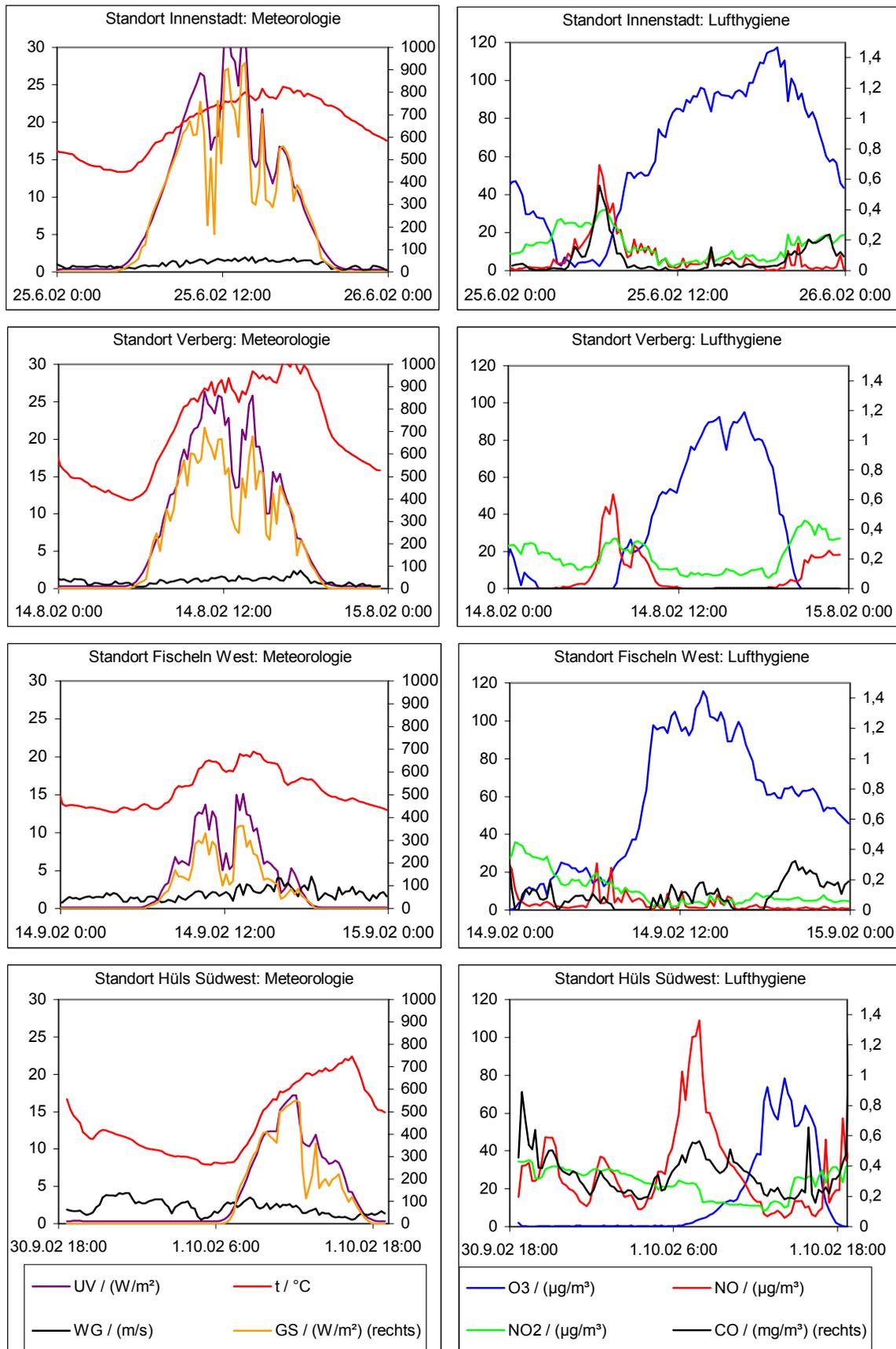


Abbildung 25: Messdaten der vier 24 h-Standmessungen (15-Minuten-Mittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

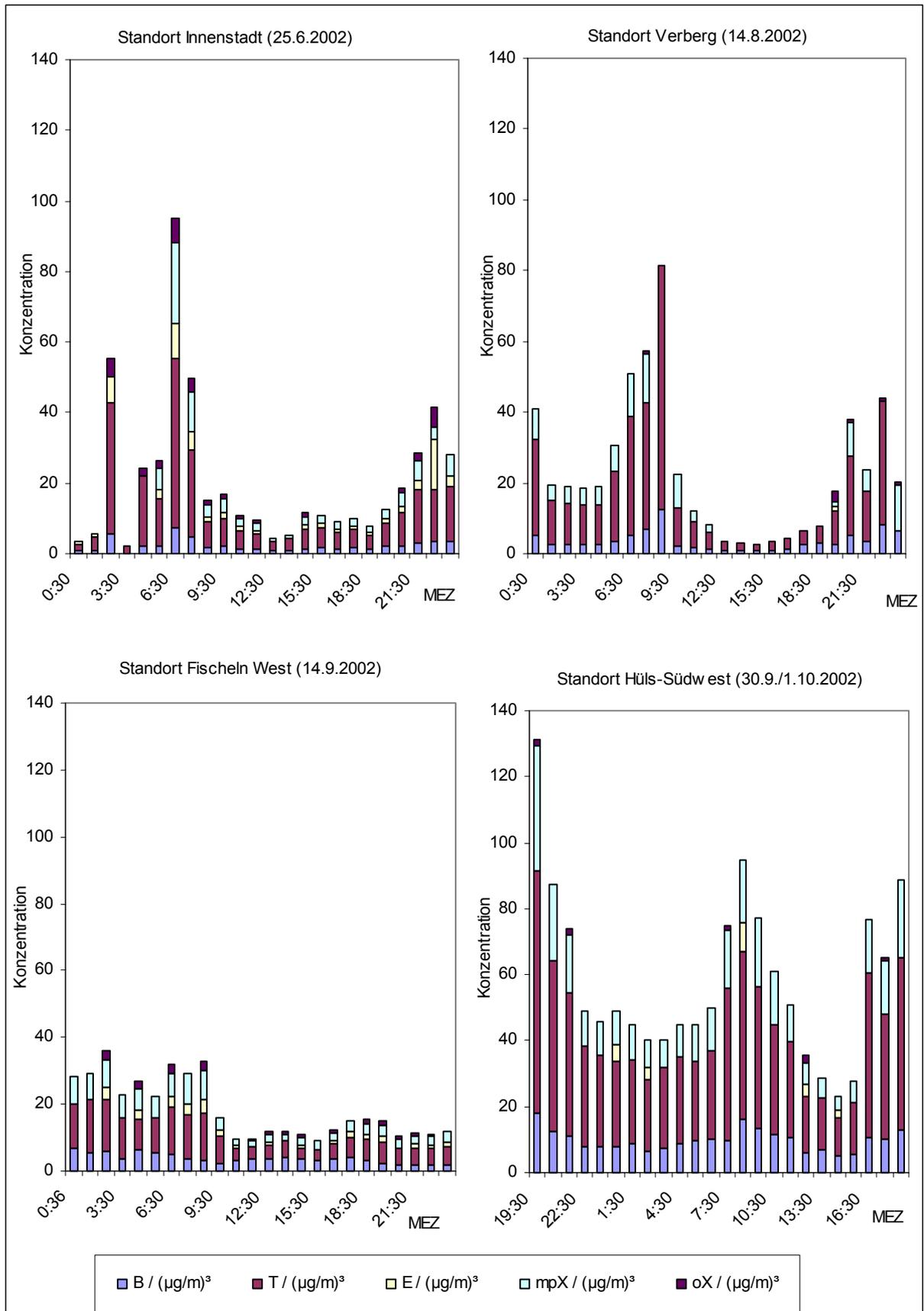


Abbildung 26: BETX-Konzentrationen während der vier 24 h-Standmessungen (integrierende Stundenmittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Zur besseren Einschätzung der absoluten Höhe der gemessenen Konzentrationen gibt Tabelle 15 eine Übersicht über die maximalen Immissionskonzentrationen (MIK-Werte) nach VDI 2310 (1974) sowie Grenz- und Schwellenwerte nach der 22. BImSchV (2002). Da letztere über eine Verschärfung von Toleranzmargen eine stufenweise Anpassung der derzeit gültigen Werte an EU-weit für spätestens 2010 angestrebte Endwerte im Jahrestakt vorgibt, sind für die Jahre 2001 bis 2010 die jeweils gültigen Werte ggf. einzeln aufgeführt.

Tabelle 15: Maximale Immissionskonzentrationen (MIK) sowie gesetzliche Grenz- und Schwellenwerte nach 22. BImSchV (2002) für die untersuchten Spurenstoffe.

Stoff / Einheit	Mittelungsintervall (Quelle, Zweck)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
NO / $\mu\text{g m}^{-3}$	0,5 h (MIK)	1000									
	24 h (MIK)	500									
NO ₂ / $\mu\text{g m}^{-3}$	0,5 h (MIK)	200									
	1 h (22. BImSchV)	280		270	260	250	240	230	220	210	200
	24 h (MIK)	100									
	1 a (22. BImSchV)	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40
NO _x / $\mu\text{g m}^{-3}$	1 a (22. BImSchV - Vegetationsschutz)	30									
Benzol / $\mu\text{g m}^{-3}$	1 a (22. BImSchV)	10					9	8	7	6	5
CO / mg m^{-3}	0,5 h (MIK)	50									
	8 h (22. BImSchV)	16	16	14	12	10					
	24 h (MIK)	10									
O ₃ / $\mu\text{g m}^{-3}$	0,5 h (MIK)	120									
	1 h (22. BImSchV - Vegetationsschutz)	200									
	1 h (22. BImSchV – Unterr. der Öffentlichkeit)	180									
	1 h (22. BImSchV - Alarmauslösung)	360									
	8 h (22. BImSchV)	110									
	24 h (22. BImSchV Vegetationsschutz)	65									

Keiner der untersuchten Stoffe überschreitet die für die Mittelungsintervalle von einer Stunde oder weniger gegebenen Werte; allerdings werden im Falle der Stickoxide und des Ozons Werte für längere Mittelungsintervalle (8 h, 24 h, 1 a) durch die 15-Minuten-Mittel angenähert oder überschritten.

Für die BETX – Kohlenwasserstoffe ist in der 22. BImSchV (2002) nur ein Jahreshgrenzwert für Benzol angegeben, der durch die gemessenen Stundenmittel mehrfach überschritten wird.

Zusätzlich zu den vier vertraglich vorgesehenen 24 h-Standmessungen wurden zwei Kurzzeitstandmessungen im Zusammenhang mit den Tracerausbreitungskampagnen in Verberg und Fischeln Ost zur Überwachung der Kaltluftqualität durchgeführt, da diese Kampagnen nicht mit einer 24 h-Standmessung zusammenfielen.

Die Qualität der während der Traceruntersuchung Verberg etwa 200 m südlich des Emissionspunktes vorgefundenen Luft ist in Abbildung 27 wiedergegeben.

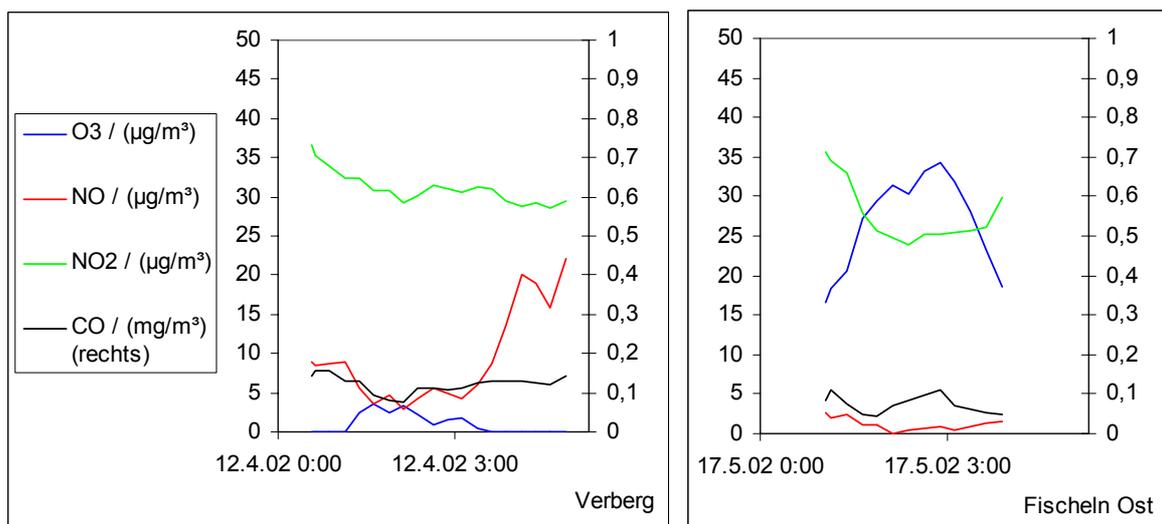


Abbildung 27: Spurenstoffkonzentrationen während der Tracerausbreitungskampagnen Verberg und Fischeln Ost (15-Minuten-Mittel) im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Im Falle der Tracerausbreitungskampagne Fischeln Ost fand die Standmessung in unmittelbarer Nähe des Emissionspunktes statt. Die Konzentrationen können in beiden Fällen gemäß Tabelle 15 als unbedenklich eingestuft werden.

4.7.3 Lufthygienische Messfahrten

In Ergänzung zum räumlich grobauflösenden, aber den gesamten Untersuchungszeitraum abdeckenden NO₂-Messnetz helfen die bei Worst-Case-Situationen durchgeführten mobilen Messungen mit hoher Auflösung entlang des linienhaften Straßennetzes, Daten der lufthygienischen Situation zur Darstellung in der Synthetischen Klimafunktionskarte zu gewinnen.

Die lufthygienischen Messfahrten wurden am 20.11.2001 während einer austauscharmen, aber bedeckten Wetterlage sowie am 25.4. und 29.7.2002 während strahlungsreicher, austauscharmer Wetterlagen durchgeführt. Am 20.11.2001 wurde in der Innenstadt wegen eines Wochenmarktes anstelle des Westwalls die Süd- und die Prinz-Ferdinand-Straße befahren und an deren Kreuzung mit der St.-Anton-Straße die ursprüngliche, in Karte 1 wiedergegebene Route wieder aufgenommen. Alle Messfahrten wurden außerhalb des Wochenendes durchgeführt.

Für die drei Spurenstoffe CO, NO und NO₂ sind die Streckenabschnittsmittel der jeweiligen Konzentrationen aller drei Fahrten in Karte 7 (CO), Karte 8 (NO) und Karte 9 (NO₂) dargestellt. Für die stark von den solaren Einstrahlungsverhältnissen abhängigen Ozonkonzentrationen wird in Karte 10 nur die sommerliche Messfahrt (29.7.2002) gezeigt, in der die mit Abstand höchsten Konzentrationen auftraten. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen vormittags und mittags gemessenen Ozonwerten zu gewährleisten, wurde zusätzlich zu der absoluten Konzentration der Quotient aus der während der Messfahrt gemessenen und der zum entsprechenden Zeitpunkt vom Landesumweltamt NRW an der LUQS-Station Krefeld-Linn erhobenen Ozonkonzentration dargestellt.

Die Aufstellung einer Gleichung zur Interpolation der vom Landesumweltamt erhobenen Stundenmittel nach Vorbild der chronologischen Korrektur für Temperaturmessfahrten (vgl. Kap. 4.2.6) erlaubt die Bildung des Quotienten in Echtzeit (vgl. Abbildung 28).

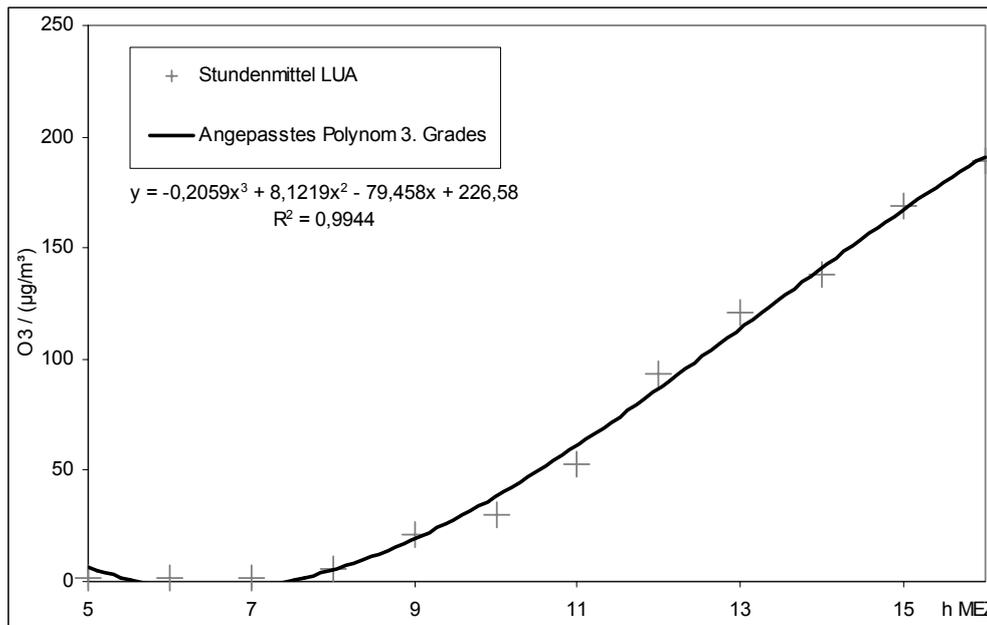


Abbildung 28: Stundenmittel der O₃-Konzentration an der LUQS-Messstation Kre-feld-Linn am 29.7.2002 sowie Polynom zur Interpolation (x: Zeit in h).

Der primäre Spurenstoff CO (Karte 7) zeigt – bei absolut betrachtet geringen Konzentrationen - Spitzenwerte insbesondere in der Innenstadt sowie bei einzelnen Messfahrtterminen in weiteren kreuzungsreichen, stark befahrenen Bereichen wie der Düsseldorfer Straße oder dem Ortskern Hülz. Lange Außerortsstrecken wie die Streckenabschnitte auf den BAB 44 und 57 weisen hingegen geringere Konzentrationen auf, als die Kfz-Belastung (vgl. VEP 1991) alleine erwarten lässt. Dies ist eine Folge der Fahrmodusabhängigkeit der Abgasemissionen von Kfz. Während im Leerlauf und anderen Extremsituationen aufgrund von Luftmangel im Motor insbesondere Produkte unvollständiger Kraftstoffverbrennung wie CO emittiert werden, steigt im Reiseverkehr bei leichtem Luftüberschuss und hohen Temperaturen die NO-Bildung (BAUMBACH 1994). Dementsprechend zeigt sich der primäre Spurenstoff NO (Karte 8) zwar ebenfalls in verkehrsbelasteten Bereichen erhöht, weist jedoch auch und gerade auf Autobahn- und Kraftfahrstraßenabschnitten hohe Konzentrationen auf. Während eines Messtermins wurde auf einem ansonsten unauffälligen Streckenabschnitt westlich der Innenstadt der Halbstundenwert der maximalen Immissionskonzentration (vgl. Tabelle 15) von $1000 \mu\text{g m}^{-3}$ überschritten.

NO₂ (Karte 9) ist ein überwiegend sekundärer Spurenstoff, d.h. es entsteht in der Atmosphäre aus primär emittiertem NO. Dementsprechend zeigt das Verteilungsmuster eine weniger starke Quellenbindung als die beiden vorangehenden Spurenstoffe. Dennoch weisen auch hier verkehrsbelastete Bereiche die höchsten Konzentrationen auf. Die in

Kap. 4.7.1 bereits andeutungsweise sichtbare räumliche Differenzierung findet sich dabei etwa wieder.

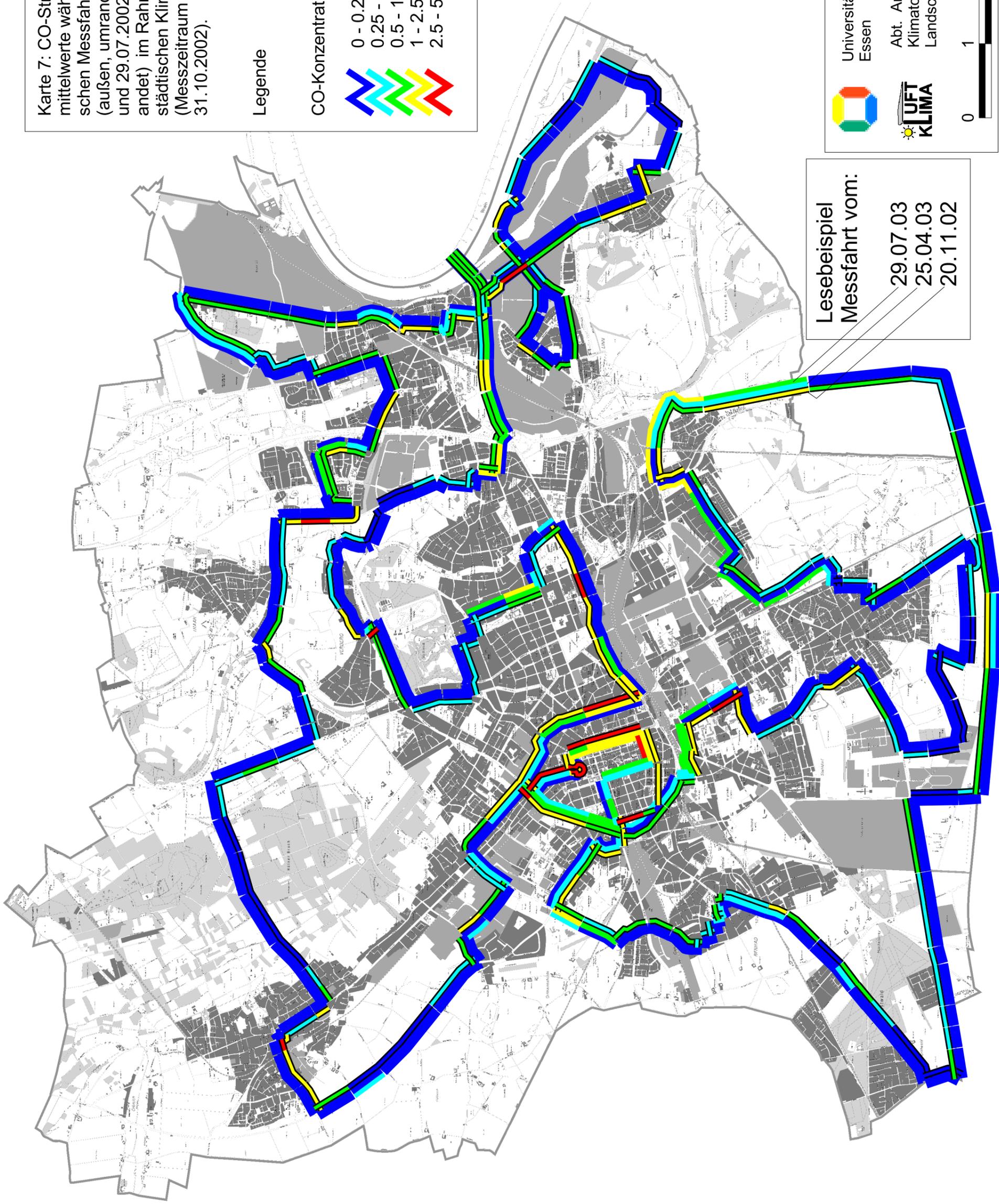
Ein zu den übrigen Spurenstoffen nahezu inverses Verteilungsmuster weist O_3 auf (Karte 10), wobei sich die nachfolgenden Betrachtungen vorwiegend auf den oben beschriebenen Quotienten beziehen, der aussagekräftiger ist als die stark von der Tageszeit abhängige absolute Konzentration. Die Bildung dieses sekundären Spurenstoffes unter Mitwirkung von NO_2 , Sauerstoff (O_2) und Kohlenwasserstoffen (BTEX, VOC) bei starker Sonneneinstrahlung wird zwar mittelbar durch die NO-Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs ermöglicht, doch unmittelbar fördert NO den Ozonabbau. Daher sind hohe Konzentrationen bei Ozonwetterlagen vor allem eine Erscheinung der (nicht zu quellfernen) Reinluftgebiete. Dementsprechend finden sich während der Messfahrt Werte, die diejenigen der LUQS-Station des Landesumweltamtes erreichen oder überschreiten, vor allem in verkehrsarmen Umland- sowie in geringerem Ausmaß in verkehrsberuhigten Wohnbereichen.

Durch Multiplikation des Streckenabschnitts-Quotienten mit einem an der LUQS-Station gemessenen Stundenmittel (einsehbar im Internet unter www.lua.nrw.de) lässt sich unter Vernachlässigung räumlicher Unterschiede des Ozontagesganges im Stadtgebiet eine Abschätzung der zum jeweiligen Zeitpunkt für das durchfahrene Gebiet zu erwartenden Konzentration vornehmen. Die maximale Konzentration an der LUQS-Station am Messfahrttag überstieg mit $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mehrere gesundheitsrelevante Richtwerte (vgl. Tabelle 15), jedoch nicht die sehr hohe Schwelle zur Auslösung von Ozonalarm von $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dasselbe ist für alle in der Karte grün, gelb oder rot dargestellten Streckenabschnitte zu erwarten. Mit der Einstellung des bis zu 2,1fachen LUQS-Maximums in den rot eingefärbten Streckenabschnitten ist allerdings nicht zu rechnen, da quellferne Gebiete einen ausgeglicheneren Ozontagesgang aufweisen als verkehrnähere (KUTTLER & ZMARSLY 1995).

Karte 7: CO-Streckenabschnitts-
mittelwerte während der lufthygieni-
schen Messfahrten am 20.11.2001
(außen, umrandet), 25.04. (Mitte)
und 29.07.2002 (außen, nicht um-
randet) im Rahmen der Gesamt-
städtischen Klimaanalyse Krefeld
(Messzeitraum 01.11.2001 bis
31.10.2002).

Legende

CO-Konzentrationen in mg/m³



Lesebeispiel
Messfahrt vom:

29.07.03

25.04.03

20.11.02



Universität
Essen



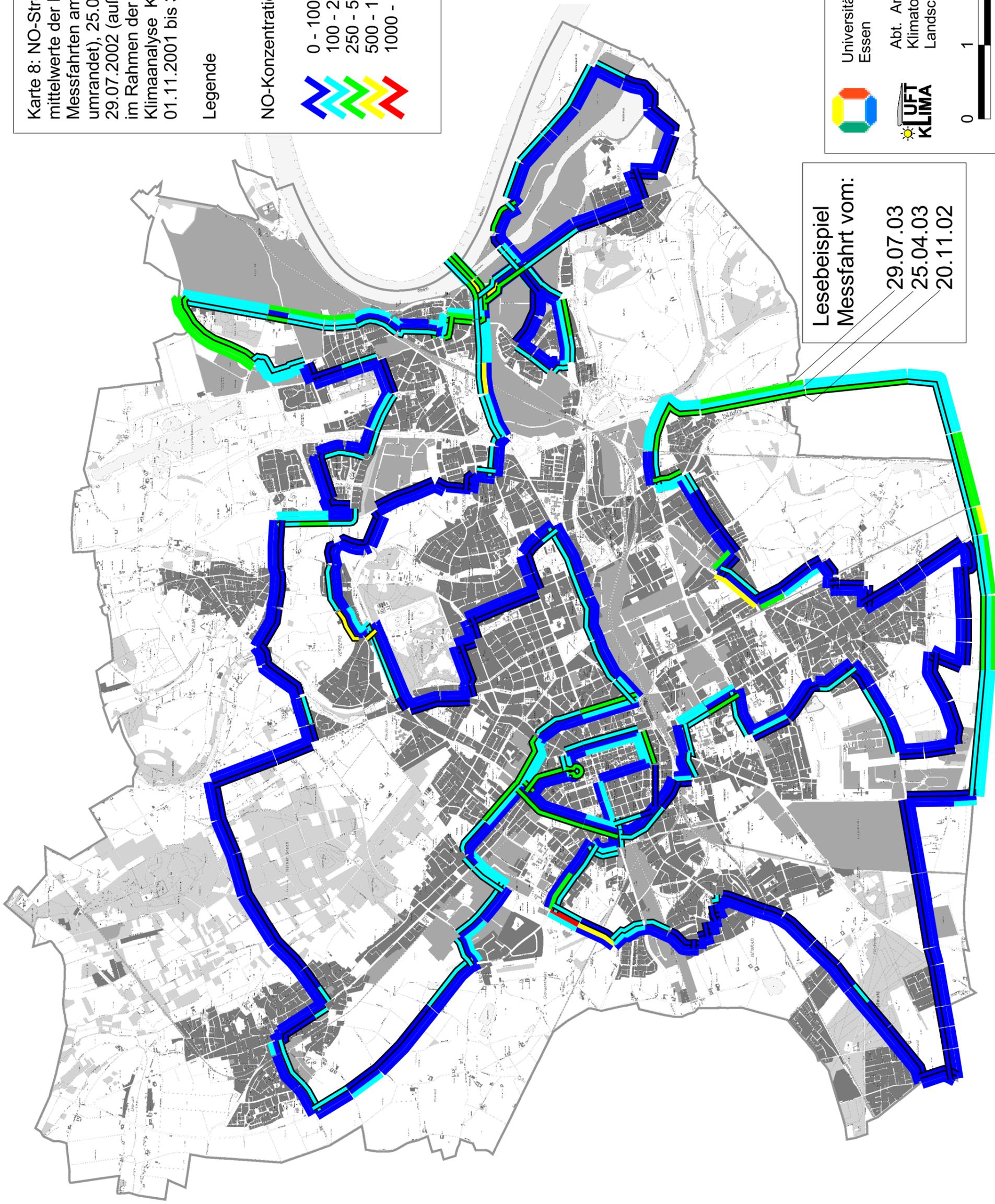
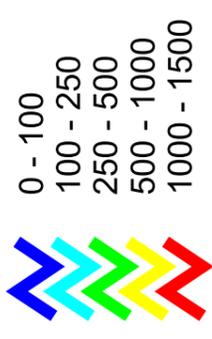
Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



Karte 8: NO-Streckenabschnitts-
mittelwerte der lufthygienischen
Messfahrten am 20.11.2001 (außen,
umrandet), 25.04. (Mitte) und
29.07.2002 (außen, nicht umrandet)
im Rahmen der Gesamtstädtischen
Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum
01.11.2001 bis 31.10.2002).

Legende

NO-Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Lesebeispiel
Messfahrt vom:

29.07.03

25.04.03

20.11.02



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie

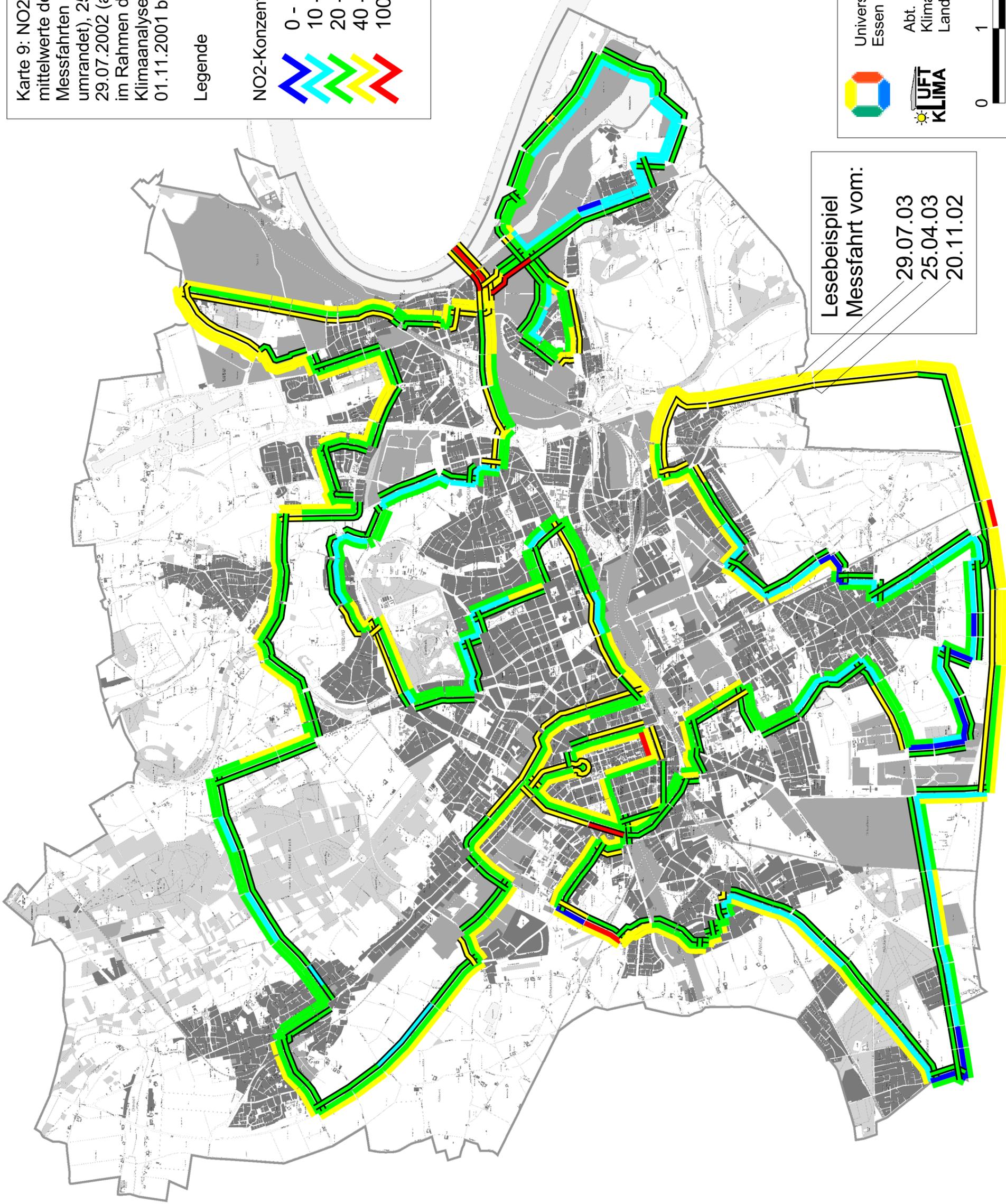
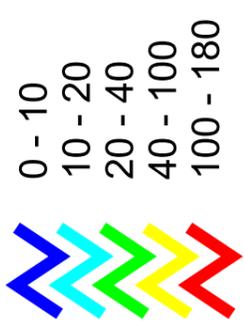


0 1 2 Kilometer

Karte 9: NO₂-Streckenabschnitts-
mittelwerte der lufthygienischen
Messfahrten am 20.11.2001 (außen,
umrandet), 25.04. (Mitte) und
29.07.2002 (außen, nicht umrandet)
im Rahmen der Gesamtstädtischen
Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum
01.11.2001 bis 31.10.2002).

Legende

NO₂-Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Lesebeispiel
Messfahrt vom:

29.07.03

25.04.03

20.11.02



Universität
Essen



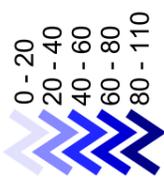
Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



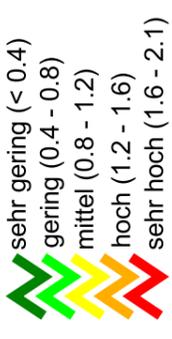
Karte 10: O₃-Streckenabschnittswertwerte der lufthygienischen Messfahrt am 29.07.2002 sowie Verhältnis zur gleichzeitig an der LUQS-Station Linn des Landesumweltamtes NRW herrschenden Konzentration im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum 01.11.2001 bis 31.10.2002).

Legende

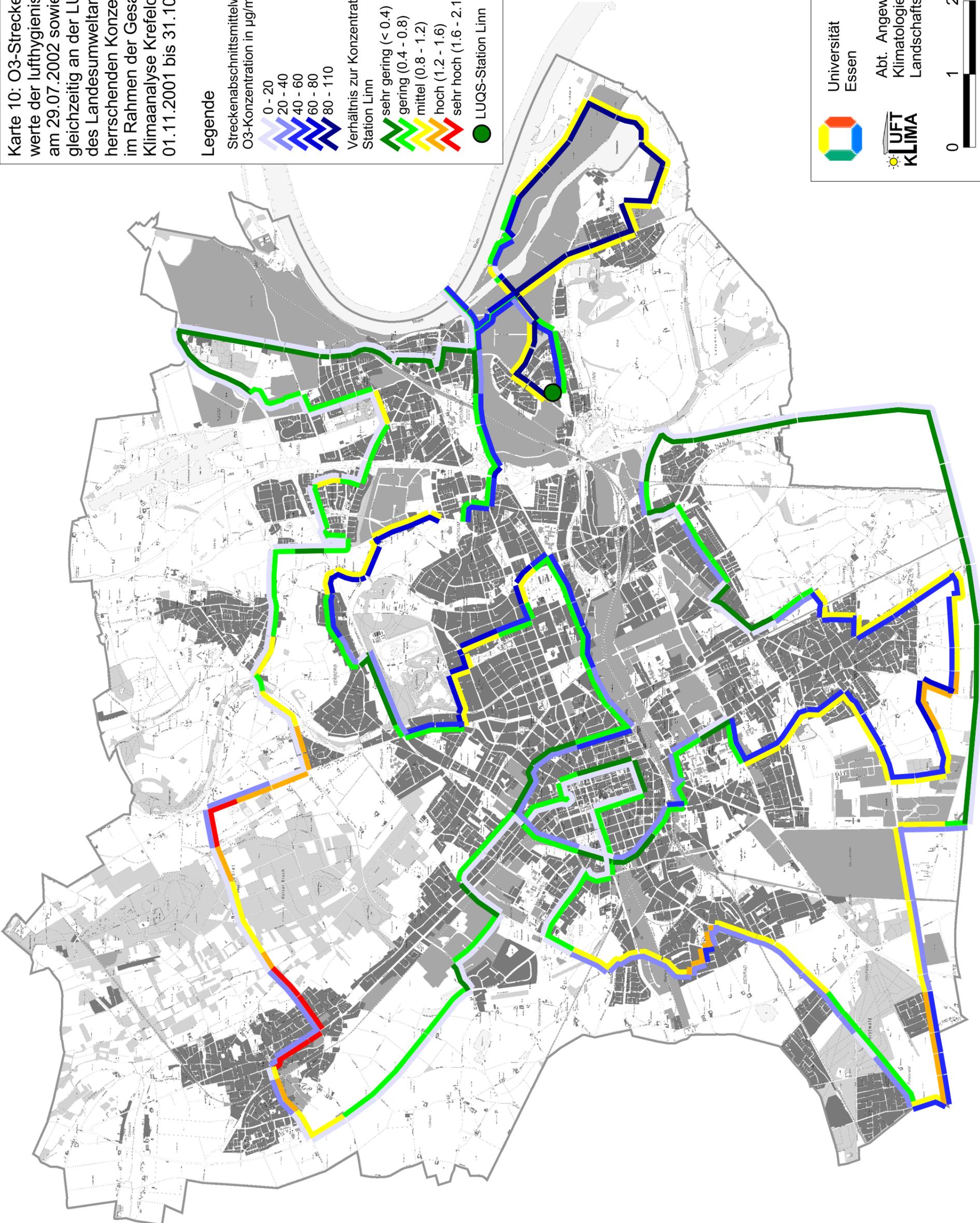
Streckenabschnittswerte der O₃-Konzentration in µg/m³



Verhältnis zur Konzentration an der LUQS-Station Linn



● LUQS-Station Linn



Universität
Essen



Abt. Angewandte
Klimatologie und
Landschaftsökologie



4.7.4 BETX-Profilmessungen

Im folgenden Kapitel werden die BETX-Messungen dargestellt, die nach Kriterien der Flächennutzung an ausgewählten Punkten entlang der Strecke der lufthygienischen Messfahrten durchgeführt wurden, um deren Aussagekraft um die nur punktuell messbaren BETX-Kohlenwasserstoffe zu erweitern.

Abbildung 29 gibt einen Überblick über die während der BETX-Profilmessungen am 25.6.2002 und 14.8.2002 (parallel zu zwei 24 h-Standmessungen) sowie am 29.7.2002 (parallel zu einer lufthygienischen Profilmessfahrt) aufgetretenen BETX-Konzentrationssummen. Da sich bei diesen Punktmessungen Tagesgang und räumliche Unterschiede überlagern, wurden die drei für jeden Messpunkt zur Verfügung stehenden Messwerte in Abhängigkeit von der Uhrzeit (Mitte der halben Stunde, über die die Probenahme erfolgte) aufgetragen und den während der Standmessung am 25.6.2002 am Standort Innenstadt gemessenen Stundenmitteln gegenübergestellt, die vollständig bereits in Abbildung 26 wiedergegeben wurde. Auf diese Weise lassen sich „echte“ Unterschiede zwischen den Messpunkten mit größerer Gewissheit von solchen trennen, die auf unterschiedliche Probenahmezeitpunkte zurückgehen. Für den Messpunkt Innenstadt (K5) existieren nur zwei Punktmessungen vom 29.7. und 14.8.2002, da am 25.6.2002 direkt auf die am selben Messort stattfindende Standmessung zurückgegriffen werden konnte.

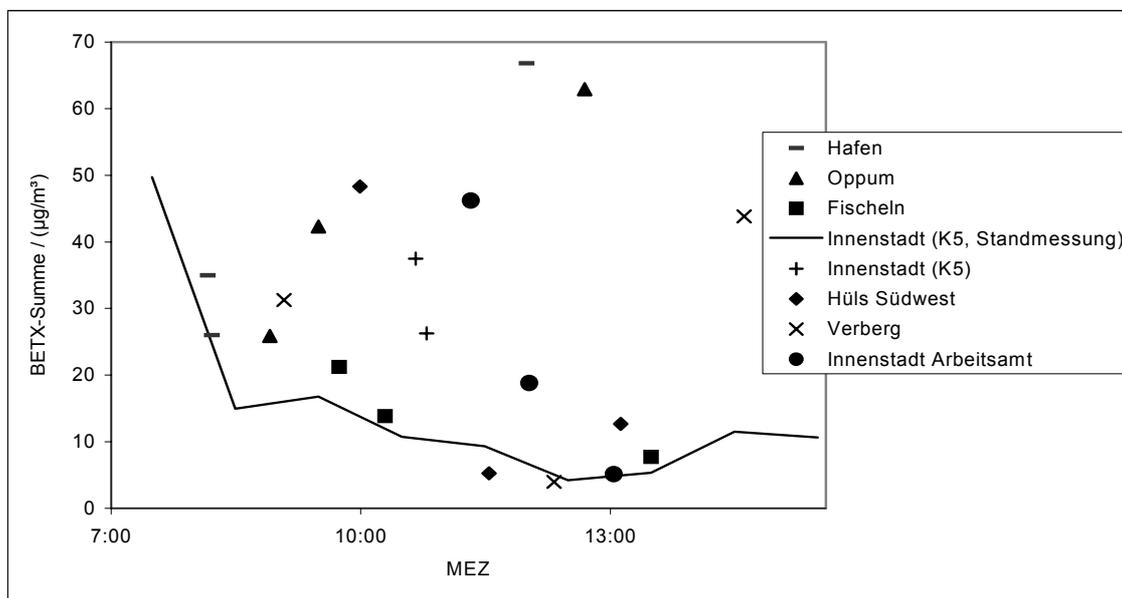


Abbildung 29: BETX-Konzentrationen während der Profilmessungen am 25.6., 29.7. und 14.8. 2002 im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld (Messzeitraum: 1.11. 2001 bis 31.10. 2002).

Ein Vergleich der beiden Punktmessungen am Innenstadtstandort mit den Daten der 24 h-Standmessung zeigt, dass der Termin am 25.6.2002 die geringsten Konzentrationen unter den drei Messterminen aufwies. Da alle anderen Standorte das Niveau dieser Messung an mindestens einem der drei Messtermine erreichen, kann davon ausgegangen werden, dass alle untersuchten Standorte BETX-Konzentrationen derselben Größenordnung aufweisen.

Unterschiede ergeben sich vor allem in Hinblick auf den Tagesgang: Während der Standort Fischeln an einem Wirtschaftsweg etwa 10 m südlich der BAB 44 einen der Innenstadt ähnlichen Tagesgang mit deutlicher Abnahme nach dem morgendlichen Berufsverkehr erkennen lässt – das insgesamt niedrige Niveau ist wohl auf den erhöhten Verlauf der BAB in diesem Bereich und den während aller Messtermine flüssigen Verkehr zurückzuführen - zeigen die Standorte Hafen und Oppum mittags hohe Konzentrationen. Dies weist die beiden Standorte – die stark durch Lastverkehr genutzte Kreuzung Düsseldorfer Straße / Hafenstraße im gewerblich-industriell geprägten Hafengebiet und die unmittelbar an eine Auffahrt der BAB 57 angebundene Kreuzung Hafenstraße / Untergath in Oppum – als Verkehrsknoten aus, an denen die Bedeutung von Berufspendlern gegenüber gewerblichem Verkehr zurücktritt. Die übrigen Standorte – die Kreuzung Venloer Straße / Drügstraße südlich des geplanten Wohnbaugebietes Hüls Südwest, die Kreuzung Gatzestraße / B 509 bei Verberg und die Kreuzung Voltastraße / Bahnstraße in der südöstlichen Innenstadt – verhalten sich intermediär.

4.8 Zusammenfassende Bewertung der klimatischen und luft-hygienischen Ergebnisse

Die in den vorausgehenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse der stationären und mobilen klimatologischen und lufthygienischen Untersuchungen werden im folgenden bewertend zusammengefasst.

4.8.1 Bewertung der klimatischen Situation

Für die klimatologische Bewertung der Ergebnisse des Feststationsnetzes wurde zum Relativvergleich der Stationsdaten eine dreistufige Skala festgelegt. Die Differenz zwischen den jeweils im Stationskollektiv aufgetretenen Maximum- und Minimumwerten der betrachteten Größen wurde dazu in Hinblick auf den planerischen Anwendungsbezug in drei gleichgroße Bewertungsintervalle mit der Abstufung „geringe - mittlere - hohe

Belastung“ geteilt. In der anschließenden Bewertung wurden die betrachteten Größen der Feststationen im Untersuchungszeitraum entsprechend dieser Intervalle beurteilt und losgelöst von Zahlenwerten mit einer bewertenden Farbe versehen.

Tabelle 16 gibt eine Übersicht über die Beurteilungsstufen. Wenn diese Intervalle rundungsbedingt nicht genau gleich groß sein konnten, wurde zur unteren Beurteilungsstufe hin abgerundet.

Tabelle 17 fasst die aus den Beurteilungsgrenzen resultierende Bewertung der wesentlichen klimatischen Kenngrößen zusammen. Daraus geht hervor, dass die Feststationen im Umland, Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6), sowohl bezüglich der thermischen Verhältnisse des Sommerhalbjahres als auch der austauschrelevanten und human-biometeorologischen Verhältnisse insgesamt begünstigt sind. Wie an den durch Wohnbebauung geprägten Feststationsstandorten Lindental (K4) und Stadtwald (K8) treten an den Umlandstationen im Winter jedoch verstärkt Tage unterhalb definierter Temperaturschwellen auf, die innerhalb der dortigen Wohnbebauung erhöhte Heizleistungen nach sich ziehen. Im Gegensatz zum Umland sind die durch Wohnbebauung geprägten Feststationsstandorte jedoch durch einen deutlich eingeschränkten Luftaustausch und eine daraus resultierende mittlere bis hohe sommerliche human-biometeorologische Wärmebelastung gekennzeichnet. Das sommerliche und winterliche thermische Niveau der Feststationsstandorte Uerdingen (K1) und Innenstadt (K5) erweist sich im Stationsvergleich am höchsten. Dies bedeutet für die Wintersituation einen geringen Heizenergieverbrauch, im Sommer eine je nach Sensibilität der Nutzung, individuelle Wärmebelastung. Während der Standort Uerdingen (K1) bezüglich der Austausch- und human-biometeorologischen Verhältnisse als mittelmäßig belastet einzustufen ist, weist die Innenstadt (K5) diesbezüglich eine besonders benachteiligte Situation im Stationskollektives auf. Der Standort Hafen (K2) zeichnet sich durch eine Mittelstellung bezüglich der thermischen und human-biometeorologischen Verhältnisse aus, die Austauschverhältnisse sind im Stationsvergleich ähnlich günstig wie an den Umlandstationen.

Tabelle 16: Bewertungsgrenzen verschiedener klimatologischer Kennwerte basierend auf den gedrehten Differenzen zwischen Maximum- und Minimumwerten der betrachteten klimatischen Kenngrößen.

Kriterium	Einheit	Intensität, Belastung					
		gering		mittel		hoch	
		von	bis	von	bis	von	bis
Thermische Verhältnisse							
Frosttage	[Anzahl]	34	40	41	47	48	54
Kalte Tage	[Anzahl]	13	14	15	16	17	19
Heiztage	[Anzahl]	242	249	250	257	258	266
Sommertage	[Anzahl]	25	27	28	30	31	34
Heiße Tage	[Anzahl]	7		8		9	10
Grillpartytage	[Anzahl]	18	24	25	31	32	38
Heiße Nächte	[Anzahl]	3	7	8	12	13	17
Austauschverhältnisse							
Jahresmittel der Windgeschwindigkeit	[m s ⁻¹]	2,3	1,9	1,8	1,4	1,3	1,0
Mittel der Windgeschwindigkeit autochthoner Tage	[m s ⁻¹]	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,6
Schwachwindhäufigkeit	[%]	29,2	45,8	45,9	62,6	62,7	79,4
Schwachwindepisoden mit Mindestdauer von 6h	[Anzahl]	150	167	168	185	186	203
Calmenhäufigkeit im Jahr	[%]	2,6	9,7	9,8	17,0	17,2	24,4
Calmenhäufigkeit an autochthonen Tagen	[%]	8,5	21,1	21,2	33,9	34,0	46,6
Human-bioklimatische Verhältnisse *							
Rel. Häufigkeit von Tagstunden mit PMV > 0,5	[%]	37,4	43,1	43,2	49,0	49,1	54,8
Rel. Häufigkeit von Nachtstunden mit PMV > 0,5	[%]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Episoden (Mindestdauer 6 h) mit PMV > 0,5	[Anzahl]	24	27	28	32	33	37
* Zeitraum: 1.6.2002 bis 31.8.2002							

Lesebeispiel für Tabelle 16: Die Anzahl der Frosttage lag im Kollektiv der Feststationen im Untersuchungszeitraum zwischen 34 und 54 Tagen. Diese Werte bilden die äußeren Grenzen der Bewertungsspanne. Durch Dreiteilung der Differenz zwischen diesem höchsten und tiefsten Wert (54 - 34 = 20) und anschließender sukzessiver Addition auf die Untergrenze der Frosttage entstehen folgende Bewertungsintervalle: 34 bis 40 = geringe Belastung, 41 bis 47 Frosttage = mittlere Belastung, 48 bis 54 Frosttage = hohe Belastung. Feststationen, die z.B. weniger als 40 Frosttage aufweisen wurden demnach als „gering mit Kälte belastet“ eingestuft.

Die Ergebnisse der Lufttemperaturmessfahrten geben Hinweise auf die Übertragbarkeit der thermischen Bewertung der Stationen auf ganze Stadtteile oder Flächennutzungstypen unter Beschränkung auf Strahlungsnächte. Demnach sind die Verhältnisse der Station Innenstadt (K5) (geringe Kältebelastung im Winter, hohe Wärmebelastung im Sommer) auf das gesamte Innenstadtgebiet übertragbar und werden in Teilen der Innenstadt noch übertroffen (vgl. Karte 2). Die ähnliche, gemäß Karte 2 jedoch bereits

Tabelle 17: Ergebnisse der Bewertung thermischer, austauschrelevanter und human-biometeorologischer Verhältnisse im Krefelder Untersuchungsgebiet bezogen auf den Zeitraum 1.11.2001 bis 31.10.2002.

Bezeichnung	Stationsname							
	Uerdingen	Hafen	Fischeln	Lindental	Innenstadt	Hüls Südwest	Verberg	Stadtwald
	(K1)	(K2)	(K3)	(K4)	(K5)	(K6)	(K7)	(K8)
Thermische Verhältnisse								
Frosttage [Anzahl]								
Kalte Tage [Anzahl]								
Heiztage [Anzahl]								
Sommertage [Anzahl]								
Heiße Tage [Anzahl]								
Grillpartytage [Anzahl]								
Heiße Nächte [Anzahl]								
Austauschverhältnisse								
Jahresmittel der Windgeschwindigkeit								
Mittlere Windgeschw. autochthoner Tage								
Schwachwindhäufigkeit [%]								
Calmenhäufigkeit im Jahr								
Calmenhäufigkeit autochthoner Tage								
Human-biometeorologische Verhältnisse *								
Rel. Häufigkeit von Tagstunden mit PMV >0,5 [%]								
Rel. Häufigkeit von Nachtstunden mit PMV > 0,5 [%]								
Episoden (Mindestdauer 6 h) mit PMV > 0,5 [%]								
* 1. Juni bis 31. August 2002								
Legende	geringe Intensität, Belastung			mittlere Intensität, Belastung			hohe Intensität, Belastung	

durch deutlich geringere Wärmebelastungen gekennzeichnete Situation an Station Uerdingen (K2) ist typisch für das sekundäre Wärmeinselzentrum, das aus dem mit einer Mischung aus Gewerbe-, Industrie- und Wohnflächen bebauten Teil des Rheinuferbereichs besteht. Eine Übertragbarkeit auf Gewerbe- bzw. industriennahe Flächentypen generell ist hingegen nur bedingt gegeben, da diese sich thermisch inhomogen verhalten. Die Wohngebietsstationen Lindental und Stadtwald lassen sich auf die durchfahrenen Wohngebiete mit Vororts-, Gartenstadt- oder Dorfcharakter übertragen, soweit diese nicht durch räumliche Nähe zu stärker überwärmten Bereichen geprägt sind; zugleich zeigen sie auch die Spannweite dieses Nutzungstyps (von „mittelmäßig“ bis „kalt“) je nach Gebäude- und Grünflächendichte sowie Lage im Relief. Für einige Wohngebiete (z.B. Teile von Traar) sind demnach noch geringere Wärme- und höhere Kältebelastungen zu erwarten. Die Umlandstationen Fischeln (K3), Hüls Südwest (K6) und Verberg (K7) erweisen sich nur für den mittleren und wärmeren Teil der Umlandstandorte als repräsentativ, in leichten Muldenlagen (insbesondere im Bereich „Hülser Bruch“) sind nachts geringere Temperaturen zu erwarten. Die thermische Mittelstellung der Station Hafen (K2) kommt im räumlichen Vergleich in der Übergangslage der Station zwischen intensiv genutzten und unbebautem Rheinuferbereich zum Ausdruck.

4.8.2 Bewertung der lufthygienischen Situation

Zur Bewertung der im Rahmen der lufthygienischen Messfahrten festgestellten Spurenstoffkonzentrationen wurde ein Luftqualitätsindex für die einzelnen Streckenabschnitte errechnet, in den die primären Spurenstoffe CO und NO sowie des sekundären Spurenstoffs NO₂ einfließen. O₃ findet wegen seines oft antagonistischen Verhaltens zu den primären Spurenstoffen keine Berücksichtigung. Hier gilt die Feststellung, dass alle Gebiete, die nur geringe Konzentrationen der übrigen gemessenen Spurenstoffe aufweisen, bei sommerlichen Strahlungswetterlagen für hohe Ozonkonzentrationen prädestiniert sind.

Der Qualitätsindex beruht auf dem Mittelwert der Streckenabschnittsmittelwerte der drei Messfahrten für jeden der drei Spurenstoffe. Er ist gleich 1, wenn die Konzentration eines Spurenstoffs das 90-Perzentil aller Streckenabschnittsmittelwerte erreicht oder überschreitet, d.h. wenn der Streckenabschnitt zu den 10% Abschnitten mit den höchsten Konzentrationen dieses Spurenstoffs gehört. Trifft dies für zwei Spurenstoffe zu, so beträgt der Index 2, gilt es für alle drei Stoffe, so erhält der Abschnitt den höchsten Index 3. Abschnitte mit dem Index 0 sind dementsprechend bezüglich aller drei Stoffe unauffällig. Die Höhen des 90-Perzentils der drei Stoffe sowie weitere Kennwerte sind in Tabelle 18 angegeben.

Tabelle 18: Kennwerte der über drei Messfahrten (20.11. 2001, 25.4. 2002, 29.7. 2002) gemittelten Streckenabschnittsmittelwerte von CO, NO und NO₂.

	CO / mg m ⁻³	NO / µg m ⁻³	NO ₂ / µg m ⁻³
Minimum	0,08	14	16,9
Mittelwert	0,41	102	35,1
90-Perzentil	0,90	219	49,5
Maximum	2,25	527	101,0

Ein Vergleich der Mittelwerte, 90-Perzentile und Maxima mit den jeweils für den geringsten angegebenen Mittelungszeitraum in Tabelle 15 angegebenen Grenzwerten weist insbesondere die CO-Konzentrationen entlang der Messstrecke als gering aus, wohingegen NO und NO₂ maximal etwa die Hälfte des 0,5-h-MIK-Wertes erreichen. Betrachtet man anstelle des Mittelwertes der drei Messfahrten die einzelnen Streckenabschnittsmittel (vgl. Kap. 4.7.3), so überschreitet NO allerdings an einigen stark befahrenen Abschnitten den 0,5-h-MIK-Wert.

Die Qualitätsindizes der Streckenabschnitte sind in der synthetischen Klimafunktionskarte (Anhang) dargestellt. Sie weisen die relativ höchsten Konzentrationen der Innenstadt, dem Verkehrsknotenpunkt zwischen Uerdingen, Linn und Hafen sowie den Kraftfahrstraßen- und Autobahnabschnitten zu. Daneben treten jedoch auch einzelne Streckenabschnitte mit Luftqualitätsindizes > 0 in Wohngebietsbereichen auf, so zwischen Oppum und Fischeln, in Verberg sowie westlich der Innenstadt.

Eine Zusammenschau mit Punktmessungsdaten aus dem NO_2 -Passivsammlernetz, den BETX-Messungen und den Standmessungen zeigt überwiegend geringe Konzentrationen im Umland (Ausnahme: Standmessung in Hüls Südwest) und Höchstkonzentrationen in der Innenstadt sowie im Bereich Uerdingen/Hafen. Die hohen Konzentrationen entlang der Autobahn nehmen im Umland mit guten Durchmischungsvoraussetzungen beiderseits der Fahrbahn rasch ab, wie die BETX-Messungen am südlichen Autobahnrand (Messpunkt Fischeln) und die NO_2 -Daten der Station Fischeln (K3) zeigen. Im weniger gut ventilierbaren Siedlungsbereich hingegen kann die Nähe einer vielbefahrenen Straße die Luftqualität beeinträchtigen, wie die Beispiele einzelner Punkte bzw. Abschnitte in Verberg (Messfahrt) und Oppum (Messfahrt, BETX-Profil) zeigen.

5 Synthetische Klimafunktionskarte und Planungshinweiskarte

Die planungsrelevanten Karten (Synthetische Klimafunktionskarte und Planungshinweiskarte) wurden in Anlehnung an die Empfehlungen der Richtlinie VDI 3787 Bl.1 (1997) erstellt. Sie geben einen zusammenfassenden Überblick über die Untersuchungsergebnisse in generalisierter, flächenhaft interpretierter Form wieder und ergänzen den Textteil, auf den insbesondere in Detailfragen zurückgegriffen werden sollte. Die Karten sind daher nicht isoliert vom Text zu betrachten.

Die Erstellung der Karten erfordert eine Abgrenzung von Flächeneinheiten, wohingegen die räumlichen Änderungen der Klimaelemente (z.B. Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit), aber auch der Spurenstoffkonzentrationen, fließend und zeitlichen Schwankungen unterworfen sind. Daher wurden anstelle automatisierter Interpolationsverfahren primär die Klimafaktoren Flächennutzung und Relief als Kartierungsgrundlage herangezogen. Die Abgrenzung von Flächen klimatischer und lufthygienischer Charakteristika sowie entsprechender Planungsempfehlungen erfolgte unter Rückgriff auf die in Kapitel 5.1 genannten Kartenwerke mit Berücksichtigung der Ergebnisse der mobilen und stationären Untersuchungen unter Zuhilfenahme von Plausibilitäts- und Analogieschlüssen. Die so ermittelten Grenzen sind nicht als flächenscharf anzusehen, sondern markieren Übergangsbereiche und beziehen sich auf den Bearbeitungsmaßstab 1:20.000. Alle wertenden Darstellungen basieren auf einem Relativvergleich innerhalb des Krefelder Untersuchungsgebietes.

5.1 Synthetische Klimafunktionskarte

Beruhend auf den Ergebnissen der in den vorausgehenden Kapiteln erläuterten mobilen und stationären Untersuchungen im Rahmen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld stellt die Synthetische Klimafunktionskarte die klimatischen und lufthygienischen Differenzierungen im Krefelder Stadtgebiet - unter Berücksichtigung von Topographie und Flächennutzung - als generalisierend bewertenden, flächenbezogenen Überblick dar. Dabei leiten sich die Aussagen zu den klimatischen Verhältnissen aus den kontinuierlichen Messungen des temporären Feststationsmessnetzes sowie aus den durchgeführten Temperaturmessfahrten ab. Aussagen zur Immissionssituation beruhen auf den Ergebnissen der lufthygienischen Messfahrten, den 24 h-Standmessungen und den NO₂-Messungen mittels Passivsammlern. Bezugnehmend auf eine immissionsklimatische Worst-Case-Situation gibt die Synthetische Klimafunktionskarte die Verhältnisse für austauscharme Strahlungstage wieder. Als Kartengrundlage diente die Digitale Stadtkarte 1:10.000, die für die vorliegende Klimaanalyse auftragsgemäß in den Maßstab 1:20.000

transformiert wurde. Zur Übertragung der aus den punkt- bzw. linienhaft vorliegenden Messdaten gewonnenen klimatischen und lufthygienischen Aussagen in die Fläche wurden neben der Kartengrundlage die amtlichen topographischen Karten im Maßstab 1:25.000 sowie von der Stadt Krefeld zur Verfügung gestellte Kartenwerke (Stadtatlas 1:10.000 (1996) mit Grund- und Luftbildkartensammlung) auf Basis der Deutschen Grundkarte 1:5.000 herangezogen.

In flächiger Darstellung gibt die Synthetische Klimafunktionskarte die Differenzierung der verschiedenen Klimatope in ihrer Zusammenschau wieder. Klimatope sind „räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen und die Auswirkungen wenig unterschiedlich sind“ (VDI 3787 Bl.1 (1997)). In erster Linie wirken die Einflussfaktoren Relief, Flächennutzung, Oberflächenstruktur, Untergrund sowie Vegetationsanteil und -zusammensetzung während austauscharmer Strahlungswetterlagen auf das Mikroklima eines Standortes. In derartigen Fällen sind nicht die Eigenschaften einer herangeführten Luftmasse, sondern die Energieumsätze am Boden für das Kleinklima bestimmend.

Neben den flächengestaltenden Farbgebungen der Klimatope bilden Punktierungen und Schraffuren die Ebene der klimatischen Funktionen. Flächen mit besonderen Klimafunktionen wie Kaltluftentstehungs-, Kaltlufteinzugsgebiete oder Ventilationsbahnen, die Einfluss auf die thermischen und lufthygienischen Eigenschaften eines Ortes ausüben, werden hier gekennzeichnet.

Die lufthygienische Situation wird anhand von Liniensignaturen dargestellt. Basierend auf den lufthygienischen Messfahrten und einem darauf basierenden Luftqualitätsindex werden die im Untersuchungsgebiet betrachteten Straßenabschnitte bezüglich ihrer Luftqualität klassifiziert.

5.1.1 Klimatope

Innerhalb des Untersuchungsraums wurden acht Klimatoptypen, deren Eigenschaften im folgenden erläutert werden, nach den speziellen topographischen Gegebenheiten des Krefelder Stadtgebietes differenziert.

Im Vergleich zu anderen Städten zeichnet sich das Krefelder Stadtklima in weiten Teilen durch einen Gartenstadtcharakter aus, der bei der Klimatoptypendifferenzierung Berücksichtigung findet.

Stadtkern-Klimatop

Dieses Klimatop kennzeichnet den am stärksten urban geprägten Innenstadtbereich einschließlich seiner hoch versiegelten Gebiete mit überwiegend mehrgeschossiger, dichter Blockrandbebauung und geringem Vegetationsanteil. Eine hohe Siedlungsdichte, Geschäfts- und administrative Einrichtungen ziehen ein typischerweise starkes Verkehrsaufkommen mit erhöhten Kfz-bürtigen Spurenstoffkonzentrationen nach sich. Der Luftaustausch ist eingeschränkt. Dieser kann unterhalb des Dachniveaus vorwiegend nur entlang von Straßenzügen erfolgen, insbesondere entlang der rechtwinkligen Straßenstruktur des Stadtzentrums. Gegenüber dem Umland tritt eine nächtliche Überwärmung hervor. Im Sommer kommt es zu einer human-biometeorologischen Wärmebelastung.

Gewerbe- / Industrie-Klimatop

Durch einen je nach Größe und Art der Betriebe hohen Anteil versiegelter Flächen, prozess- bzw. produktionsabhängiger Emissionen (Abwärme, gas-, partikelförmige Spurenstoffe) und dichter, mehrstöckiger Bebauung zeichnet sich dieses Klimatop aus. Es kann zu einer nächtlichen Überwärmung gegenüber der Umgebung und einer sommerlichen human-biometeorologischen Wärmebelastung kommen. Die Austauschverhältnisse können in Abhängigkeit von der Standweite der Gebäude und ihrer Stellung zur Windrichtung deutlich eingeschränkt sein. Erhöhte Immissionskonzentrationen durch Lkw-Verkehr können hinzukommen.

Stadt-Klimatop

Dieses Klimatop umfasst überwiegend mehrgeschossige Bebauung mit nächtlichen Überwärmungen, die gegenüber dem Stadtkern-Klimatop in abgeschwächter Form auftreten. Hierzu zählen aufgelockerte Blockbauweisen sowie einzelne Hochhausstrukturen. Ein zunehmender Vegetationsanteil wirkt günstig auf die lufthygienischen und klimatischen Eigenschaften dieser Bereiche. Die Belüftung kann während austauscharmer Wetterlagen raugkeitsbedingt deutlich herabgesetzt sein. Erhöhte Spurenstoffkonzentrationen treten überwiegend entlang der Hauptverkehrsstraßen auf. Gegenüber dem Umland können im Sommer ungünstige human-biometeorologische Verhältnisse auftreten.

Gartenstadt- / Dorf-Klimatop

Dieser Klimatoptyp bezeichnet den Übergangsbereich zwischen geschlossener Bebauung und städtisch beeinflusstem Freiraum. Während das Gartenstadtklimatop entsprechende Siedlungsbereiche innerhalb des zusammenhängend bebauten Stadtkörpers bezeichnet, umfasst das Dorfklimatop die Siedlungsstrukturen außerhalb. Es überwiegen Einzel- und Reihenhäuser mit hohem Gartenanteil. Eine Überwärmung gegenüber dem Umland tritt

nur gelegentlich und abgeschwächt auf. Infolge der spezifischen Bebauungs- und Vegetationsstrukturen sind die Belüftungsverhältnisse stellenweise ungünstig. In diesem Zusammenhang kann auch die human-biometeorologische sommerliche Wärmebelastung gegenüber dem Umland zeitweilig höher ausfallen. Erhöhte Konzentrationen Kfz-bürtiger Spurenstoffe treten entlang von Hauptstraßen auf.

Grünanlagen-Klimatop

Grünanlagen wie Parks, Kleingärten und Friedhöfe bilden diesen innerstädtischen Klimatotyp. Je nach Flächengröße sowie Dichte und Höhe der Vegetation hebt sich das Grünanlagen-Klimatop durch niedrigere Lufttemperaturen von der Umgebung ab. Die human-biometeorologischen Verhältnisse fallen meist günstig aus. Fernwirkungen auf die bebauten Umgebung stellen sich in Abhängigkeit von Flächengröße und Randstrukturen ein. Immissionsbelastungen können bei ungünstigen Austauschverhältnissen aus Einträgen Kfz-bürtiger Spurenstoffe oder benachbarten emittierenden Flächennutzungen resultieren.

Wald-Klimatop

Das Wald-Klimatop wird überwiegend durch Laub- oder Nadelwald mit geschlossenem Kronendach bestimmt. Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse ist der obere Kronenbereich, so dass sich im Stammraum ein eigenes Bestandsklima ausbildet. Dieses unterscheidet sich von dem des Freilandes durch gedämpfte Tagesgänge der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sowie durch verminderte Windgeschwindigkeiten und eine geringe human-biometeorologische Wärmebelastung. Wegen des dichten Baumbestandes und der damit ausgeprägten aerodynamischen Rauigkeit sind Waldflächen nicht als Luftleitbahnen geeignet. Wegen ihrer Filterfunktion für gas- und partikelförmige Immissionen weisen sie jedoch eine Bedeutung als Frischluftentstehungsgebiete auf. Bei geschlossenem Kronendach können Wald-Klimatope als Kaltluftproduzenten oberhalb des Kronenbereiches angesehen werden.

Freiland-Klimatop

Dieses ländlich geprägte Klimatop kennzeichnet großräumig zusammenhängende, überwiegend unversiegelte und vornehmlich landwirtschaftlich genutzte Flächen. Geringe nächtliche Lufttemperaturen und günstige Austauschverhältnisse dominieren. Nachts fungieren die entsprechenden Flächen als Kaltluftentstehungsgebiete. Lokal gebildete Kaltluft stagniert oder sammelt sich je nach dem dortigen Relief in Geländesenken an. Aufgrund der Windanfälligkeit der Krefelder Freiland-Klimatope wird am Boden liegende Kaltluft häufig bereits turbulent vermischt. Die Konzentration primärer Kfz-bürtiger Spurenstoffe ist außer entlang stark befahrener Straßen (Autobahnen, Bundesstraßen, Hauptverkehrsstraßen) gering. Die sommerlichen, human-biometeorologisch / thermischen

Verhältnisse sind als günstig zu bezeichnen. Wegen der geringen aerodynamischen Rauigkeit können Freiland-Klimatope in Siedlungsnähe die Funktion von Luftleitbahnen übernehmen.

Gewässer-Klimatop

Größere Wasserkörper zeichnen dieses Klimatop durch ihre thermische Trägheit und einen geringen Reibungswiderstand gegenüber Luftströmungen aus. Daraus resultiert ein überwiegend ausgeglichenes Klima mit geringen tageszeitlichen Amplituden der Lufttemperaturen und erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit. In Abhängigkeit von ihrer Größe stellen Gewässer überdies eine Senke für atmosphärische Spurenstoffe dar und tragen damit zur Verbesserung der Luftqualität bei. Wegen ihrer geringen aerodynamischen Rauigkeit können sie die Funktion einer Luftleitbahn übernehmen (KUTTLER 1991).

5.1.2 Klimatische Funktionen

Über die Klimatopeigenschaften hinaus weisen verschiedene Flächen besondere klimatische Funktionen auf, die vor Ort Einfluss auf Klima und Luftqualität haben können. Ferner modifizieren sie im Falle einer Fernwirkung die klimatischen und lufthygienischen Eigenschaften ihrer entsprechenden Wirkgebiete. Unter besonderer Berücksichtigung der Sonderuntersuchungsgebiete werden in der Synthetischen Klimafunktionskarte folgende Klimafunktionen durch Signaturen dargestellt:

Kaltluftentstehungsgebiete

Wenn durch das Vorherrschen weitgehend unversiegelter Flächen (z.B. Äcker, Wiesen, Brachflächen) ausstrahlungsbedingt eine starke nächtliche Abkühlung erfolgt, bilden sich im Vergleich zu den bebauten Stadtbereichen bodennah kühlere Luftschichten aus (Kaltluft). Über geeignete Luftleitbahnen kann diese Kaltluft bei Abkopplung bodennaher Strömungsverhältnisse vom übergeordneten Strömungsregime in die wärmeren Siedlungsbereiche geführt werden und dort zur Senkung der Lufttemperatur beitragen. Bei guter Luftqualität verbessert die zugeführte Kaltluft außerdem die lufthygienische Situation in den Wirkgebieten.

Dargestellt werden Kaltluftproduktionsflächen mit Relevanz für das thermische und/oder lufthygienische Niveau der urban geprägten Bereiche. Gekennzeichnet werden darüber hinaus windanfällige Flächen, über denen sich ausstrahlungsbedingt Kaltluft bildet, die weitgehend unbeeinflusste Anströmung des übergeordneten Windes diese jedoch bodennah durchmischt. Dadurch erfolgt großräumig lediglich eine geringe Abkühlung, wodurch den Flächen nur eine leichte thermische, jedoch eine lufthygienisch positive Bedeutung zukommt. Diesen stehen die weniger windanfälligen Flächen gegenüber, bei

denen es zu größeren Mächtigkeiten der lokalen Kaltluft kommt, so dass sowohl thermische als auch lufthygienische positive Effekte zu erwarten sind.

Als Kaltluftsammlgebiete werden Geländesenken bezeichnet, in denen lokal produzierte Kaltluft mit der Folge eines Kaltluftstaus akkumuliert. Hier kommt es bevorzugt zu Bodeninversionen. Emittierende Nutzungen können die Luftqualität während Inversionslagen innerhalb dieser Bereiche beeinträchtigen. Im Winter besteht ferner verstärkte Frostgefahr, so dass ein erhöhter Heizenergieverbrauch zu konstatieren ist.

Ventilationsbahnen

Bei breitem Querschnitt und geringen Reibungswiderständen (nach MAYER et al. 1994 Verhältnis Länge zu Breite von Luftleitbahnen mindestens 20:1, Rauigkeitslänge $z_0 \leq 0,5$ m) kann Luft entlang von Be- und Entlüftungsschneisen auch während austauscharmer Wetterlagen strömen. Dabei kann der Antrieb der Luftbewegung sowohl durch die übergeordnete Windrichtung, durch Temperaturgegensätze und, im Fall von Kaltluftabflüssen, auch gravitativ erfolgen. Im Krefelder Untersuchungsgebiet wurden Kaltluftbahnen durch Tracereexperimente nachgewiesen sowie durch Analogieschlussbetrachtung bestimmt. Je nach der Emissionssituation und den thermischen Eigenschaften im Herkunftsgebiet der transportierten Luft ist deren lufthygienisches und thermisches Niveau unterschiedlich.

Filterfunktion / Frischluftproduktion: Ausgedehnte Wald- und Forstflächen sind wegen ihrer ausgeprägten aerodynamischen Rauigkeit und ihrer großen Blattoberfläche besonders effektive Depositionsräume atmosphärischer Spurenstoffe. Insbesondere die Luftqualität von Gebieten in Lee dieser Flächen wird dadurch positiv beeinflusst.

5.1.3 Lufthygienische Funktionen

Der in Kapitel 4.8.2 erläuterte Luftqualitätsindex gibt die während der mobilen Messungen erfassten Spurenstoffaufkommen kategorisiert in einer vierstufigen Farbskala an. Die Darstellungen basieren auf den verkehrsbürtigen primären Spurenstoffen Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoffmonoxid (NO) und auf dessen Folgestoff Stickstoffdioxid (NO₂). Streckenabschnitte, entlang derer keine mobilen Messungen erfolgten, die aber aufgrund eines erhöhten Verkehrsaufkommens bzw. kompakter Randstrukturen auffällige Spurenstoffkonzentrationen erwarten lassen, sind ebenfalls gekennzeichnet.

5.2 Planungshinweiskarte

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen der Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefeld sowie der darauf gründenden Synthetischen Klimafunktionskarte wurde die Planungshinweiskarte im Maßstab 1:20.000 für die Stadt Krefeld erstellt. Es werden Ungunst- und Ausgleichsräume sowie Übergangsbereiche flächig abgegrenzt und klimarelevante Hinweise für die Stadtplanung gegeben. Punktsignaturen kennzeichnen spezielle Funktionsräume und die für solche Bereiche ausgesprochenen Planungsempfehlungen.

Lasträume als üblicherweise extremer Flächenstatus in den von der Abteilung für Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie der Universität Essen erstellten Planungshinweiskarten wurden aufgrund des vorgefundenen Gartenstadtcharakters für Krefeld nicht ausgewiesen.

Stadtklimatische und lufthygienische Ungunsträume werden hier als Bereiche definiert, die aufgrund verdichteter Bebauung, erhöhten Verkehrsaufkommens und/oder industrie- und gewerbebürtiger Immissionen bei gleichzeitig eingeschränkten Austauschverhältnissen sowohl thermische als auch lufthygienische Problembereiche darstellen.

Klimatisch-lufthygienische Ausgleichsräume sind demgegenüber weitgehend frei von Bebauung und weitgehend emissionsarm. Hierzu zählen u.a. Wald-, Forst- und landwirtschaftliche Flächen, Parkanlagen, Kleingärten, Brachflächen sowie größere Gewässer. Das Überwiegen unversiegelter Oberflächen und ein geringes Verkehrsaufkommen begünstigen diese Bereiche hinsichtlich des thermischen und lufthygienischen Wirkungskomplexes. Speziell im Fall von Flächen geringer aerodynamischer Rauigkeit, d.h. mit großflächig nur niedrig wachsender Vegetation oder mit Wasserflächen, ist die Belüftungssituation günstig.

Übergangsbereiche lassen sich weder eindeutig den Ungunsträumen mit überwiegend negativen noch den Ausgleichsräumen mit überwiegend positiven stadtklimatisch und lufthygienischen Eigenschaften zuordnen. Bereits negative klimatische Verhältnisse sollten hier durch entsprechende Planung minimiert und positive klimatische Verhältnisse erhalten bzw. gefördert werden. Diesen Räumen kommt eine besondere Planungsrelevanz zu.

Im Krefelder Stadtgebiet umfassen die stadtklimatischen bzw. lufthygienischen Ungunsträume die Bereiche der Innenstadt und Uerdingens sowie die größeren Gewerbegebiete. Zur Verbesserung der stadtklimatischen Situation sollte dort der bestehende Grün- und Freiflächenanteil erhöht und weitere Verdichtung durch Bebauung vermieden werden.

Dach- und Fassadenbegrünungen können hier der Überwärmung durch lokale Schaffung eines ausgeglichenen Lufttemperatur- und Luftfeuchtehaushaltes entgegenwirken, ebenso wie Entsiegelungsmaßnahmen, z.B. in Innenhöfen großflächiger Blockrandbebauung. Grünflächen, Fassaden- und Dachbegrünungen verbessern darüber hinaus die lufthygienische Situation aufgrund ihrer Filterwirkung, wodurch sowohl die Staubfraktion als auch gasförmige Emissionen gebunden werden können. Entlang stark befahrener Straßen sollten, sofern nicht vorhanden, Immissionsschutzpflanzungen eingebracht werden. Das Verkehrsaufkommen innerhalb der Ungunsträume sollte nicht weiter zunehmen. Entlang verkehrsreicher Straßen mit dichten Randstrukturen ist eine Auflockerung dieser den Luftaustausch behindernden Bebauungsriegel empfehlenswert, um die Akkumulation Kfz-bürtiger Spurenstoffe zu vermindern. Bei austauscharmen Wetterlagen mit Wind aus östlichen und südöstlichen Richtungen ist bei Erweiterungen der im Osten der Stadt gelegenen Industrie- und Gewerbegebiete je nach Emissionssituation mit einer Verminderung der Luftqualität in den in Lee gelegenen Gebieten, d.h. dem Hauptsiedlungsbereich des Krefelder Stadtgebietes, auszugehen. Deshalb sollten dort nach Möglichkeit emissionsarme Betriebe angesiedelt werden bzw. die westlichen Seiten der entsprechenden Flächen mit Immissionsschutzpflanzungen versehen werden. Da es grundsätzlich durch eine Zunahme der Bebauung zu einer Verminderung der Durchmischung mit einem erhöhten Anteil zu erwartender Schwachwindstunden kommt, sollte der Stadtkörper wenn nötig, nur so erweitert werden, dass Belüftungsschneisen in Richtung des Stadtkörpers erhalten bleiben. Diese sollten mit niedrig wachsender Vegetation versehen sein und sich durch eine möglichst große Länge und Breite auszeichnen.

Als Übergangsbereiche mit positiven und negativen klimatisch-lufthygienischen Eigenschaften sind weiträumig die Siedlungsbereiche um die Krefelder Innenstadt anzusehen, in denen zwar häufig eine aufgelockerte Bauweise vorherrscht, es in Abhängigkeit von Baukörperanordnung und Vegetationsstruktur jedoch zu eingeschränkten Belüftungsverhältnissen kommen kann. Vor allem entlang von Hauptstraßen ergibt sich dadurch eine nachteilige lufthygienische Situation. In diesen Bereichen sollte zur Wahrung eines ausgeglichenen Stadtklimas mit nur geringer sommerlicher Wärmebelastung keine weitere Verdichtung durch Bebauung erfolgen, eine Zunahme der Versiegelung sollte vermieden und Grünflächen sollten zu einem zusammenhängenden Netz erweitert werden.

Das stadtklimatisch und lufthygienisch günstige Potential der Ausgleichsräume im Krefelder Stadtgebiet sollte prinzipiell erhalten bleiben. Dort sind Baumaßnahmen möglichst zu vermeiden. Unvermeidbare Vorhaben im Bereich dieser Ausgleichsräume sollten mit höchstens minimaler Versiegelung einhergehen. Straßenerweiterungen und eine Zunahme des Verkehrsaufkommens sollten nicht zugelassen werden. Gerade das

unbebaute Umland in südöstlicher Richtung des Stadtzentrums wirkt während austauschschwacher Wetterlagen sowohl klimatisch als auch lufthygienisch günstig auf den Stadtkörper ein. Eine Erweiterung der bestehenden Waldflächen ist positiv einzustufen, solange diese nicht zu einem geschlossenen Riegel vereint werden. Es wird empfohlen, die Wald- und Forstbereiche im Norden des Stadtgebietes wegen ihrer klimatischen Ausgleichswirkung und ihrer Filterwirkung flächendeckend zu erweitern. Ausgedehnte Waldflächen beeinträchtigen dort nicht den Luftaustausch mit dem Stadtkörper und haben Bedeutung als großräumige Frischluftentstehungsgebiete. Eine Zunahme des innerstädtischen Grünflächenanteils kann das Klima und die Luftqualität kleinräumig günstig beeinflussen. Bei Neuanlage, Erweiterung oder Vernetzung von Grünanlagen sollte ein ausgewogenes Verhältnis zwischen niedriger und hoher Vegetation beachtet werden, um den Luftaustausch mit der bebauten Umgebung nicht zu beeinträchtigen. Einfassungen wie hohe Mauern oder dichte Gebüsche sind zu vermeiden.

6 Bereiche mit besonderer Planungsrelevanz

Im Folgenden werden Planungshinweise für die vier von der Stadt Krefeld benannten Plangebiete dargestellt sowie weitere, nach Ende des Messzeitraums übermittelte Fragestellungen im Zusammenhang mit der Neuaufstellung des Flächennutzungsplans erörtert. Dabei werden die in der Planungshinweiskarte gegebenen, maßstabsbedingt räumlich gröber auflösenden Empfehlungen präzisiert und begründet.

6.1 Plangebiete

6.1.1 Verberg

Der südöstlich des Ortsteils Verberg gelegene Freiraum, für den eine Walderweiterung sowie eventuell eine Erweiterung der Bebauung an der Zwingenbergstraße (vgl. Kap. 2.3) geplant ist, ist nach EMONDS (1981) Teil einer etwa in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Ventilationsbahn. Sie nimmt ihren Ausgang im Umland von Traar und verzweigt sich im Bereich des Plangebietes, um Umlandluft über einen westlichen (etwa parallel zur Straße „Rott“) und einen östlichen Ast (etwa über das Gelände des Badezentrums) in das bebaute Gebiet des Stadtteiles Bockum zu führen.

Unter den Rahmenbedingungen einer leichten übergeordneten Anströmung aus Nord konnte diese vermutete Ventilationsbahn durch eine nächtliche Traceruntersuchung nachgewiesen werden (Kap. 4.5.1). Dabei erstreckte sich das Wirkgebiet im Süden bis

zur Berliner Straße und im Osten aufgrund des leichten Gefälles in Richtung Rheinufer bis nach Uerdingen. Der größte Teil des Wirkgebietes ist nach den Ergebnissen der Temperatur- und Lufthygienemessfahrten durch eine nur geringe nächtliche Überwärmung und eher unauffällige atmosphärische Spurenstoffkonzentrationen gekennzeichnet und bedarf damit einer Kalt- oder Frischluftzufuhr nur bedingt. Da dies jedoch zum Teil auf die Wirkung der Ventilationsbahn zurückzuführen sein kann, wäre ihr Schutz aus klimatisch-lufthygienischer Sicht zur Erhaltung des Ist-Zustandes in jedem Falle begrüßenswert.

Die derzeitige Situation zeigt, dass einzelne Gebäude(-gruppen) wie der Giswinkelshof oder das Badezentrum und parkartige Baumbestände wie im Bereich des als Grünzug ausgestalteten westlichen Astes der Ventilationsbahn keine ernsthaften Strömungshindernisse darstellen. Dichte Bebauung oder Bewaldung hingegen kann den bodennahen Transport durchaus empfindlich einschränken. Da die geplante Walderweiterung zusammen mit der vorhandenen Häuserzeile entlang der Zwingenbergstraße einen Riegel stark erhöhter Oberflächenrauigkeit über den gesamten Querschnitt der Ventilationsbahn hinweg darstellen würde, ist von einer Verschlechterung der Belüftungssituation nach Einstellung des geschlossenen hohen Baumbestandes auszugehen. Vorteilhafter wäre daher eine Gestaltung des Geländes als Grünfläche mit nur parkartigem Baumbestand. Dieser könnte dort, wo Wohngebäude in unmittelbarer Nähe der B 509 liegen, in eine etwas dichtere Immissionsschutzpflanzung (soweit nicht schon vorhanden) übergehen. Auf diese Weise könnten die Bäume ihre klimatische und lufthygienische Wohlfahrtswirkung entfalten, ohne die bodennahe Strömung völlig zu unterbinden.

Sollten weitere Gebäude im Plangebiet errichtet werden, so sollte dies nach Möglichkeit nicht zu einer Verdichtung oder Verbreiterung der Häuserzeile entlang der Zwingenbergstraße führen. Eher unproblematisch wären Einzelgebäude in großen Abständen oder Gebäudezeilen in Nord-Süd-Ausrichtung, z.B. entlang der Werner-Voß-Straße.

6.1.2 Fischeln Ost

Entlang der den derzeitigen Ostrand Fischelns bildenden Bahnlinie war zwischenzeitlich ein längliches, in Nord-Nordwest-Süd-Südost-Richtung verlaufendes, im derzeitigen FNP-ENTWURF (2002) nicht enthaltenes Wohngebiet vorgesehen (vgl. Kap. 2.3). Das Gebiet trägt derzeit überwiegend Freilandcharakter, enthält aber auch Einzelgebäude, Weiler und Kleingartenanlagen. Den Ostrand sollte eine im FNP-ENTWURF (2002) enthaltene Umgehungsstraße bilden. Nach EMONDS (1981) nimmt östlich von Fischeln eine bis in das westliche Stadtzentrum Krefelds reichende Ventilationsbahn ihren Ausgang.

Da diese durch das nach Norden verjüngte Wohngebiet nur an ihrem westlichen Rand beeinträchtigt würde, wurde im Rahmen der Tracerausbreitungskampagne zum Plangebiet Fischeln Ost (vgl. Kap. 4.5.2) vorrangig eine mögliche Klimafunktion des Geländes als Kaltluftlieferant für Fischeln bei nordöstlicher Windkomponente untersucht. Diese Funktion besteht offensichtlich nicht, da der Geländeanstieg nach Westen eine bodennahe Ostströmung - zumindest ohne stärkeren übergeordneten Antrieb, wie er gemäß den am Ende von Kap. 4.5.2 angestellten Überlegungen nur sehr selten in Verbindung mit kaltluftrelevanten Wetterlagen auftritt - nicht zulässt. Als durchlässig erweist sich die Terrassenkante lediglich südlich des Friedhofes, wo sie von einem etwa in Süd-Südwest-Nord-Nordost-Richtung verlaufendem Bachtal durchbrochen wird. Per Analogieschluss lässt sich vermuten, dass bei Schwachwindlagen mit südlicher Komponente des Windes südlich von Fischeln gebildete Kaltluft durch dieses Tal nach Nord-Nordost abfließt und Anschluss an die oben erwähnte, von EMONDS (1981) vermutete Ventilationsbahn findet.

Aus der geländebedingt geringen klimatischen Relevanz des Plangebietes für das westlich gelegene Fischeln und seiner länglichen Form in Randlage zu einer vermuteten Ventilationsbahn in das westliche Zentrum Krefelds ergibt sich, dass die Errichtung der geplanten Wohnbebauung aus klimatisch-lufthygienischer Sicht prinzipiell möglich ist. Allerdings empfiehlt es sich, das kleine Bachtal, in dem der „Fischelner Dorfgraben“ verläuft, von Bebauung und Emittenten freizuhalten und z.B. als Grünfläche zu gestalten. Idealerweise würde nur der westlich des „Fischelner Dorfgrabens“ gelegene Teil des Wohngebietes realisiert, um das Einzugsgebiet der von EMONDS (1981) vermuteten Ventilationsbahn nicht unnötig zu verkleinern.

6.1.3 Fischeln West

Das Plangebiet Fischeln West mit Erweiterung der Wohnbebauung am westlichen und südlichen Ortsrand von Fischeln ist Teil einer umfangreichen Änderung der Flächennutzungsplanung gegenüber FNP (2001) westlich von Fischeln, die außerdem eine Ausweitung der Gewerbe- und Industriegebiete rund um diesen Teil Fischelns unter Einhaltung eines Freiflächenstreifens zwischen Gewerbe- und Wohnnutzung sowie eine Umwidmung der im Norden gelegenen Landwirtschaftsflächen in Grünareale einschließt (vgl. auch Kap. 2.3).

Die in Kap. 4.5.3 beschriebenen Ergebnisse der Tracerausbreitungskampagne im Bereich um den „Pescherhof“, etwa am Westrand der geplanten Wohnbebauung, zeigen, dass in geringem Umfang ein bodennaher Kaltluftfluss nach Norden in den westlichen Teil der Fischelner Wohnbebauung auch entgegen der übergeordneten Strömung möglich ist. Neben dem Geländeeinfluss könnte auch der gemäß Temperaturmessfahrt (Kap. 4.2.6)

hier besonders stark ausgeprägte Temperaturgradient der städtischen Wärmeinsel als Auslöser eines Flurwindes beteiligt sein.

Mit Rücksicht auf das Abfließen von Kaltluft aus der Umgebung des Pescherhofes in verschiedene Richtungen bei windschwachen Strahlungswetterlagen und die Möglichkeit eines nach Norden gerichteten Flurwindes ist der im FNP-ENTWURF (2002) vorgesehene Landwirtschafts- bzw. Grünflächenstreifen zwischen der Erweiterung des Wohngebietes im Osten und der Gewerbeflächen im Westen und Süden zu befürworten. Die geplante enge Orientierung der geplanten Neuerrichtungen an den bereits vorhandenen Wohn- und Gewerbeflächen beiderseits der Freifläche dürfte dabei für eine Minimierung schädlicher Einwirkungen sorgen. Allerdings ließe sich diese im Hinblick auf die Durchgängigkeit der Freifläche und die Berücksichtigung des schwachen, aber gemäß den Tracerausbreitungskampagnen nicht wirkungslosen Reliefs aus klimatisch-lufthygienischer Sicht noch geringfügig verbessern. Dies gilt insbesondere für den im Süden entlang der BAB 44 geplanten Gewerbeflächenstreifen. Er schränkt den südlich Fischelns verbleibenden Grünflächenstreifen auf weniger als die Hälfte seiner ursprünglichen Größe ein und bildet im Bereich der Willicher Straße gemeinsam mit der von Norden in die Freifläche hereinragenden geplanten Wohnbebauung eine Engstelle. An seinem Ostende belegt er das Einzugsgebiet des im vorangegangenen Kapitel erwähnten Bachtals, in dem bei geeigneten übergeordneten Windverhältnissen Kaltluft nach Nord-Nordost abfließen kann. Da in derartige Kaltluftabflüsse emittierte Stoffe aufgrund der stabilen Schichtung nur langsam verdünnt werden, sind Emissionen in Richtung bewohntes Gebiet fließenden Kaltluftabflüssen problematisch. Im vorliegenden Fall wäre davon der alte und neue südliche Bebauungsrand Fischelns sowie ggf. das neue Wohngebiet Fischeln Ost bzw. die dort jetzt schon vorhandenen Weiler betroffen.

Aus den vorgenannten Gründen wäre es vorteilhaft, den Gewerbestreifen entlang der BAB 44 insgesamt schmaler auszuführen und im Osten bereits an der Dohmenstraße enden zu lassen. Ist dies nicht möglich, so wird empfohlen, östlich der Dohmenstraße nur solche Industrie- und Gewerbebetriebe anzusiedeln, die frei von Emissionen in geringer Höhe über Grund sind. An dieser Stelle muss betont werden, dass Planungsempfehlungen dieser Art auf Basis einer den Ist-Zustand beschreibenden Klimaanalyse stets nur Wahrscheinlichkeitsaussagen sein können und im Zweifelsfall die sicherere Lösung favorisieren. Ob die beschriebenen Einschränkungen unbedingt notwendig sind, könnte letztlich nur eine Modellierung der Strömungsverhältnisse für den Plan-Zustand zeigen.

Eine zweite, jedoch weniger ausgeprägte Engstelle des geplanten Freilandstreifens liegt unmittelbar südlich der Anrather Straße. Hier wäre zu überlegen, inwieweit die Schneise auf Kosten der geplanten Gewerbebebauung südlich des „Kringshofes“ oder der

geplanten Wohnbebauung auf der gegenüberliegenden Seite der durch den Ist-Zustand vorgegebenen Mindestbreite nördlich der Anrather Straße angeglich werden kann.

Eine weitere Gewerbefläche ist westlich des Plangebietes am Napoleonsweg geplant. Hierzu wurde bereits ein auf Messungen und Strömungsmodellierungen basierendes Gutachten erstellt (KUTTLER et al. 2003).

6.1.4 Hüls Südwest

6.1.4.1 Errichtung eines landwirtschaftlichen Betriebes

Bei der Durchführung und Auswertung der Tracerausbreitungskampagne im Bereich Hüls Südwest wurde auf Wunsch der Stadt Krefeld auch die Frage berücksichtigt, inwieweit ein nördlich der Kreuzung Venloer Straße / Drügstraße geplanter landwirtschaftlicher Betrieb die klimatische Funktion der Fläche beeinträchtigt (vgl. Kap. 2.3). Dazu wurde der SF₆-Emissionspunkt in den Bereich der geplanten Neuerrichtung gelegt (Kap. 4.5.4). Da das Tracergas streng der übergeordneten Strömungsrichtung folgte, konnte aus den Winddaten der nahegelegenen Klimafeststation Hüls Südwest (K6) in Tabelle 12 auf die Häufigkeit der einzelnen Strömungslagen geschlossen werden, bei denen Hüls (Sektor „Süd“), Inrath bzw. Krefeld (Sektor „West“) oder der gering bebaute Bereich zwischen beiden Ortsteilen (Sektor Süd-Südwest) im Einflussbereich des Emissionspunktes liegen. Zu diesen drei Sektoren werden im Folgenden Anhaltspunkte zu der Frage gegeben, inwieweit die Errichtung eines Betriebes am Emissionspunkt das jeweilige Wirkgebiet beeinflussen würden.

Für den gesamten Windrichtungssektor **Süd** (14% der Gesamt-, 5% der Schwachwindlagen) gilt, dass Luft aus dem Bereich des geplanten Landwirtschaftsbetriebes zunächst den geplanten Wohnsiedlungsbereich Hüls Südwest durchströmt. Während von diesem bei den besagten Windrichtungen eine Verringerung der Kalt- und Frischlufteindringtiefe in den bestehenden Hülser Siedlungsbereich durchaus zu erwarten ist, kann die zusätzliche klimatische Wirkung des Gebäudekomplexes aus einer Halle von 80 m x 25 m zuzüglich Wohnbau und Garage (Fax-Mitteilung v. Hr. THIES, Fachbereich Grünflächen der Stadt Krefeld, 6.2.2002) als vernachlässigbar gelten. Anders stellt sich die Situation im Falle einer Spurenstoffemission oder Geruchsentwicklung dar. Hier ist aufgrund der Nähe zum geplanten Siedlungsbereich zu empfehlen, dass der Betrieb nicht wesentlich geruchsintensiver sein sollte als die bereits bestehenden Betriebe an der Drügstraße.

Bei Anströmung aus **Süd-Südwest** (8% der Gesamt-, 2% der Schwachwindlagen) ergäbe sich eine Querschnittsverengung der im Landschaftsplan vorgesehenen, an dieser Stelle etwa 350 m breiten Ventilationsschneise um mindestens 7% (Halle und Zusatzgebäude

parallel zur Drügstraße) und maximal etwa 30% (bei Querausrichtung und Annahme einer Gesamtlänge des Komplexes von 100 m). Zum Vergleich mag der nördlich auf der Westseite der Drügstraße bereits bestehende Loershof dienen, dessen Grundfläche nach dem FNP-ENTWURF (2002) den dortigen Querschnitt um etwa 15% verengt. Weitere Abwägungsfaktoren sind die Besiedlungsdichte in Lee der Freifläche und die laut FNP-ENTWURF (2002) geplante Ver-/Entsorgungsfläche in ihrem Nordteil. Je nach Durchströmungsrichtung der geplanten Freifläche liegt in Lee die nahezu unbesiedelte Engstelle zwischen Hüls und Inrath oder die den Südrand von Hüls bildende Bebauung. Ist eine Ausweitung dieser Bebauung nicht geplant, fehlt folglich ein überwärmtes potentiell wirkgebiet. Die lufthygienische Situation ist im grundwassernahen, unterhalb der Rheinterrassenstufe gelegenen Teil des Wirkgebiets nach EMONDS (1981) potentiell kritisch; allerdings ist, wie aus der Standmessung (Kap. 4.7.2) ersichtlich, die lufthygienische Qualität auch am Emissionspunkt relativ gering. Die Ver-/Entsorgungsfläche würde bei Erhöhung der Oberflächenrauigkeit oder Emission von Schad- bzw. Geruchsstoffen die Funktion der Freifläche als Ventilationsbahn einschränken; die in diesem Abschnitt vorgestellten Überlegungen wären dann irrelevant.

Für den Windrichtungssektor **West** gelten im wesentlichen die bereits für den Sektor Süd angestellten Betrachtungen. Auch hier erscheint der klimatische Einfluss des Betriebes auf die bestehende Wohnbebauung in Inrath und Krefeld vor dem Hintergrund des im Osten und Südosten geplanten Gewerbe- und Industriegebietes vernachlässigbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass erhebliche klimatische Beeinträchtigungen durch die Anlage eines landwirtschaftlichen Betriebes auf der Westseite der Drügstraße nahe deren Kreuzung mit der Venloer Straße nur bei Errichtung quer zur Drügstraße und gleichzeitig geplanter Schließung der Bauengstelle zwischen Hüls und Inrath zu erwarten sind. Olfaktorische Beeinträchtigungen des geplanten Wohnsiedlungsbereiches Hüls Südwest durch den geplanten Betrieb lassen sich hingegen dann nicht ausschließen, wenn dieser Geruchsemissionen verursachen sollte.

6.1.4.2 Geplantes Wohnbaugebiet Hüls Südwest

Für das auf den bisherigen Landwirtschaftsflächen süd-südwestlich von Hüls geplante Wohngebiet gelten zunächst die bereits im vorangegangenen Kapitel angestellten Überlegungen, wobei sich die Wirkgebiete in Abhängigkeit der Windrichtung gegenüber Tabelle 12 leicht verschieben. Bei den dort definierten Windrichtungssektoren Süd und Süd-Südwest liegt Hüls, bei Anströmung aus westlichen Richtungen der nördliche Teil Inraths, bei östlichen Windrichtungen das Freiland in Lee des geplanten Wohngebietes.

Angesichts der Fläche des Wohngebietes ist eine merkliche Verringerung der Eindringtiefe bzw. eine Erwärmung der überströmenden Luft zu erwarten. Allerdings ist aufgrund des Windgeschwindigkeitsniveaus des oberhalb der Terrassenstufe gelegenen Teiles von Hüls hoch und die Überwärmung von Hüls in sommerlichen Strahlungsnächten sehr schwach (vgl. Kap. 4.2.6). Daher scheint das Plangebiet besser als die meisten anderen Randlagen im Krefelder Stadtgebiet zur Aufnahme eines solchen Eingriffs geeignet. Dies ließe sich unterstützen durch eine Bebauungsart, die ähnlich der bisher im Westen von Hüls vorzufindenden Wohnflächen dem Klimatotyp „Dorf / Gartenstadt“ entspricht. Weiterhin scheint die im Nordwesten angrenzende geplante Freifläche geeignet, bei den seltenen austauscharmen Wetterlagen mit südwestlicher Windkomponente zur lufthygienisch wünschenswerten Belüftung des Zentrums von Hüls beizutragen. Um diese Funktion sicherzustellen und die unmittelbar angrenzenden Wohnflächen zu schützen, sollte bei der Ansiedlung von Betrieben im nordwestlich dieser Schneise geplanten Gewerbegebiet auf Emissionsarmut geachtet werden.

6.2 Weitere Gebiete besonderer Planungsrelevanz

In einem Anforderungsprofil (Mitteilung der Stadt Krefeld vom 31.10.2002) wurden allgemeine stadtklimatische Fragestellungen, auf die in den jeweils thematisch verwandten Kapiteln eingegangen wird, und Stadtteile genannt, auf denen ein besonderer Schwerpunkt liegen sollte. Die vier bereits bei Auftragsvergabe vereinbarten Plangebiete wurden in den vorangegangenen Kapiteln behandelt, auf die übrigen vier Stadtteile wird im Folgenden im Rahmen der Interpretationsmöglichkeiten der bereits abgeschlossenen Messungen eingegangen.

Das teilweise bereits bebaute **Wohngebiet Schicksbaum** im Westen von Krefeld wurde von der Strecke der Lufttemperatur- und lufthygienischen Messfahrten berührt. Der Ist-Zustand lässt sich aufgrund der in Karte 2 sowie Karte 7 bis Karte 10 dargestellten Ergebnisse einem vergleichsweise abrupten Übergangsbereich zwischen Stadt und Umland zuordnen. In keinem Fall reicht das Freilandklimatop so nah an die Krefelder Innenstadt wie aus westlichen Richtungen. Daher sollte das Gebiet als potentielle Ventilationsschneise betrachtet werden, auch wenn deren Funktionsfähigkeit starken naturgegebenen Einschränkungen unterworfen ist: Zum Einen liegt sie westlich ihres Wirkgebietes und damit in einer Richtung, aus der die übergeordnete Strömung zwar insgesamt häufig, bei austauscharmen Wetterlagen aber nur selten kommt. Zum anderen liegt das östliche Ende der Schneise im Bereich einer schwach ausgebildeten Kuppe, die bei Schwachwindlagen als erhebliches Hindernis wirken dürfte. Während der lufthygienischen Messfahrten zeigten die quer durch die potentielle Schneise führenden

Streckenabschnitte überwiegend geringe, zu einem Messtermin jedoch sehr hohe Konzentrationen der primären Spurenstoffe NO und CO. Diese könnten auf Bautätigkeit bzw. den damit verbundenen Verkehr im Wohngebiet Schicksbaum zurückzuführen sein und dürften somit keine allgemeine Aussagekraft aufweisen.

Im Sinne eines Erhalts der Breite der Schneise wäre zu erwägen, ob am Nordrand des Wohngebietes, nördlich der bereits realisierten Bebauung zwischen Ortmannsheide und Am Schicksbaum, die Beplanung als Wohnbaufläche noch mit vertretbarem Aufwand rückgängig zu machen ist. Gegen den südlich der vorhandenen Bebauung gelegenen Teil bestehen hingegen keine Bedenken. Er wurde aufgrund der noch fehlenden Vegetation in der synthetischen Klimafunktionskarte dem Stadt-Klimatop zugeordnet, kann aber im Endzustand teilweise dem Gartenstadt-/Dorf-Klimatop entsprechen.

Hinsichtlich der Gestaltung der Grünflächen nordöstlich des Wohngebietes wäre zu erwägen, ob die Erweiterung des Waldes rund um die Wassergewinnungsanlagen in ihrer südlichen Hälfte aus Sicht des Wasser- oder Landschaftsschutzes notwendig ist. Ansonsten wären hier aus stadtklimatologischer Sicht, ähnlich wie für das Plangebiet Verberg empfohlen, Grünflächen oder nur lockere, parkartige Baumbestände sinnvoller. Ein schmaler Streifen dichter Immissionsschutzbepflanzung entlang der Straße "Horkesgath" sollte hingegen in Kauf genommen werden, da anhand der vorliegenden Messergebnisse nicht völlig sichergestellt werden kann, dass es sich bei den oben erwähnten hohen Spurenstoffkonzentrationen um eine Ausnahme handelt.

Die **Grün- und Waldflächen, Naherholungs- und Landschaftsschutzgebiete im Norden, Westen und Südosten des Stadtgebietes** sind aus klimatisch-lufthygienischer Sicht grundsätzlich zu begrüßen, da sie als Herkunftsräume für Kalt- und Frischluft, die Wälder darüber hinaus als Filter, den stark anthropogenen Ungunsträumen im Zentrum und am Rhein gegenüberstehen. Ihre Relevanz für deren Belüftung hängt im Einzelnen von Relieflage und Windrichtung ab. Aus großräumigen flachen Mulden wie dem Hülser Bruch, für den eine starke strahlungsnightliche Abkühlung nachgewiesen wurde, oder dem Latumer Bruch, für den sie ebenfalls vermutet wird, kann die Kaltluft nicht selbständig in höhergelegenes bebautes Gebiet vordringen. Auch bei einem übergeordneten Windantrieb ist ein Einfluss auf benachbarte Flächen nur in Richtung eines schwachen Geländeanstiegs möglich, so aus dem Hülser Bruch in Richtung Südost oder aus dem Latumer Bruch in Richtung Nord (Linn). Dennoch sollten diese Kaltluft-sammelräume vor Emissionen geschützt werden, da sich hier andernfalls Spurenstoffe auf Kosten der lokalen Luftqualität in erheblichem Maße ansammeln würden. Aufgrund des geringen Einflusses der vorgenannten Räume auf das Krefelder Zentrum sind die höhergelegenen Freiräume im Westen trotz ihrer geringeren Abkühlung ebenfalls wichtige

Ausgleichsräume. Allerdings stellt sich hier das Problem des bei austauscharmen Wetterlagen meist entgegengesetzten Windes aus östlichen Richtungen. Im Osten und Nordosten des Stadtgebietes, wo sowohl aufgrund der häufig mit diesen Windrichtungen verbundenen austauscharmen Wetterlagen als auch aufgrund des in dieser Richtung gelegenen Ruhrgebietes Freiflächen besonders wünschenswert wären, stehen sie nicht zur Verfügung. Allerdings haben sich die Industrieemissionen des Ruhrgebietes in den letzten Jahrzehnten erheblich verringert. Davon hat Krefeld im Allgemeinen und der Norden des Stadtgebietes im Besonderen profitiert, so dass die Ausweisung dieses Raumes als (Hoch)-Belastungsraum durch EMONDS (1981) relativiert werden kann.

Die **regelmäßige, rechtwinklige Stadt- und Straßenstruktur** im Krefelder Zentrum wirkt sich auf die lufthygienische Situation grundsätzlich negativ aus, da sich für potentielle Ventilationsströmungen die Möglichkeit vermindert, der übergeordneten Windrichtung oder der Geländeform zu folgen. Allerdings erhöht sich zugleich deren Durchgängigkeit, da Straßen keine abrupte Richtungsänderungen oder blinde Enden aufweisen. Von Nachteil ist wiederum, dass alle potentiellen Ventilationsbahnen Straßen sind und linienhafte emissionsquellenfreie Grünzüge in der Innenstadt fehlen. Entscheidend ist letztlich die Dichte der Bebauung: Dort, wo die Straßen breit sind oder größere Lücken zwischen den Gebäuden bestehen wie im Bereich der Station Innenstadt (K5) am Polizeipräsidium, wird das Windfeld zwar kanalisiert und die Schwachwindhäufigkeit stark erhöht. Windstillen treten jedoch seltener auf als beispielsweise an den Gartenstadtstationen Lindental und Stadtwald, wie in Kap. 4.4 gezeigt wurde. Dementsprechend fielen die Spurenstoffkonzentrationen während der lufthygienischen 24 h-Standmessung an diesem Standort nicht eindeutig höher aus als an anderen, exponierter gelegenen Standorten. Ungünstigere Verhältnisse sind einerseits, wie die lufthygienischen Messfahrten zeigen, entlang stark befahrener Straßen (Friedrichsplatz, Ostwall), andererseits in den im Innenstadtgebiet weit verbreiteten Bereichen dichter Bebauung in einheitlicher Höhe und enger dazwischenliegender Straßen zu erwarten. Es ist daher aus lufthygienischer Sicht empfehlenswert, beide Ungunstfaktoren nicht zusammentreffen zu lassen, sondern den Verkehr um die engen Straßen herumzuleiten. Dies ist in der Krefelder Innenstadt bereits zu einem Großteil realisiert; das in VEP (1991) ausgesprochene Ziel einer Verkehrsbeschränkung insbesondere innerhalb der „vier Wälle“, aber auch in den umliegenden Wohngebieten, ist in diesem Sinne zu begrüßen. Ein Gegenbeispiel stellt die im Verhältnis zu ihrer Breite noch recht stark genutzte Sternstraße nördlich des Friedrichsplatzes dar.

Die stadtklimatische Bedeutung der **Grünzüge im Bereich Rott-Engerstraße, Wilhelmshof-Stadtwald und der Friedhofsanlagen südwestlich des Krefelder Zentrums**

lässt sich in die allgemein für innerstädtische Grünflächen gültigen Wirkungen unterteilen. In diesem Zusammenhang sind eine lokale Absenkung der Lufttemperatur während sommerlicher Strahlungsächte und mögliche spezifische Luftleitbahnfunktionen aufgrund der Form und Lage der Flächen zu nennen. Im Falle des Grünzuges Rott-Engerstraße wurde eine solche Leitbahnfunktion im Rahmen der Traceruntersuchung zum Plangebiet Verberg nachgewiesen. Bei den beiden übrigen Flächen ist von einer geringeren Leitbahnfunktion auszugehen, da ihre Verbindung zum Umland durch Engstellen gestört wird. Im Falle des Grünzuges Wilhelmshof-Stadtwald ist dies die Wilhelmshofallee nordöstlich der Einmündung „Am Busch“, im Falle der Friedhofsanlagen die Bebauung an der Gladbacher Straße zwischen Südpark und Hauptfriedhof. Letztere sind wegen ihrer großen Fläche dennoch von Bedeutung. Einzelne lückige Bebauung innerhalb dieser Fläche wird wegen ihres geringen Kontrastes zur ohnehin vergleichsweise hohen Oberflächenrauigkeit des Friedhofsgeländes jedoch nicht als Strömungshindernis gewertet. Hier ist bei gewünschtem Erhalt der Ventilationsfunktion primär auf einen Erhalt der Gesamtfläche in ihrer ausgeprägten Breite zu achten, einzelne Hindernisse oder randliche Veränderungen sind von minderer Bedeutung. Im Falle der Wilhelmshofallee zeigt sich immerhin ein erheblicher Kanalisierungseffekt im Sinne der Grünfläche in den Windrichtungsdaten der Station Stadtwald (K8).

7 Zusammenfassung

Die Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie, Fachbereich 9 der Universität Essen wurde mit Auftrag vom 8.12./14.12.2000 sowie 26.6./11.6.2001 vom Fachbereich Umwelt und dem Fachbereich Stadtplanung und Bauaufsicht der Stadt Krefeld mit stadtklimatologischen und lufthygienischen Messungen beauftragt, um die Ergebnisse in einer Gesamtstädtischen Klimaanalyse Krefelds darzustellen. Dies erfolgte mit acht Klimafeststationen sowie mehreren Temperatur- und lufthygienischen Messfahrten, 24 Stunden-Standmessungen sowie Tracerausbreitungsuntersuchungen innerhalb von vier Planungsgebieten im Zeitraum 1.11.2001 bis 31.10.2002. Basierend auf den Ergebnissen dieser Messungen sowie auf der Krefelder Flächennutzung und Geländeform wurden eine **Synthetische Klimafunktionskarte** sowie eine **Planungshinweiskarte** im Maßstab 1:20.000 erstellt.

Die Ergebnisse der stationären und mobilen Messungen belegen den Einfluss der Bebauung auf die Temperatur- und Windverhältnisse im Krefelder Stadtgebiet:

Bezüglich der **Lufttemperaturverhältnisse** (Kapitel 4.2.1) zeigt die Innenstadt aufgrund von Messfahrt- und Stationsdaten die deutlichste Überwärmung mit einem absoluten Maximum in Sommernächten von 4,8 K gegenüber dem Umland. Einen zweiten, jedoch weniger stark ausgebildeten Bereich urbaner Überwärmung bildet der östliche, rheinnah gelegene Teil der Stadt mit ebenfalls höherer Verdichtung und einem hohen Anteil an Industrie und Gewerbe (Uerdingen). Keine oder nur geringe nächtliche urbane Überwärmungen weisen die Stadtteile Hüls, Traar, Verberg, Elfrath, Gartenstadt und Forstwald auf. Nördlich des Hülser Bruches (entlang der östlichen Seite der Rheinterassenkante) kann es verstärkt zu Kaltluftansammlungen kommen. Insgesamt weisen große Teile der Siedlungsbereiche im Krefelder Stadtgebiet einen Gartenstadtcharakter mit nur geringem urbanen Einfluss auf das Klima auf.

Die **Windrichtung** (Kapitel 4.4.2) wird insbesondere innerhalb der Stadt im Vergleich zur übergeordneten Windrichtung aus südwestlichen Richtungen, repräsentiert durch Station Fischeln (K3) und Hüls Südwest (K6), verschieden modifiziert. Die Anzahl der Schwachwindstunden, d.h. die Anzahl der Stunden mit **Windgeschwindigkeiten** $\leq 1,5 \text{ m s}^{-1}$ (Kapitel 4.4.4), steigt an der Feststationen Innenstadt (K5) bzw. an den Feststationen Lindental (K4) und Stadtwald (K8) innerhalb aufgelockerter Wohnbebauung auf 79 % bzw. 72 % und 77 % an, während es sich an den Umlandstationen nur bei 29 % (Fischeln, K3) und 35 % (Hüls Südwest K6) der Jahresstunden um Schwachwinde handelt.

Die Bestimmung der sommerlichen **Wärmebelastung des Menschen** erfolgte für die Stationsstandorte anhand des PMV-Wertes, der mit Hilfe des Modells RayMan Vers.1.2 (MATZARAKIS et al. 2000) ermittelt wurde (Kapitel 4.6). Die höchste sommerliche Wärmebelastung tritt demnach an der Station Innenstadt (K5) auf, gefolgt von Uerdingen (K1). Die Umlandstandorte weisen die geringste sommerliche Wärmebelastung mit um fast 0,5 PMV-Einheiten ($PMV_{\text{mittl. max}} = 1,6$) geringeren Werten auf.

Die klimatologischen Ergebnisse der Stationsmessungen werden anhand eines dreigliedrigen Schemas bewertet (Kapitel 4.8.1).

Die **lufthygienische Situation** wurde auf Grundlage eines einjährigen NO_2 -Passivsammler-Messnetzes (Kapitel 4.7.1), vier 24stündigen Standmessungen (Kapitel 4.7.2) und drei lufthygienischen Messfahrten (Kapitel 4.7.3) für die Spurenstoffe CO , NO , NO_2 und O_3 sowie $BETX$ erfasst. Generell ist von einer unter den aktuellen Grenzwerten (22. BImSchV 2002) liegenden lufthygienischen Situation auszugehen. Autobahnen, Bundesstraßen und stark befahrene Hauptverkehrsstraßen weisen die höchsten Spurenstoffkonzentrationen auf, wobei insbesondere entlang der BAB 44, BAB 57, sowie der B 288 (Berliner Straße) in Rheinnähe sowie im Bereich der Innenstadt erhöhte Spurenstoffkonzentrationen gemessen wurden. Die lufthygienischen Messfahrten im nicht bebauten Umland (z.B. im Bereich Hülser Bruch / Hülser Berg) lassen auf streckenweise erhöhte Ozonwerte schließen. Die an den Feststationen erfassten NO_2 -Mittelwerte liegen im Stadtkern- und gewerbenahen Bereich etwa 30 % über denen des Umlandes, in dessen Größenordnungen sich auch die reinen Wohngebiete wiederfinden.

Basierend auf den Ergebnissen der stationären und mobilen Messungen sowie den Inhalten der **Synthetischen Klimafunktionskarte** gibt die **Planungshinweiskarte** Empfehlungen zur Berücksichtigung lufthygienischer und klimatischer Belange (Maßstab 1:20.000).

Für die vier **Plangebiete** Verberg, Fischeln Ost, Fischeln West und Hüls Südwest wurde die Relevanz ihrer Belüftungsfunktion für entsprechende Wirkgebiete untersucht und dargestellt. Dabei konnte in einem Fall (Plangebiet Verberg) eine deutliche und in einem weiteren Fall (Plangebiet Fischeln West) eine geringfügige Belüftungsfunktion festgestellt werden. Die klimatische Relevanz der Plangebiete Fischeln Ost und Hüls für die angrenzende bestehende Bebauung ist demgegenüber nur schwach ausgeprägt. Planungsempfehlungen zur Minimierung ungünstiger klimatischer Einflüsse werden für alle vier Gebiete ausgesprochen.

8 Literaturverzeichnis

BauGB (1997): Baugesetzbuch in der Fassung vom 27.8.1997, zuletzt geändert am 23.7.2002 (BGBl. 1 1997, S. 2141, ber. BGBl. 1 1998, S. 137, zul. geänd. BGBl. 1 2002, S. 2850)

BARLAG, A.-B. (1993): Planungsrelevante Klimaanalyse einer Industriestadt in Tallage, dargestellt am Beispiel der Stadt Stollberg (Rhd.) – Essener Ökologische Schriften, 1, Westarp Wissenschaften, Essen, 185 S. mit 3 Karten.

BAUMBACH, G. (1994): Luftreinhaltung. – 3. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 461 S.

BERLINER WETTERKARTE e.V. (2002) (Hrsg.): Berliner Wetterkarte, Wetterlage über Mitteleuropa um 13:00 MEZ am 30.9.02 und 1.10.02 sowie Bodenwetterkarte Europa von 01:00 MEZ am 1.10.02

DANZEISEN, H. (1983): Experimentelle Untersuchung bodennaher Lufttemperatur- und Feuchteverteilungen in Stadtgebieten mit Hilfe eines Meßwagens. – In: Beiträge Landschaftspflege Rheinland-Pfalz 9, S. 7-34

DEUTSCHER WETTERDIENST (2001/2002): Witterungsreport express 10/2001 – 11/2002

DÜTEMEYER, D. (2000): Urban-orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns. – Essener Ökologische Schriften, 12, Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben, 171 S.

EMONDS, H. (1981): Klimatisch-lufthygienischer Fachbeitrag zum Grünordnungsplan der Stadt Krefeld. Herausgegeben durch den Oberstadtdirektor der Stadt Krefeld, Planungsamt.

FANGER, P.O. (1972): Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering. – Mc Graw Hill, New York, 244 S.

FNP (2001): Flächennutzungsplan der Stadt Krefeld, Stand 15.2.2001

FNP-ENTWURF (2002): Entwurf des Flächennutzungsplanes der Stadt Krefeld, Stand: Frühzeitige Bürgerbeteiligung

GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P.C. (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881 - 1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky. – 5. Auflage, Postdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, 138 S.

HUPFER, P.; KUTTLER, W. (Hrsg, 1998): Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. – 10. Auflage, Teubner, Stuttgart, Leipzig, 413 S.

HÖSCHELE, K., SCHMIDT, H. (1974): Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung. – Landscape and Urban Planning, 6, S. 334-337

KUTTLER, W. (1991): Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer. – In: SCHUHMACHER H., THIESMEIER, B. (Hrsg.) Urbane Gewässer, Westarp Wissenschaften, Essen, 476 S.

KUTTLER, W. (1993): Planungsorientierte Stadtklimatologie. Aufgaben, Methoden, Fallbeispiele. – In: Geographische Rundschau 45, S. 226-233

KUTTLER, W. (1998): Stadtklima. In: SUKOPP, H., WITTIG, R. (Hrsg.): Stadtökologie. Ein Fachbuch für Studium und Praxis. – 2. überarb. und erw. Auflage, Fischer Verlag, Stuttgart, 474 S.

KUTTLER, W.; ZMARSLY, E. (1995): Sommersmog: Zur Problematik aus naturwissenschaftlicher Sicht. – In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 8, S. 153-159.

KUTTLER, W., KREFT, A., SCHAEFERS, S., BARLAG, A.-B. (2000): Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen. Institut für Ökologie der Universität Essen, Abteilung Angewandte Klimatologie und

Landschaftsökologie. – Abschlussbericht im Auftrag des Umweltamtes der Stadt Gelsenkirchen, unveröffentlicht, 128 S.

KUTTLER, W.; DÜTEMEYER, D.; BARLAG, A.-B. (2001): Stadtklimaanalyse und Luftreinhalteplan (Teil Klima) von Gera. Institut für Ökologie der Universität Essen, Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie. – Abschlussbericht im Auftrag des Stadtplanungsamtes der Stadt Gera und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena, unveröffentlicht, 110 S.

KUTTLER, W., WACKER, T.-D., BARLAG, A.-B. (2002): Gesamtstädtische Klimaanalyse Waltrop. Institut für Ökologie der Universität Essen, Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie. – Abschlussbericht im Auftrag der Stadt Waltrop, unveröffentlicht, 76 S.

KUTTLER, W.; WEBER, S.; BARLAG, A.-B. (2003): Untersuchungen zu möglichen klimatischen Auswirkungen des geplanten Internationalen Entertainment Centers (IEC) im Süden Krefelds auf die umgebende Bebauung mittels Messungen und numerischer Modellierung. Abschlussbericht im Auftrag der Thyssen-Krupp Immobilien – Development, unveröffentlicht, 66 S.

MATZARAKIS, A., RUTZ, F.; MAYER, H. (2000): Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. – In: Biometeorology and urban climatology at the turn of the millenium (ed. by R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R. Oke and A. Auliciems): Selected papers from the conference ICB-ICUC'99, Sydney, WCASP-50, WMO/TD No, 1026, 273-278.

MAYER, H., BECKRÖGE, W., MATZARAKIS, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. – UVP-Report 5, S. 265- 268

Mitteilung der Stadt Krefeld vom 31.10.02: Anforderungsprofil für die klimatologische Überprüfung des FNP. Per E-Mail durch Herrn Rademacher, Fachbereich Umwelt, übermittelt.

Mitteilung des Landesumweltamtes NRW (2002): Mitteilung per E-Mail vom 25.2. und 13.11.2002 über die Tagesmittel der NO₂-Konzentration an der LUQS-Messtation Krefeld-Linn des Landesumweltamtes NRW, Essen, im Zeitraum November 2001 bis Oktober 2002.

MURL (1989): Klima-Atlas von Nordrhein-Westfalen. – Minister für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

PALMES, E.D., GUNNISON, A.F., DIMATTION, J., TOMCYK, C. (1976): Personal sampler for nitrogen dioxide. American Industrial Hygiene Association 37, S. 570-577

SCHULTZ, E., STAIGER, H., JENDRITZKY, G. (1994): Probandennahe Messungen in Innenräumen und an der Außenluft; erweiterte stoffliche Differenzierung von Staubinhaltsstoffen. – In: Luftverunreinigungen und Atemwegserkrankungen, lufthygienische und epidemiologische Untersuchungen im Raum Freiburg, ecomed-Verlag, Landsberg, S. 248-407

STADT KREFELD (1997): Stadtkarte 1:20.000. Der Oberstadtdirektor, Vermessungs- und Katasteramt.

STADT KREFELD (2002): Internetpräsenz der Stadt Krefeld im Monat April 2002 unter „www.krefeld.de“

STADT KREFELD, VERMESSUNG- UND KATASTERAMT (1996): Stadtatlas 1:10.000, Loseblattsammlung,

UVPG (2001): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung vom 5.9.2001, zuletzt geändert am 18.6.2002 (BGBl. 1 2001, S. 2350, zul. geänd. BGBl. 1 2002, S. 1914)

VDI-Richtlinie 2310 (1974). Maximale Immissions-Werte (einschließl. Bl 12 (1985) und Bl. 15 (2001)) – VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft. Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN-Normenausschuss (Hrsg.), Düsseldorf.

VDI-Richtlinie 3787 (1997), Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. – VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft im VDI und DIN-Normenausschuss (Hrsg.), Düsseldorf, 73 S.

VDI-Richtlinie 3787 (1998), Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. – VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft im VDI und DIN-Normenausschuss (Hrsg.), Düsseldorf, 29 S.

VEP (1991): Vorstudie zum Verkehrsentwicklungsplan Krefeld. – Planungsingenieure Retzko & Topp, Düsseldorf, 76 S.

22. BImSchV (2002): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe der Luft) vom 11.9.2002 (BGBl. 1 2002, S. 3626)